

ISSN 2072-9669

eISSN 2658-767X

№ 2 2023

Хранение и переработка сельхозсырья
Storage and Processing of Farm Products

ХИППС

SPFP

Пищевые системы.
Био- и здоровьесберегающие технологии



ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬХОЗСЫРЬЯ

№ 2 | 2023

Периодичность издания — 4 номера в год
Основан в 1993 г.

ISSN 2072–9669

eISSN 2658–767X

УЧРЕДИТЕЛЬ: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)"

РЕДАКЦИЯ

Заведующий редакцией и академический редактор —

Тихонова Елена Викторовна, канд. ист. наук

Выпускающий редактор — Шленская Наталия Марковна

Ответственный секретарь — Косычева Марина Александровна

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77–71128 от 22 сентября 2017 г.

Журнал включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» по группам специальностей:

- 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки) — с 01.02.2022
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) — с 15.02.2023
- 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (биологические науки) — с 15.02.2023
- 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (технические науки) — с 15.02.2023
- 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры сельскохозяйственные науки) — с 15.02.2023
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки) — с 15.02.2023
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (сельскохозяйственные науки) — с 15.02.2023
- 4.3.3. Пищевые системы (биологические науки) — с 15.02.2023
- 4.3.3. Пищевые системы (технические науки) — с 15.02.2023

КОНТАКТЫ:

125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11

Тел. +7 (499) 750–01–11*6585

E-mail: info@spfp-mgupp.ru

Сайт учредителя: mgupp.ru

Сайт журнала: spfp-mgupp.ru

© ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», 2023

STORAGE AND PROCESSING OF FARM PRODUCTS

№ 2 | 2023

Periodicity of publication — 4 issues per year
Published since 1993

ISSN 2072–9669

eISSN 2658–767X

FOUNDER: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian Biotechnological University

EDITORIAL OFFICE

Head of Editorial Team and Academic Editor —

Elena V. Tikhonova, Candidate of Historical Sciences

Issue Editor — Nataliya M. Shlenskaya

Executive Secretary — Marina A. Kosycheva

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communication, Information Technologies and Mass Media. The Mass Media Registration Certificate PI No FS77–71128 dated September 22, 2017.

The Journal is included in the «List of Russian peer-reviewed scientific journals in which the main scientific results of dissertations for the academic degrees of a doctor and candidate of sciences should be published» according to the groups of specialties:

- 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences) — from 01.02.2022
- 2.3.3. Automation and control of technological processes and productions (technical sciences) — from 15.02.2023
- 4.1.4. Gardening, vegetable growing, viticulture and medicinal crops (biological sciences) — from 15.02.2023
- 4.1.4. Horticulture, vegetable growing, viticulture and medicinal crops (technical sciences) — from 15.02.2023
- 4.1.4. Horticulture, vegetable growing, viticulture and medicinal crops agricultural sciences) — from 15.02.2023
- 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences) — from 15.02.2023
- 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (agricultural sciences) — from 15.02.2023
- 4.3.3. Food systems (biological sciences) — from 15.02.2023
- 4.3.3. Food systems (technical sciences) — from 15.02.2023

CONTACTS:

11 Volokolamskoe Highway, Moscow, 125080, Russian Federation

Tel. +7 (499) 750–01–11*6585

E-mail: info@spfp-mgupp.ru

Founder website: mgupp.ru

Journal website: spfp-mgupp.ru

© FSBEI HE “Russian Biotechnological University.” (BIOTECH University), 2023

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

ДАНИЛЬЧУК ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА – доктор технических наук, директор института прикладной биотехнологии имени академика РАН И.А. Рогова, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва

Члены редакционной коллегии:

Аксёнова Лариса Михайловна	доктор технических наук, профессор, академик РАН, ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, vniitek@vniitek.ru
Акулич Александр Васильевич	доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Республики Беларусь, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, akulichav57@mail.ru
Андреев Николай Руфеевич	доктор технических наук, член-корреспондент РАН, ВНИИ крахмалопродуктов – филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, vniik@arrisp.ru
Ахремчик Олег Леонидович	доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО Тверской государственный технический университет, ahremchikol@mgupp.ru
Баскаков Иван Васильевич	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, vasich2@yandex.ru
Битюков Виталий Ксенофонтович	доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Воронежский государственный университет инженерных технологий, зав. кафедрой «Информационные и управляющие системы» ВГУИТ, post@vsuet.ru
Благовещенская Маргарита Михайловна	доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Действительный член Международной академии наук информационных процессов и технологий и Международной академии информатизации, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), mmb@mgupp.ru
Боронтов Олег Константинович	доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы им. А.Л. Мазлумова, oborontov@mail.ru
Гинс Мурат Сабирович	доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, лауреат Государственной премии и премии Правительства РФ, зав. лабораторией физиологии и биохимии растений, интродукции и функциональных продуктов, ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства», anirr@bk.ru
Горлов Иван Федорович	доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, Поволжский НИИ производства и переработки мясо-молочной продукции, niimmp@mail.ru
Гудковский Владимир Александрович	доктор сельскохозяйственных наук, профессор академик РАН, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина, info@fnc-mich.ru
Добровольский Виктор Францевич	доктор технических наук, НИИ пищевого концентратной промышленности и специальной пищевой технологии – филиал ФИЦ питания и биотехнологии, gnunippspt@gmail.com
Донник Ирина Михайловна	доктор биологических наук, профессор, академик РАН, imdonnik@presidium.ras.ru
Ильина Ирина Анатольевна	доктор технических наук, заместитель директора по науке Северокавказского зонального научно-исследовательского института садоводства и виноградарства, iailyna@gmail.com
Калашникова Елена Анатольевна	доктор биологических наук, профессор кафедры «Генетики, биотехнологии, селекции и семеноводства», ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева», kalash0407@mail.ru
Коденцова Вера Митрофановна	доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории витаминов и минеральных веществ ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», kodentsova@ion.ru
Копусь Михаил Мефодьевич	доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Аграрный научный центр «Донской», Центр фундаментальных научных исследований (Зерноград), mkopus@gmail.com
Короткий Игорь Алексеевич	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», krot69@mail.ru
Косован Анатолий Павлович	доктор экономических наук, академик РАН, НИИ хлебопекарной промышленности, info@gosnihp.ru
Коста Руи	доктор технических наук, Португальский технический институт, guicosta@esac.pt
Красуля Ольга Николаевна	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева», okrasulya@mail.ru

EDITORIAL COUNCIL

Editor-in-Chief

TATIANA N. DANILCHUK – Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute of Applied Biotechnology named after academician I.A. Rogov, Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow

Members of the Editorial Board:

Larisa M. Aksyonova	Doctor of Science (Engineering), professor, academician of RAS, Federal Scientific Center of Food Systems named after V.M. Gorbatov of RAS, vniitek@vniitek.ru
Alexander V. Akulich	Doctor of Technical Science, Honoured Inventor of the Republic of Belarus, professor, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, akulichav57@mail.ru
Nikolay R. Andreev	Doctor of Technical Science, corresponding Member of RAS, All-Russian Research Institute of Starch – branch of the Federal Scientific Center of Food Systems named after V.M. Gorbatov of RAS, vniik@arrisp.ru
Oleg L. Akhremchik	Doctor of Technical Science, professor of the department of automation of technological processes, Tver State Technical University, ahremchikol@mgupp.ru
Ivan V. Baskakov	Doctor of Agricultural Science, professor of Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, vasich2@yandex.ru
Vitaliy K. Bityukov	Doctor of Technical Science, professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Voronezh State University of Engineering Technologies, head of the Department of information and control systems, post@vsuet.ru
Margarita M. Blagoveshchenskaya	Doctor of Technical Science, professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Full Member of the International Academy of Sciences of Information Processes and Technologies and the International Academy of Informatization, Russian Biotechnological University, mmb@mgupp.ru
Oleg K. Borontov	Doctor of Agricultural Science, leading researcher of the A.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar, oborontov@mail.ru
Murat S. Gins	Doctor of Biological Science, Corresponding Member of RAS, laureate of the State Prize and Prize of the Government of the Russian Federation, head of the Laboratory of Physiology and Biochemistry of Plants, Introduction and Functional Products, Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Center for Vegetable Growing”, Moscow Region, Russia, anirr@bk.ru
Ivan F. Gorlov	Doctor of Agricultural Science, Academician of RAS, Povolzhskiy Research Institute of Production and Processing of Meat and Dairy Products, niimmp@mail.ru
Vladimir A. Gudkovskiy	Doctor of Agricultural Science, Academician of RAS, Federal Scientific Center named after I.V. Michurin, info@fnc-mich.ru
Viktor F. Dobrovoilskiy	Doctor of Science (Engineering), Research Institute of Food Concentrates Industry and Special Food Technology - branch of the Federal Research Center for Nutrition and Biotechnology, gnumiippspt@gmail.com
Irina M. Donnik	Doctor of Biological Science, Academician of RAS, professor, Russian Academy of Sciences, imdennik@presidium.ras.ru
Irina A. Ilina	Doctor of Science (Engineering), deputy Director for Science of Federal State Budget Scientific Institution «North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making», kubansad@kubannet.ru
Elena A. Kalashnikova	Doctor of Biological Science, Professor of the Department of Genetics, Biotechnology, Breeding and Seed Production, Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, kalash0407@mail.ru
Vera M. Kodentsova	Doctor of Biological Science, Professor, leading researcher of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, kodentsova@ion.ru
Mikhail M. Kopus	Doctor of Biological Science, leading researcher of Agrarian Research Center “Donskoy”, Center for Fundamental Scientific Research (Zernograd), mkopus@gmail.com
Igor A. Korotkiy	Doctor of Science (Engineering), professor, Kemerovo State University, krot69@mail.ru
Anatoliy P. Kosovan	Doctor of Economics, Academician of RAS, State Research Institute of Baking Industry, info@gosniihp.ru
Rui Costa	Doctor of Science (Engineering), Portuguese Technical Institute, ruicosta@esac.pt
Olga N. Krasulya	Doctor of Science (Engineering), Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, okrasulya@mail.ru

Кульнева Надежда Григорьевна	доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный университет инженерных технологий, ngkulneva@yandex.ru
Левшин Александр Григорьевич	доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Эксплуатация машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве», ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева», alev200151@rambler.ru.
Лисицын Александр Николаевич	доктор технических наук, ВНИИ жиров, vniig@vniig.org
Лисицын Андрей Борисович	доктор технических наук академик РАН, ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, info@vniimp.ru
Мелешкина Елена Павловна	доктор технических наук, ВНИИ зерна и продуктов его переработки — филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, mer5@mail.ru
Неверов Евгений Николаевич	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», neverov42@mail.ru
Никитюк Дмитрий Борисович	доктор медицинских наук, член-корреспондент РАН, профессор. ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», nikitjuk@ion.ru
Никифоров-Никишин Алексей Львович	доктор биологических наук, профессор, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, 9150699@mail.ru
Оганесянц Лев Арсенович	доктор технических наук, академик РАН. ВНИИ пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности — филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, institute@vniinapitkov.ru
Ожерельев Виктор Николаевич	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Брянский государственный аграрный университет, vicoz@bk.ru
Оробинский Владимир Иванович	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, main@agroeng.vsau.ru
Пасынкова Елена Николаевна	доктор биологических наук, Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха, филиал Ленинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства "Белогорка" (Санкт-Петербург), pasynkova.elena@gmail.com
Панфилов Виктор Александрович	доктор технических наук, академик РАН. Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева, var@timacad.ru
Петров Андрей Николаевич	доктор технических наук, академик РАН. ВНИИ технологии консервирования — филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, vniitekpetrov@vniitek.ru
Подвижина Ольга Анатольевна	доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара имени А.Л. Мазлумова», vniiss@mail.ru
Савина Ольга Васильевна	доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», savina-999@mail.ru
Симоненко Сергей Владимирович	доктор технических наук. НИИ детского питания — филиал ФИЦ питания и биотехнологии, niidp@rambler.ru
Стогниенко Ольга Ивановна	доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара имени А.Л. Мазлумова» stogniolga@mail.ru
Титов Евгений Иванович	доктор технических наук, академик РАН. ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», titov@mgupp.ru
Тихомирова Наталья Александровна	доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии молока, пробиотических молочных продуктов и сыроделия, «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», tikhomirovaNA@mgupp.ru
Тужилкин Вячеслав Иванович	доктор технических наук, член-корреспондент РАН. ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств», titov@mgupp.ru
Тутельян Виктор Александрович	доктор медицинских наук, академик РАН, профессор. ФГБНУ «ФИЦ питания и биотехнологии», tutelyan@ion.ru
Уша Борис Вениаминович	доктор ветеринарных наук, академик РАН, ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», vet-san-dekanat@yandex.ru
Харитонов Владимир Дмитриевич	доктор технических наук, академик РАН, ВНИИ молочной промышленности, gnu-vnimi@yandex.ru
Храмцов Андрей Георгиевич	доктор технических наук, академик РАН. Северо-Кавказский федеральный университет, hramtsov@nsctu.ru
Щетинин Михаил Павлович	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», shchetininmihail@mgupp.ru

Nadezhda G. Kulneva	Doctor of Science (Engineering), Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, ngkulneva@yandex.ru
Alexander G. Levshin	Doctor of Science (Engineering), professor, head of the Department “Operation of the machine and tractor fleet and high technologies in crop production”, Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, alev200151@rambler.ru
Aleksander N. Lisitsyn	Doctor of Science (Engineering), All-Russian Research Institute of Fats, vniig@vniig.org
Andrey B. Lisitsyn	Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS, Federal Scientific Center of Food Systems named after V.M. Gorbатов of RAS, info@vniimp.ru
Elena P. Meleshkina	Doctor of Science (Engineering), All-Russian Research Institute of Grain and Products of Its Processing – branch of the Federal Scientific Center of Food Systems named after V.M. Gorbatoва of RAS, mep5@mail.ru
Eugeny N. Neverov	Doctor of Science (Engineering), professor, Kemerovo State University, neverov42@mail.ru
Dmitry B. Nikityuk	Doctor of Medicine, Corresponding Member of RAS, professor, Federal Research Center for Nutrition and Biotechnology, nikitjuk@ion.ru
Aleksey L. Nikiforov-Nikishin	Doctor of Biological Science, professor, Razumovsky Moscow State University of Food Production, 9150699@mail.ru
Lev A. Oganesyants	Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS, All-Russian Research Institute of Brewing, Beverage and Wine Industries – branch of the Federal Scientific Center of Food Systems named after V.M. Gorbатов RAS, institute@vniinapitkov.ru
Viktor N. Ozherelev	Doctor of agricultural Science, Professor of Bryansk State Agricultural University, vicoz@bk.ru
Vladimir I. Orbinsky	Doctor of Agricultural Science, professor of Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, vasich2@yandex.ru
Elena N. Pasyukova	Doctor of Biological Science, Federal Research Center for Potato named after A.I. A.G. Lorkha, branch of the Leningrad Research Institute of Agriculture “Belogorka” (St. Petersburg), pasynkova.elena@gmail.com
Viktor A. Panfilov	Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS, Russian State Agrarian University, Moscow Timiryazev Agricultural Academy, vap@timacad.ru
Andrey N. Petrov	Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS, All-Russian Research Institute of Technology Canning – branch of the Federal Scientific Center of Food Systems named after V.M. Gorbatoва of RAS, vniitekpetrov@vniitek.ru
Olga A. Podvigina	Doctor of Agricultural Science, leading researcher of the A.L. Mazlumov All-Russian research institute of sugar beet and sugar, vniiss@mail.ru
Olga V. Savina	Doctor of Agricultural Science, professor of Ryazan State Agrotechnological university named after P.A. Kostychev, savina-999@mail.ru
Sergey V. Simonenko	Doctor of Science (Engineering), Research Institute of Baby Nutrition – branch of the Federal Research Center for Nutrition and Biotechnology, niidp@rambler.ru
Olga I. Stognienko	Doctor of Biological Science, Leading Researcher of the A.L. Mazlumov All-Russian research institute of sugar beet and sugar, stogniolga@mail.ru
Evgeny I. Titov	Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS, Russian Biotechnological University, titov@mgupp.ru
Natalia A. Tikhomirova	Doctor of Science (Engineering), professor of the department “Technology of milk, probiotic milk products and cheesemaking” of Russian Biotechnological University, tikhomirovaNA@mgupp.ru
Vyacheslav I. Tuzhilkin	Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of RAS, Russian Biotechnological University, tvi@mgupp.ru
Victor A. Tutelyan	Doctor of Medicine, Academician of RAS, Professor, Federal Research Center for Nutrition and Biotechnology, tutelyan@ion.ru
Boris V. Usha	Doctor of Veterinarian Science, Academician of RAS, Russian Biotechnological University, vet-san-dekanat@yandex.ru
Vladimir D. Kharitonov	Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS, All-Russian Research Institut of Dairy Industry, gnu-vnimi@yandex.ru
Andrey G. Khramtsov	Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS, North-Caucasus Federal Univerity, hramtsov@nsctu.ru
Mikhail P. Schetinin	Doctor of Science (Engineering), Professor, Russian Biotechnological University, shchetininmihail@mgupp.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКТОРА

Е. В. Тихонова

Жанр научной коммуникации «техническая заметка»: фокус и структура 8

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬХОЗПРОДУКЦИИ

О. С. Егорова, Д. Р. Акбулатова, А. А. Шилкин

Факторы, влияющие на качество и сроки годности напитков брожения из плодового сырья: обзор предметного поля 14

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬХОЗПРОДУКЦИИ

И. А. Худоногов, Е. Г. Худоногова

Процесс стерилизации лекарственного растительного сырья *Origanum vulgare L.* при помощи управляемого инфракрасного излучения 33

Л. Ч. Бурак, А. Н. Сапач

Влияние предварительной обработки импульсным электрическим полем на процесс сушки: обзор предметного поля 44

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И ПРОДУКЦИИ АПК

А. Л. Вебер, С. А. Леонова

Изменения жирнокислотного состава и липидного профиля зерна гороха и фасоли при проращивании. 72

М. В. Беляков, Е. А. Никитин

Сравнительная оценка спектральных люминесцентных характеристик молока и молочных продуктов 90

Э. В. Мазукабзова, О. С. Руденко

Процесс кристаллизации эквивалентов масла какао: механизм, факторы и новые аспекты 103

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

В. В. Кондратенко, Т. Ю. Кондратенко

Определение целесообразности предварительной декатионизации растительного сырья для ферментативной фрагментации протопектинового комплекса 118

Л. В. Пермякова, И. Ю. Сергеева, И. А. Короткий, С. С. Лашицкий, Л. А. Рябоконева

Влияние способа получения экстрактов из зерновых отрубей на ферментативную активность *Saccharomyces Cerevisiae W-34/70* 132

В. А. Шагалова, М. М. Вустин, Н. Г. Машенцева

Киллерные токсины аскомицетовых дрожжей, подавляющие фитопатогенные грибы *Botrytis cinerea* 146

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

И. В. Щерба, О. Е. Бакуменко, П. В. Бакуменко

Разработка концентратов сухих напитков на основе растительных криопорошков 163

М. С. Каночкина, М. Г. Шипарева, А. С. Билялова, Н. Б. Смирнов

Создание функциональных кисломолочных продуктов на основе новых штаммов молочнокислых бактерий с высокими органолептическими показателями 176

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Л. В. Зайцева, М. А. Пестерев, А. С. Малахова, М. А. Лаврухин, А. Е. Баженова

Оценка целесообразности применения кавитационных воздействий в производстве помадных конфет с тыквенной подваркой 187

А. В. Рябинов, М. С. Виноградов, Д. К. Левоневский, С. И. Лоскутов

Автоматизация управления процессами выращивания культур в тепличных комплексах вертикального типа 201

О. Н. Крылов, М. М. Киселев, А. Е. Решетников, О. Ю. Абашева

Предпосевная оптическая обработка семян зерновых культур на примере озимой ржи «Фаленская 4» 214

СЫРЬЕ И ДОБАВКИ

В. М. Коденцова, Д. В. Рисник, Е. М. Серба, И. М. Абрамова, М. В. Туршатов, А. О. Соловьев

Яблочные выжимки как источник функциональных пищевых ингредиентов: обзор предметного поля 231

CONTENT

EDITORIAL

Elena V. Tikhonova

Genre of Scientific Communication “Technical Note”: Focus and Structure 8

THEORETICAL ASPECTS OF FARM PRODUCTS STORAGE AND PROCESSING

Olesya S. Egorova, Dilyara R. Akbulatova, Aleksey A. Shilkin

Factors Affecting the Quality and Shelf Life of Fermented Beverages from Fruit Raw Materials: Scoping Review . . . 14

PHYSICAL AND CHEMICAL METHODS OF FARM RAW MATERIAL PROCESSING

Igor A. Khudonogov, Elena G. Khudonogova

The Process of Sterilization of Medicinal Plant Raw Materials *Origanum Vulgare L.* using Controlled Infrared Radiation. 33

Leonid Ch. Burak, Aleksander N. Sapach

Influence of Pre-Treatment by a Pulsed Electric Field on the Drying Process: Scoping Review 44

RESEARCH ON TRAITS OF SUBSTANCES AND AGRIBUSINESS PRODUCTS

Anna L. Veber, Svetlana A. Leonova

Changes in the Fatty Acid Composition and Lipid Profile of Pea and Bean Grains during Sprouting 72

Mikhail V. Belyakov, Evgeny A. Nikitin

Comparative Evaluation of Spectral Luminescent Characteristics of Milk and Dairy Products 90

Ella V. Mazukabzova, Oksana S. Rudenko

The Crystallization Process of Cocoa Butter Equivalents: Mechanism, Factors and New Aspects 103

BIOTECHNOLOGICAL AND MICROBIOLOGICAL ASPECTS

Vladimir V. Kondratenko, Tatyana Yu. Kondratenko

Determination of the Feasibility of Preliminary Decationization of Plant Raw Materials for Enzymatic Fragmentation of the Protopectin Complex 118

Larisa V. Permyakova, Irina Y. Sergeeva, Igor’ A. Korotkiy, Sergey S. Lashitsky, Larisa A. Ryabokoneva

The Influence of the Method of Obtaining Extracts From Cereal Bran for the Enzymative Activity of *Saccharomyces Cerevisiae W-34/70* 132

Valeria A. Shagolova, Mikhail M. Vustin, Natalia G. Mashentseva

Killer Toxins of Ascomycete Yeast Suppressing Phytopathogenic Fungi *Botrytis cinerea* 146

DESIGNING AND MODELLING THE NEW GENERATION FOODS

Irina V. Shcherba, Olesya E. Bakumenko, Polina V. Bakumenko

Development of Concentrates of Dry Drinks Based on Vegetable Cryopowders 163

Marya S. Kanochkina, Marya G. Shipareva, Anastasia S. Bilyalova, Nikolay B. Smirnov

Creation of Functional Fermented Milk Products Based on New Strains of Lactic Acid Bacteria with High Organoleptic Characteristics 176

TECHNOLOGICAL PROCESSES, MACHINES AND EQUIPMENT

Larisa V. Zaitseva, Mikhail A. Pesterev, Anastasia S. Malakhova, Mikhail A. Lavrukhin, Alla E. Bazhenova

Assessment of Feasibility of Using Cavitation Treatment in the Production of Fondant Candies with Pumpkin Welding 187

Artem V. Ryabinov, Mikhail S. Vinogradov, Dmitry K. Levonevskiy, Svetoslav I. Loskutov

Automation of crop growing processes in vertical greenhouse complexes 201

Oleg N. Krylov, Michail M. Kiselyov, Aleksandr E. Reshetnikov, Olga Yu. Abasheva

Pre-Sowing Optical Treatment of Seeds of Grain Crops on the Example of Winter Rye “Falenskaya 4” 214

RAW MATERIALS AND ADDITIVE

Vera M. Kodentsova, Dmitry V. Risnik, Elena M. Serba, Irina M. Abramova, Mikhail V. Turshatov, Alexander O. Solovyev

Apple Pomace as a Functional Food Ingredient: Scoping Review 231

Жанр научной коммуникации «техническая заметка»: фокус и структура

¹ МГИМО МИД РФ, г. Москва, Россия

Е. В. Тихонова

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Тихонова Елена Викторовна

E-mail: tikhonova.e.v@inno.mgimo.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Тихонова, Е.В. (2023). Жанр научной коммуникации «техническая заметка»: фокус и структура. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 8-13. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.504>

ПОСТУПИЛА: 13.05.2023

ПРИНЯТА: 10.06.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.06.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

АННОТАЦИЯ

Введение: Жанровое разнообразие научной коммуникации качественным образом способствует ее оптимизации. Многие авторы традиционно описывают результаты своих научных исследований в формате оригинальных исследований, игнорируя возможности акцентировать те или иные их аспекты в более сфокусированных жанрах научной коммуникации. Одним из таких жанров является техническая заметка.

Цель: Проанализировать основные характеристики, формирующие уникальность жанра в сравнении с ближайшими «конкурентами»: оригинальной исследовательской статьей и краткими сообщениями.

Функциональное содержание и возможности применения технических заметок:

Функция жанра – максимально оперативное донесение информации о новом методе/инструменте/процедуре до широкого научного сообщества. Структурирование рукописи жанра, в целом, сходно с таковым у рукописей, описывающих оригинальное исследование и у кратких сообщений. Понимание функции жанра делает очевидным и особое акцентирование отдельных подсеций внутри каждой из секций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

техническая заметка, функциональность научной коммуникации, глобальные конвенции научной коммуникации, структурирование рукописи, технические инновации



Genre of Scientific Communication “Technical Note”: Focus and Structure

¹ MGIMO University, Moscow, Russia

Elena V. Tikhonova

CORRESPONDENCE:

Elena V. Tikhonova

E-mail: tikhonova.e.v@inno.mgimo.ru

FOR CITATIONS:

Tikhonova, E.V. (2023). Genre of Scientific Communication «Technical Note»: Focus and Structure. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 8-13. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.504>

RECEIVED: 13.05.2023

ACCEPTED: 10.06.2023

PUBLISHED: 30.06.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

ABSTRACT

Introduction: The genre diversity of scientific communication effectively contributes to its optimization. Many authors traditionally describe the results of their scientific research in the format of original studies, overlooking opportunities to emphasize certain aspects of their work in more focused genres of scientific communication. One such genre is the technical note.

Purpose: To analyze the main characteristics that define the uniqueness of the genre in comparison to its closest «competitors»: original research articles and brief communications.

Functional Content and Application Opportunities of Technical Notes: The function of the genre is to promptly convey information about a new method/tool/procedure to the wider scientific community. Structuring the manuscript of this genre is generally similar to that of manuscripts describing original research and brief communications. Understanding the function of the genre makes the special emphasis of certain subsections within each section obvious.

KEYWORDS

technical note, functionality of scientific communication, global conventions of scientific communication, manuscript structuring, technical innovations



Характеристики жанра

Техническая заметка (technical note) — это относительно небольшая по объему статья, детально описывающая новые устройства, метод или процедуру, либо модификацию уже существующих методов, устройств или процедур. Основное назначение технических заметок — оперативно донести до аудитории актуальную («горячую») информацию, имеющую практическую значимость. Они необходимы для ускорения обмена информацией, особенно в областях характеризующихся динамичным развитием научных и технологических процессов, скачкообразным развитием. Описываемая в технической заметке техника, процедура или устройство должны иметь практическую ценность (Ng & Peh, 2010). Основными критериями для публикации статьи указанного жанра являются новизна, достоверность и потенциал для применения в реальной практике. Формат технических заметок эволюционировал вместе с развитием научной коммуникации. Жанр имеет широкое хождение в технических и естественнонаучных областях исследования.

Характерными особенностями технических заметок являются краткость, конкретность и акцент на практической значимости описываемого устройства, метода или оборудования. Технические заметки, например, могут быть сконцентрированы на новых программных инструментах, экспериментальных результатах или вычислительных методах, с акцентом на технических инновациях или разработках, и направлены на демонстрацию новизны описываемого и их потенциального применения. Ограничением технических заметок является принципиальный акцент на краткости изложения (не более 3000 слов¹). Как результат, они не могут подробно описывать сложные вопросы или предоставлять глубинный анализ данных. Результаты, описанные в таких заметках, требуют дополнительного подтверждения или изучения в контексте полноценных оригинальных исследований.

Структурирование рукописи

Структура рукописи в жанре технических заметок следует концепции IMRaD. Максимально допустимый объем рукописи — 14 страниц.

Заглавие статьи жанра технические заметки необходимо формулировать, максимально фокусируясь на новизне исследования с тем, чтобы потенциальный читатель изначально имел возможность понять специфику подхода автора/авторов. Максимальная информативность заглавия во многом определяет и будущий рейтинг статьи (Тихонова & Косычева, 2022).

Аннотация не должна превышать 250 слов. Её функция — подробно, но лаконично описать все структурные компоненты рукописи. Необходимо уделять особое внимание подсекции аннотации, описывающей предпосылки создания нового метода/подхода/инструмента и контекст, в котором реализовывалась его институционализация. Многие авторы не полагают нужным прорабатывать данную подсекцию, теряя тем самым, возможность усилить персуазивность представляемой информации.

Секция «ключевые слова» включает от трех до десяти ключевых слов, отражающих основное содержание статьи. Ключевые слова требуют тщательной проработки. Эффективное ключевое слово, как правило, представляет собой словосочетание и формируется максимально фокусно (Тихонова & Косычева, 2021b).

Секция «Введение» призвана осветить информацию, ведущую к инновационному развитию описываемого в статье инструмента, метода и пр. Если, например, техническая заметка посвящена новому оборудованию, необходимо представить краткое описание его характеристик, функций и производительности. Если речь идет о модификации оборудования, то необходимо прокомментировать причины модификации и продемонстрировать его преимущества в сравнении с первоначальной версией оборудования. В последнем абзаце Введения необходимо сформулировать цели и исследовательские задачи. В отличие от введения к оригина-

¹ Format of Technical Notes. Electronic Journal of Biotechnology. http://ejbiotechnology.ucv.cl/iaformato/technical_notes.html#:~:text=Format%20of%20Technical%20Notes&text=A%20technical%20note%20is%20an,include%20two%20figures%20or%20tables

нальному исследованию, введение к технической заметке не концентрируется на глубинном анализе трендов в изучении проблемы, а нацелено на обоснование пробела в предметном поле, которое описываемый метод/инструмент/процедура позволят эффективно заполнить.

Секция «Методы» призвана представить все технические детали, необходимые для максимально точного воспроизведения процесса обоснования и тестирования техники/процедуры/метода. Секция акцентирует что и как было реализовано, как аккумулировались и тестировались данные: методы, инструментарий с обязательным указанием торгового наименования, производителя), процедура исследования.

Секция «Результаты» включает только те полученные данные, которые имеют непосредственное отношение к описываемому технологическому нововведению. В идеале автор должен структурировать секцию на тематические подсекции и ранжировать подсекции, опираясь на целеполагание. Такой подход позволит автору / авторам предложить читателям дорожную карту, призванную помочь последним понимать логику автора в процессе восприятия результатов исследования. Систематизация и организация результатов исследования имеет определяющее значение.

Секция Дискуссия приобретает в технической заметке особую значимость, поскольку не просто реализует обсуждение описываемого нововведения сквозь призму уже существующего знания в предметной области (Тихонова & Косычева, 2021а), но и обосновывает его техническое превосходство. Необходим аналитический подход к интеграции предложенного нововведения в существующую архитектуру знания. В этой секции следует указать на любые ограничения или недостатки описываемой технической инновации (Ng & Peh, 2010).

Секция «Заключение» в технических заметках так же является трендообразующей: принципиальную важность получает не только подведение итогов относительно представленных нового подхода/метода/процедуры, но и описание сфер его возможного применения, а так же направлений исследования, в которых анализируемое новшество способно проявить себя на принципиально

новом качественном уровне. В эмпирической статье секция «Заключение» выполняет идентичную функцию (Косычева & Тихонова, 2022), но акцентирование сфер применения полученных результатов в технической заметке получает решающее значение.

Дисклеймеры

Рукопись технических заметок в обязательном порядке должна включать заявления о: (1) доступности данных и материалов, (2) конфликте интересов, (3) финансировании, (4) вкладе авторов, (5) этических аспектах.

Заявление о доступности данных и материалов представляет информацию о том, где можно найти данные, подтверждающие результаты, представленные в статье, включая, где это применимо, гиперссылки на общедоступные архивные наборы данных, проанализированные или сгенерированные в ходе исследования.

Должны быть задекларированы и все источники финансирования представленного исследования с тем, чтобы акцентуация новизны описываемого метода, инструмента или процедуры не была обусловлена стремлением автора отблагодарить спонсора за финансовую поддержку. Этой же цели служит и заявление об отсутствии конфликта интересов. В ситуации наличия потенциального конфликта интересов пояснение автора/авторов относительно факторов их нивелирующих, способно значимым образом усилить значимость представленных в рукописи данных (Мекеко, 2023).

В дисклеймере с описанием вклада авторов должен быть подробно указан индивидуальный вклад каждого автора в рукопись. Редакция журнала указывает какая система описания авторского вклада используется и каким образом необходимо организовывать описание авторского вклада в текст. Наибольшее распространение сегодня имеет система описания авторского вклада CREDIT (Мекеко & Тихонова, 2023; Косычева, 2023). Техническая заметка особенно чувствительна к конкретности описания индивидуального вклада каждого конкретного автора ввиду того, что подобный жанр зачастую является первым шагом к патентованию изобретения, процедуры или подхода. Отсюда,

четкое понимание критериев авторства и строгое им следование (впрочем, как и в остальных жанрах научной коммуникации) является крайне значимым.

Отдельные журналы, публикующие технические заметки, настойчиво рекомендуют приводить расширенную справку об авторах, указывая, что подобный подход способен помочь читателю глубже интерпретировать статью и понять точку зрения автора/авторов².

Различия между техническими заметками и краткими сообщениями

В целом, отличия между кратким сообщением и технической заметкой связаны с акцентом на содержании. Краткое сообщение обычно сконцентрировано на новых идеях, данных или наблюдениях, в то время как техническая заметка фокусируется

на описании технических аспектов или методов. Для кратких сообщений рекомендовано включать не более 10 ссылок³, тогда как в технических заметках их число не лимитируется.

ВЫВОДЫ

Подготовленный читатель, осведомленный о функциональном содержании каждого из жанров научной коммуникации, способен извлечь обширный объем информации уже из технических аспектов статьи. Именно поэтому эффективность научной коммуникации во многом определяется следованием глобальным канонам жанрового воплощения.

Авторам необходимо расширять свои знания о функциональных аспектах научной коммуникации с тем, чтобы повышать глубинность научной коммуникации, параллельно добиваясь её максимальной эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

- Косычева, М.А. (2023). Система CRediT для описания авторского вклада. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 6-9. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i5.s169>
- Косычева, М. А., & Тихонова, Е. В. (2022). Заключение научной статьи: Как не повторить уже сказанное. *Health, Food & Biotechnology*, 4(3), 6-11. <https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i3.s159>
- Мекеко, Н.М. (2023). Дисклеймеры в тексте научной статьи. *Журнал работа и карьера*, 2(1), 4-6. <https://doi.org/10.56414/jeac.2023.34>
- Мекеко, Н.М., Тихонова, Е.В. (2022). Описание авторского вклада при подаче рукописи: система CREDIT. *Журнал работа и карьера*, 1(4), 5-7. <https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24>
- Тихонова, Е.В., & Косычева, М.А. (2022). Заглавие научной статьи: лучшие практики конструирования. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (3), 11-25. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.374>
- Тихонова, Е.В., & Косычева, М.А. (2021a). Дискуссия в контексте научной статьи: функциональное содержание и структурное воплощение. *Health, Food & Biotechnology*, 3(3), 7-16. <https://doi.org/10.36107/hfb.2021.i3.s127>
- Тихонова, Е.В., & Косычева, М.А. (2021b). Эффективные ключевые слова: Стратегии формулирования. *Health, Food & Biotechnology*, 3(4), 7-15. <https://doi.org/10.36107/hfb.2021.i4.s122>
- Тихонова, Е.В., & Шленская, Н.М. (2022). Краткие сообщения (short communications): структурирование и значимость в контексте научной коммуникации. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 4-19. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.351>
- Ng, K. H., & Peh, W. C. (2010). Writing a technical note. *Singapore Medical Journal*, 51(2), 101-104.

² Technical Note. Journal of Economic Structure. <https://journalofeconomicstructures.springeropen.com/submission-guidelines/preparing-your-manuscript/technical-note#:~:text=Technical%20Notes%20should%20be%20between,no%20more%20than%20200%20words>

³ Short Communications and Technical Notes. Journal of the American Institute for Conservation. https://www.culturalheritage.org/docs/default-source/resources/administration/guidelines/2019-jaic-short-communications-and-technical-notes.pdf?sfvrsn=5dca0f20_10

RREFERENCES

- Kosycheva, M.A. (2023). CRediT Statement for Recognizing Author Contributions. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 6-9. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i5.s169>
- Kosycheva M.A., & Tikhonova E.V. (2022). Research article conclusion: How to avoid repeating yourself. *Health, Food & Biotechnology*, 4(3), 6-11. <https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i3.s159>
- Mekeko, N.M. (2023). Disclaimers in a scientific article. *Journal of Employment and Career*, 2(1). <https://doi.org/10.56414/jeac.2023.34>
- Mekeko N.M., & Tikhonova E.V. (2022). Description of Author Contributions while Submitting a Manuscript: The CREDIT System. *Journal of Employment and Career*, 1(4), 5-7. <https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24>
- Tikhonova, E.V., & Kosycheva, M.A. (2022). Research paper title: Best design practices. *Storage and Processing of Farm Products*, (3), 11-25. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.374>
- Tikhonova, E. V., & Kosycheva, M. A. (2022). Research paper title: Best design practices. *Storage and Processing of Farm Products*, (3), 11-25. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.374>
- Tikhonova E. V., & Kosycheva M. A. (2021a). Discussion section in research articles: Content and structure. *Health, Food & Biotechnology*, 3(3). <https://doi.org/10.36107/hfb.2021.i3.s127>
- Tikhonova E.V., & Kosycheva M.A. (2021b). Effective Keywords: Strategies for their formulation. *Health, Food & Biotechnology*, 3(4), 7-15. <https://doi.org/10.36107/hfb.2021.i4.s122>
- Tikhonova E.V., & Shlenskaya N.M. (2022). Short communications: Structuring and significance in the context of scientific communication. *Storage and Processing of Farm Products*, (2). <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.351>
- Ng, K. H., & Peh, W. C. (2010). Writing a technical note. *Singapore Medical Journal*, 51(2), 101-104.

УДК 663.31

Факторы, влияющие на качество и сроки годности напитков брожения из плодового сырья: обзор предметного поля

Всероссийский научно-исследовательский институт пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, г. Москва, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:**Егорова Олеся Сергеевна**

E-mail: labvin@yandex.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Егорова, О. С., Акбулатова, Д. Р., & Шилкин, А. А. (2023). Факторы, влияющие на качество и сроки годности напитков брожения из плодового сырья: обзор предметного поля. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 14-32. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.447>

ПОСТУПИЛА: 15.02.2023**ПРИНЯТА:** 17.07.2023**ОПУБЛИКОВАНА:** 30.07.2023**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья опубликована в рамках темы НИР FGUS-2022-0012 государственного задания Федерального исследовательского центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН



О. С. Егорова, Д. Р. Акбулатова, А. А. Шилкин

АННОТАЦИЯ

Введение: В данном обзоре предметного поля проанализированы научные литературные источники (с 2004 по 2023 гг.), посвященные вопросу изменения качества напитков брожения из плодового сырья в процессе их производства и хранения, с целью выявления факторов, которые могут оказывать влияние на изменение сроков годности таких напитков.

Целью обзора явились изучение и анализ научных работ по вопросам формирования физико-химических, биохимических и органолептических показателей сидра, а также обобщение существующих данных по влиянию различных факторов, оказывающих влияние на изменение качественных характеристик сидров в процессе их производства и хранения.

Материалы и методы: Для обзора использованы научные публикации российских и зарубежных ученых по вопросам формирования и изменения качественных характеристик напитков брожения из плодового сырья. Поиск научных источников по исследуемой теме на русском и английском языках осуществлялся в базе данных Scopus, а также в электронной библиотеке eLibrary. В качестве метода исследования использовано обобщение результатов.

Результаты: Обобщены данные о влиянии отдельных групп химических веществ, входящих в состав плодового сырья, на формирование качественных характеристик напитков брожения. Проанализирована информация о применении различных методов обработки сидров с целью обеспечения микробиологической стабильности и предотвращения реакций потемнения. Выявлено, что новые методы нетермической обработки такие как импульсные электрические поля, ультрафиолетовый свет, высокоинтенсивные световые импульсы, ультразвук имеют широкие перспективы применения в качестве альтернативы традиционной термической пастеризации фруктовых напитков. Приведены результаты исследований, свидетельствующие об эффективности инновационных нетермических методов, для инактивации патогенных микроорганизмов. При этом отмечается необходимость проведения более глубоких исследований влияния ультрафиолетовых лучей и световых импульсов на органолептические свойства напитков, так как повышенные дозы или время воздействия могут стать причиной изменения цвета и снижения питательной ценности сидра. Проанализирована информация об изменениях химического состава напитков брожения под воздействием повышенной температуры и солнечного света. Выявлено, что указанные параметры окружающей среды оказывают вредное воздействие цвет, аромат и вкус напитков из плодового сырья.

Выводы: Обзор химического состава и качества плодового сырья, методов обработки и внешних факторов выявил, что для обеспечения сохранности напитков брожения необходимо глубокое изучение процессов, протекающих при их производстве, хранении, транспортировании и реализации. Выявление факторов риска, которые могут привести к интенсификации процессов, приводящих к ухудшению потребительских свойств данного продукта, может стать основой при разработке методов прогнозирования сроков годности новых наименований напитков брожения из плодового сырья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

напитки брожения, плодовое сырье, способы обработки, химический состав, качественные характеристики напитков, параметры окружающей среды

Factors Affecting the Quality and Shelf Life of Fermented Beverages from Fruit Raw Materials: Scoping Review

All-Russian Scientific Research Institute of Brewing, Beverage and Wine Industry – Branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems

Olesya S. Egorova, Dilyara R. Akbulatova, Aleksey A. Shilkin

CORRESPONDENCE:

Olesya S. Egorova

E-mail: labvin@yandex.ru

FOR CITATIONS:

Egorova, O. S., Akbulatova, D. R., & Shilkin, A. A. (2023). Factors affecting the quality and shelf life of fermented beverages from fruit raw materials: Scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 14-32. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.447>

RECEIVED: 15.02.2023

ACCEPTED: 17.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The article was published within the framework of the research topic FGUS-2022-0012 of the state assignment of the Federal Research Center for Food Systems named after V. M. Gorbatov RAS

ABSTRACT

Background: During the technological processes of processing blueberries (*Vaccinium myrtillus*), the amount of natural biologically active substances (BAS), in particular polyphenolic complexes and proanthocyanidins, is reduced to varying degrees. The analysis of publications of domestic and foreign researchers devoted to the complex and deep processing of blueberries made it possible to identify a problematic field of research – an insufficient degree of study and systematization of the influence of technological parameters on the safety of biologically active complexes of blueberries.

Purpose: The authors set a goal to critically analyze the existing blueberry processing technologies in order to identify the prospects for complex blueberry processing technologies, including those using biotechnological techniques that allow obtaining various functional products.

Materials and Methods: Literature sources containing up-to-date information on the methods of processing blueberries (*Vaccinium myrtillus* L.), published in the period from 2010 to 2022, were analyzed. The following search engines and electronic libraries were used: Scopus, Web of Science, Google Scholar, Medline, E-library.

Results: It is revealed that the most promising methods, from the point of view of the preservation of the complex of bioactive substances of blueberries and the intensity of technological processes, are sublimation and IR drying, freezing. These methods make it possible to obtain products (concentrated juice, blueberry powder) with minimal losses of raw materials and with maximum preservation of vitamin-mineral and anthocyanin complexes of blueberries. It is shown that complex technologies, deep processing technologies based on the use of a combination of physical and physico-chemical processes, and biotechnology with the use of highly specific enzyme preparations, including complex action, are of particular interest.

Conclusion: The analysis of the publications of domestic and foreign researchers devoted to the complex and deep processing of blueberries has revealed a problematic field of research – the insufficient degree of knowledge and systematization of the influence of technological parameters on the safety of biologically active blueberry complexes. Of particular importance for the organization of innovative and technologically advanced processing industries are complex technologies and technologies of deep processing, which make it possible to increase the efficiency of technological processes and obtain a wide range of food ingredients and biologically active substances from secondary products.

KEYWORDS

blueberries, drying, freezing, cavitation wave processing, biotechnological processing of blueberries, complex processing of blueberries, deep processing of blueberries



ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в последнее время большой популярностью пользуются высококачественные натуральные продукты на основе плодов, ягод и других растительных компонентов, обладающие повышенной пищевой ценностью. В частности, эксперты отмечают устойчиво растущий спрос на такие слабоалкогольные напитки из плодового сырья, как сидр и пуаре, основным сырьем для производства которых являются плоды яблони и груши (Кузьмина с соавт., 2022). Это популярные во многих странах мира освежающие напитки, которые помимо яркого фруктового с приятной кислинкой и пикантной терпкостью вкуса, обладают рядом полезных свойств (Calugar et al., 2021). В зависимости от требований законодательства, технологии производства и предпочтений потребителей, органолептические характеристики сидра в разных регионах мира сильно различаются. В соответствии с нормативной документацией Российской Федерации сидры могут быть произведены как из соков прямого отжима, так и из концентрированных яблочных соков. При производстве фруктовых и ароматизированных сидров, в том числе используют соки других культурных и дикорастущих фруктов, вкусоароматическое сырье, пряные растения и травы и т.п.

Первоочередной задачей при внедрении в производство новых наименований напитков является установление их срока годности и условий хранения (Ковалева с соавт., 2020; Кобелев с соавт., 2021; Матвеева & Хасанов, 2016). Обеспечение сохранности потребительских свойств напитка влечет за собой необходимость выбора сырья и методов его обработки, способствующих максимальному сохранению заданных органолептических показателей. При этом необходимо учитывать множество факторов, влияющих на стойкость напитков в процессе их производства, хранения, транспортирования и реализации. К факторам, оказывающим существенное влияние на качество и потребительские свойства напитков, относят, в первую очередь, состав, индивидуальные свойства и характеристики основного сырья и вспомогательных материалов (Calugar et al., 2021). В тоже время, в последние годы всесторонне исследуются внешние факторы, оказывающие как положительное, так и отрицательное влияние на качество и сохраняемость напитков, в процессе их хранения в течение срока

годности (Choudhary & Bandla, 2012; Donahue et al., 2004; Koutchma, 2009; Mahendran et al., 2019).

Необходимость изучения и обобщения информации о факторах, оказывающих влияние на качество и сроки годности напитков брожения из плодового сырья, обусловлена активным внедрением в производство новых инновационных технологий обработки (Посокина & Захарова, 2023; Azhuvalappil et al., 2010; Koutchma et al., 2016; Wiktor et al., 2019; Rodríguez-Bencomo et al., 2020) и отсутствием достаточного объема сведений об их влиянии на изменения вкусовых, питательных и функциональных свойств данного вида пищевой продукции.

Целью обзора стало рассмотрение и обобщение отечественных и зарубежных знаний о факторах, влияющих на процесс производства и хранения напитков брожения из плодового сырья, которые могут привести к изменению качественных характеристик и таким образом оказать влияние на сроки годности напитков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Базы данных и временные рамки

В рамках данной работы был проведен анализ отечественной и зарубежной литературы по вопросам изменения качественных характеристик напитков брожения из плодового сырья в процессе их производства и хранения. Материалами для исследования послужили 67 статей, опубликованные в период с 2004 по 2023 гг. По исследуемой теме проанализировано 8 источников на русском и 59 источников на английском языках, опубликованные в научных журналах и монографиях извлеченных из международной базы данных Scopus, а также отечественной электронной библиотеки eLibrary.Ru (РИНЦ). В том числе был проведен анализ публикаций из отечественной электронной библиотеки Киберленинка, диссертаций и нормативных документов. Публикации, не включенные в БД Scopus, eLibrary.Ru не анализировались, поскольку их исключение из этих баз данных ставит под сомнение валидность представленных в них результатов.

Критерии включения и исключения источников

Для поисковых запросов в отечественных электронных библиотеках были использованы следующие ключевые слова и словосочетания: напитки брожения, сырье, химический состав, микробиологическая безопасность, условия хранения, сроки годности, способы обработки, параметры окружающей среды. Ключевыми словами для осуществления поиска в базе данных Scopus являлись: fermentation beverages, fruit raw materials, chemical composition, qualitative characteristics of beverages, environmental parameters, processing methods.

Критерии включения:

- (1) Статья написана в период 2004–2023 год;
- (2) Статья соответствует теме исследования;
- (3) Типы анализируемых статей — оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, монографии, диссертации и ГОСТы.

Критерии исключения:

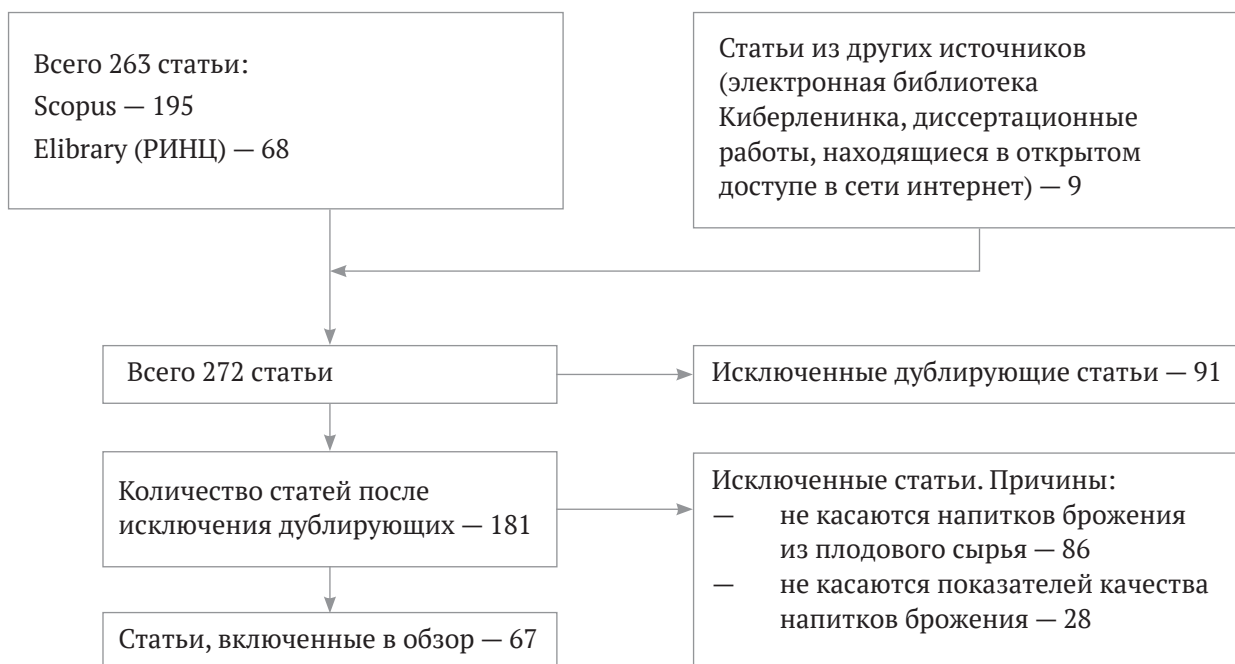
- (1) Статья не соответствует теме данного обзора: не касаются тематики формирования и изменения качественных характеристик напитков брожения из плодового сырья в процессе производства и хранения;
- (2) Статья написана не на русском или английском языках;
- (3) Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Анализ и систематизация данных

Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRISMA и составили схему проведения исследования (Рисунок 1).

Рисунок 1

Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA



Примечание. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation, 2018 (<https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M18-0850>). In the public domain.

Извлечение и анализ данных

Для анализа источников и поиска ответов на поставленные вопросы исследования: рассмотреть влияние химического состава сырья, производственных процессов, а также параметров окружающей среды на формирование и изменение качественных характеристик напитков брожения из плодового сырья; установить их положительное и негативное влияние на сроки годности напитков,

извлекались данные из 67 статей, соответствующих критериям включения, и вносились в Таблицу 1.

Источники были проанализированы для сравнения и анализа химического состава и качества сырья, применяемого при производстве напитков брожения из плодового сырья; влияния способов обработки и параметров окружающей среды на качество и сроки годности напитков.

Таблица 1

Пример извлечения данных из статей, включенных в обзор

№	Заглавие	Автор и год	Химический состав сырья и его влияние на качество напитков	Качество сырья и его влияние на стойкость напитков	Способы обработки и их влияние на качество и сроки годности напитков	Параметры окружающей среды и их влияние на качество напитков
1	A Preliminary Study of Yeast Strain Influence on Chemical and Sensory Characteristics of Apple Cider	Way M.L., Jones J.E., Longo R., Damberg R.G., Swarts N.D. (2022)	Incomplete fermentations can result in more 'fruity', 'fresh', and 'sweet' flavours in the cider. Conversely, ciders that have fermented through to dryness are known to be less 'sweet' and 'fruit' and more 'dry' or 'astringent'	—	—	—
2	An overview of the factors influencing apple cider sensory and microbial quality from raw materials to emerging processing technologies	Calugar P.C., Coldea T.E., Salanță L.C., Pop C.R., Pasqualone A., Burja-Udrea C., Zhao H., Mudura E. (2021)	The phenolic content of cider can be considered a key indicator of quality. Some varieties of sweet apples, which are used to make cider, are poor in tannins and do not provide astringency to cider. Each variety of apples has a unique range of volatile organic compounds, and is an important factor in obtaining good sensory characteristics and, therefore, a good cider quality	—	In the industrial cider-making, the spontaneous flora is inactivated by the addition of sulphur dioxide (SO ₂), which possesses bacteriostatic, antifungal and antioxidant properties and at SO ₂ concentrations above 50 mg/L contributes to slowing down the fermentation process.	—

Окончание Таблицы 1

№	Заглавие	Автор и год	Химический состав сырья и его влияние на качество напитков	Качество сырья и его влияние на стойкость напитков	Способы обработки и их влияние на качество и сроки годности напитков	Параметры окружающей среды и их влияние на качество напитков
					Operations such as maceration, pressing, pre-fermentation influence phenolic extraction and lead to improvements in cider quality	
3	Влияние методов «ускоренного старения» на сохранность потребительских свойств безалкогольных напитков с целью прогнозирования сроков годности	Ковалева, И.Л., Соболева О.А., Севостьянова Е.М. (2020)	—	—	—	Сравнительные исследования влияния только температурных факторов и температурных факторов в сочетании с ультрафиолетовым излучением. Вкус и аромат стали менее выражены, снизилось содержание двуокиси углерода. Изменение цвета напитков в сторону потемнения

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав и качество сырья

Химический состав, степень созревания и качество основного сырья оказывают существенное влияние на качественные характеристики продукта. Яблоки, как и другие фрукты, характеризуются высоким содержанием углеводов, органических кислот, витаминов, азотсодержащих соединений, минеральных веществ и микроэлементов, фенольных и ароматобразующих веществ, ферментов (Li et al., 2020; Juhart et al., 2022; Pinto et al., 2022; Feng et al., 2021; Wu et al., 2020; Preti et al., 2021; Пана-

сюк с соавт., 2014; Ширшова с соавт., 2020; Arnold & Gramza-Michałowska, 2022). Концентрации отдельных групп химических веществ, входящих в состав фруктовых соков, а также их соотношения играют важную роль в формировании органолептических характеристик напитков брожения (Кузьмина с соавт., 2022).

Сахара и органические кислоты определяют вкусовые, питательные и технологические качества фруктов и получаемых из них напитков (Akagić et al., 2022). Начальная концентрация сбраживаемых сахаров определяет потенциальную концентрацию спирта в готовом напитке брожения. Сахара, оставшиеся либо в результате неполного спирто-

вого брожения, либо добавленные после брожения, придают сладость готовым сидрам. Сидры с остаточными сахарами характеризуются более свежим, фруктовым и мягким вкусом, в то время как сухие сидры обладают более терпким и вяжущим вкусом (Way et al., 2022). Напитки с остаточными сахарами могут легко и самопроизвольно стать средой, в которой развивается вторичное брожение. У некоторых сидров с остаточным содержанием сахаров и pH выше 3,8, хранящихся при температуре окружающей среды, развивается дефект, называемый вязкостью или маслянистостью. Это вызвано определенными штаммами молочнокислых бактерий (*Lactobacillus* и *Leuconostoc spp.*), продуцирующими полимерный глюкан, который сгущает консистенцию и при разливе получается маслянистая текстура с заметным блеском.

Кислотность напитков брожения выступает важным показателем при оценке вкуса (Lobo et al., 2021). Она должна быть достаточной, чтобы создавать чистый освежающий сбалансированный вкус (Han et al., 2023). Кроме того, органические кислоты оказывают существенное влияние на стабильность напитков. Высокий уровень кислотности во время брожения способствует предотвращению развития болезнетворных микроорганизмов.

Полифенолы — важные биологически активные вещества фруктов и продуктов их переработки. Они участвуют в формировании вкуса и цвета, отвечают за уровень терпкости, придают тело и структуру напиткам (Макаров с соавт., 2018; Calugar et al., 2021). Фенольные соединения могут быть ингибиторами микробиологического роста, способствуют коллоидной стабильности фруктовых напитков. Вступая в реакцию с пектинами, пептидами и белками, содержащимися в сброживаемом сусле, они образуют нерастворимые молекулы, выпадающие в результате флокуляции в осадок с дрожжевыми клетками (Tarko et al., 2020). В то же время в процессе хранения продуктов полифенольные соединения подвержены ферментативному окислению, а также неферментативному гидролизу, приводящим к покоричневению продукта. В присутствии кислорода фермент полифенолоксидаза катализирует окисление полифенолов до орто-хинонов, которые быстро полимеризуются либо сами с собой, либо с аминокислотами или белками с образованием коричневых пигментов (Xu et al., 2023; Park et al., 2018).

Макро- и микроэлементы играют важную роль в брожении алкогольных напитков, способствуя росту дрожжей и правильному протеканию их метаболизма. Содержание ионов металлов в сусле различается и зависит от вида фруктов, их качества, агротехнических обработок и многого другого. Известно, что цинк и магний являются фактором, защищающим от стресса дрожжи при производстве алкогольных напитков, и могут помочь предотвратить гибель клеток, вызванную температурным шоком и токсичностью этанола. Ионы цинка и магния присутствуют в качестве кофактора для многих ферментов, включая те, которые необходимы для биосинтеза спирта и жирных кислот (Zhao et al., 2012; Tarko et al., 2020). Ионы железа, меди, марганца и цинка участвуют в окислительных биохимических процессах (Vidot et al., 2020). Железо играет решающую роль в окислительно-восстановительных системах в клетках и в различных ферментах. Результатом взаимодействия солей железа с танинами, содержащимися в соке терпких плодов и ягод, может стать образование помутнений и осадков.

Полифенолоксидазы и пероксидазы — основные ферменты, ответственные за потерю качества пищевых продуктов, связанную с деструкцией фенольных веществ. Полифенолоксидаза — медьсодержащий фермент, который содержится во многих фруктах, может способствовать порче продукта. Она катализирует окисление различных фенольных соединений, полимеризация которых приводит к образованию нежелательных коричневых пигментов (Jukanti, 2017; Falguera et al., 2012). Окисление фенольных соединений полифенолоксидазой начинается с измельчения яблок (Alberti et al., 2016). Напитки брожения, полученные из яблок с более низкой активностью полифенолоксидазы, обычно содержат также большее количество хлорогеновой кислоты, которая часто влияет на фенольный профиль продуктов из яблок (Coldea et al., 2020; Wandjou et al., 2020; Guiné et al., 2021). Другим ферментом, который оказывает значительное влияние на качество яблок и напитков, полученных из них, является пероксидаза. Она в присутствии перекиси водорода катализирует окисление широкого спектра природных веществ, присутствующих в растительных продуктах, что приводит к ухудшению цвета, вкуса и снижения питательных свойств. Так, полифенолоксидаза катализирует реакцию окисления о-дифенолов и полифенолов с образо-

ванием промежуточных семихинонов и о-хинонов, которые при конденсации образуют темноокрашенные продукты (Wibowo et al., 2019).

Известно, что яблоки на разных стадиях зрелости имеют разный химический состав, причем в более спелых яблоках выше содержание сахаров, ароматических соединений и ниже кислотность. Однако незрелые яблоки могут обладать большим потенциалом длительного хранения из-за более низкой концентрации этилена в начале хранения. Яблоки могут храниться в течение длительного периода времени перед обработкой, но химический состав яблок может измениться во время хранения, и таким образом, отразиться как на качестве самих плодов, так и на потребительских характеристиках получаемых из них соков и сидров (Simonato et al., 2021).

Использование некачественного сырья — фактор, который существенным образом влияет на стойкость напитков при хранении. Поскольку плоды, предназначенные для переработки, включая падалицу, как правило, имеют более низкое качество, чем плоды, предназначенные для непосредственного употребления в свежем виде, они подвержены потенциальному воздействию грибковых инфекций. Грибковые заболевания могут значительно изменить свойства плодов и продуктов их переработки (Simonato et al., 2021; Khan et al., 2022). Переработка подпорченных, пораженных гнилью и плесенью плодов достаточно часто становится следствием появления недостатков, пороков и болезней напитков. Проведенные исследования выявили значительные различия в химическом составе сидров, приготовленных из здоровых яблок, по сравнению с сидрами, приготовленными из зараженных яблок. Основные компоненты участвующие в формировании аромата сидра (спирты, сложные эфиры, жирные кислоты и альдегиды) могут трансформироваться определенным образом в зависимости от вида грибов (Simonato et al., 2021).

Производственные процессы

Для увеличения срока годности напитки должны быть обработаны с целью предотвращения микробиологической порчи (Falguera et al., 2012). Применение диоксида серы, фильтрация и пастеризация — хорошо изученные и зарекомендовавшие

себя в виноделии средства борьбы с нежелательными микроорганизмами, способствующие предотвращению ферментативных и неферментативных реакций потемнения.

Диоксид серы — консервант, который веками использовали для стабилизации вина. Он обладает бактериостатическими, противогрибковыми и антиоксидантными свойствами (Calugar et al., 2021). Диоксид серы, инактивируя спонтанную флору, обеспечивает желаемую микробиологическую стабильность, в связи с чем его используют главным образом для подавления дрожжевого и бактериального действия. Он защищает как свежее сусло, так и напитки брожения от окисления. Диоксид серы ингибирует окислительные ферменты, в частности полифенолоксидазу, и со временем разрушает их. Добавление диоксида серы при измельчении плодов, а также его присутствие в сусле может дополнительно привести к увеличению извлечения фенольных соединений, которые участвуют в сложении полноты вкуса и придают терпкость сидрам. Напитки брожения с низким содержанием сернистого ангидрида обладают более мягким вкусом, в то время как чрезмерное содержание диоксида серы приводит к тому, что напитки приобретают резкий запах. Можно производить напитки брожения без использования диоксида серы, но это, как правило, приводит к снижению биологической стабильности и срока годности напитка (Dos Santos et al., 2018).

Фильтрация — способ обработки сидров, основная функция которого заключается в обеспечении прозрачности, а также в достижении устойчивости напитка против грибковых и бактериальных заболеваний в большей или меньшей степени, в зависимости от задерживающей способности фильтра. Эффективность фильтрации зависит от многих параметров, включая тип фильтрующей установки и фильтрующего элемента, давление, а также тип продукта, подвергающегося фильтрации, и микроорганизмов. В случае применения микрофильтрации, мембранных фильтр-элементов с размером пор 0,45–0,8 мкм, возможно достичь полного удаления всех микроорганизмов, включая бактерии, дрожжи, плесень и простейшие. Такую фильтрацию называют обеспложивающей или стерильной. Она является хорошей альтернативой процессу пастеризации и позволяет существенно увеличить сроки годности напитков, максимально сохранить ор-

ганолептические характеристики, снизить до минимума или вообще отказаться от консервантов. В результате фильтрации, в том числе, достигается полное осветление и прозрачность сидра (Zhao et al., 2017; Wicklund et al., 2020).

Пастеризация — наиболее широко используемая термическая обработка фруктовых соков и напитков. Этот процесс может быть осуществлен при различных сочетаниях времени и температуры. Длительная обработка при умеренной температуре и кратковременная обработка при высокой температуре являются наиболее часто используемыми методами пастеризации фруктовых напитков. Обработка в течение длительного времени при умеренных температурах приводит к нежелательным изменениям качества продукта, поэтому этот метод часто заменяют кратковременным воздействием более высоких температур. Во втором случае, благодаря непродолжительной термообработке, удается свести к минимуму нежелательные изменения качества напитков (Vasanth Rupasinghe & Juan, 2012).

Пастеризация, используемая для инактивации патогенных микроорганизмов и порчи продуктов, может привести к химическим и физическим изменениям, которые в свою очередь оказывают неблагоприятное влияние на органолептические свойства и отвечают за снижение содержания или биодоступности биологически активных соединений (Müller et al., 2014; Islam et al., 2016; Ioannou et al., 2012; Rawson et al., 2011a). Чтобы избежать вредного воздействия пастеризации на жидкие пищевые продукты, в последние годы активно исследуют и внедряют методы нетермической обработки (Azhuvalappil et al., 2010; Rawson et al., 2011; Islam et al., 2016; Посокина & Захарова, 2023). Из литературных данных известно, что некоторые отдельные нетермические методы обработки эффективны для инактивации микроорганизмов или уменьшения количества колониеобразующих единиц и не оказывают при этом отрицательного влияния на вкусовые качества и питательную ценность продукта. Более того, сочетание таких методов может также обеспечить синергетический эффект в продлении срока годности фруктовых соков и напитков и стать хорошей альтернативой традиционным методам пастеризации.

Так, в качестве альтернативы традиционной пастеризации при производстве напитков из фруктового сырья используют импульсные электрические поля (Turk et al., 2012), ультрафиолетовый свет (Koutchma et al., 2016; Donahue et al., 2004), высокоинтенсивные световые импульсы (Mahendran et al., 2019; Wiktor et al., 2019; Rodríguez-Bencomo et al., 2020), ультразвук (Techakanon & Sirimuangmoon, 2020; Ugarte-Romero et al., 2006).

Обработка импульсными электрическими полями заключается в использовании коротких электрических импульсов высокого напряжения. Данный способ обработки предлагается в качестве альтернативы пастеризации, поскольку он эффективен против патогенных микроорганизмов (Chueca et al., 2015). Многочисленные исследования показывают, что обработка импульсными электрическими полями имеет много преимуществ по сравнению с пастеризацией, позволяя сохранить первоначальные вкусовые и питательные свойства продуктов благодаря короткому времени и низким температурам воздействия.

Сравнительные исследования обработки импульсными электрическими полями и традиционной кратковременной высокотемпературной пастеризацией показали, что оба метода позволяют снизить уровень микроорганизмов *Escherichia coli* более чем в пять раз. Авторы исследования отмечают, что обработка высоковольтными импульсными электрическими полями не оказывает влияния на величину pH, в то время как термическая обработка способствовала увеличению значения этого параметра. При этом в обоих случаях наблюдалось некоторое изменение цвета напитка (Charles-Rodríguez et al., 2007).

В исследованиях интенсивности влияния способа обработки на инокуляцию кишечной палочки в яблочном сидре было отмечено, что напитки, обработанные как импульсными электрическими полями, так и пастеризованные, сохраняли хорошие микробиологические показатели в течение 4 недель хранения. Органолептический анализ показал, что яблочный сидр, обработанный импульсными электрическими полями, обладал лучшими характеристиками аромата и цвета, чем образец, обработанный термически (Azhuvalappil et al., 2010). Комбинацию прессования и обработки импульсными электрическими полями часто

используют для повышения выхода плодовых соков, с увеличенным выходом фенольных соединений и улучшенными вкусовыми качествами за счет увеличения содержания сложных эфиров (Mannozi et al., 2018; Wibowo et al., 2019).

Обработка ультрафиолетом (UV) — это альтернативный метод пастеризации и продления срока годности напитков. УФ-технология использует излучение с электромагнитным спектром в диапазоне от 100 до 400 нм, который в свою очередь подразделяется на коротковолновый УФ-С (190–280 нм), средневолновый УФ-В (280–320 нм) и длинноволновый УФ-А (320–400 нм). Известно, что УФ-С обладает бактерицидным действием и способствует инактивации микроорганизмов. Этот бактерицидный механизм основан на поглощении ультрафиолетового излучения микробной ДНК или РНК. Основным механизмом является образование димеров пиримидина, которые препятствуют размножению микроорганизмов, что делает их неактивными. При этом степень повреждения клеток зависит от типа средств, микроорганизмов и дозы УФ-излучения (Choudhary & Bandla, 2012). Различные исследования показали, что кратковременная УФ-обработка обладая бактерицидным эффектом, по сравнению с методами термической пастеризации оказывает минимальное влияние на качество фруктовых напитков (Islam et al., 2016; Diao et al., 2018; Yang et al., 2019).

Описан нетермический способ воздействия УФ-С с целью уменьшения содержания микроорганизмов и патулина в яблочном соке и сидре. Этот метод обработки способствовал максимальному снижению патулина без ущерба для качества конечного продукта (Dong et al., 2010). УФ-облучение, в том числе подходит для инактивации спор *Alicyclobacillus acidoterrestris* в яблочном соке. В частности, она оказалась эффективной для снижения уровня полифенолоксидазы в яблочном соке. Было доказано, что обработка УФ-излучением 40 МДж·см² защищает полифенольные соединения яблочного сока и повышает антиоксидантную активность (Islam et al., 2016).

Нетепловые технологии, такие как ультрафиолетовое облучение, могут обеспечить преимущества при минимальной обработке прозрачных напитков. В исследовании влияния обработки УФ-излучением (дозировками в диапазоне от 2,66 до 53,10

Дж/см²) на качественные характеристики восстановленного яблочного сока было установлено, что УФ-излучение не оказывает влияние на значение pH, содержание сахаров и общее содержание фенолов. Авторами было отмечено снижение неферментативного потемнения и антиоксидантной способности обработанного сока по сравнению с необработанным. При увеличении дозы энергии был отмечен эффект осветления окраски. Обработка УФ-излучением способствовала снижению уровня *E. Coli* и *L. innocua*. Результаты органолептической оценки показали, что обработка соков дозами УФ-излучения более 10,62 Дж/см² оказывала неблагоприятное воздействие на вкус и цвет яблочного сока (Caminiti et al., 2010).

Следует уделять особое внимание изучению влияния УФ-излучения на физико-химические характеристики и питательный состав напитков (Koutchma et al., 2016). Так, в сравнительном исследовании различных методов обработки сидра (пастеризация, обработка импульсными электрическими полями и УФ-излучением) с целью подавления микробиологической порчи и увеличения сроков годности, было установлено, что в сидре, обработанном УФ-излучением, наблюдался значительный рост дрожжей и плесени после 2 недель хранения (Azhuvalappil et al., 2010). Не нужно забывать и о побочном эффекте, связанным с отрицательным воздействием ультрафиолетовых лучей на цвет сидра и пуаре.

Обработка ультразвуком (УЗ) имеет большие перспективы применения в пищевой промышленности и может быть успешно использована в качестве альтернативы традиционной термической пастеризации фруктовых напитков (Saeeduddin et al., 2015; Başlar & Ertugay, 2012; Park & Ha, 2019).

УЗ — это звуковые волны с частотой более 20 кГц. Частота УЗ, используемая в пищевой промышленности для инактивации микроорганизмов, колеблется от 20 кГц до 10 МГц. Бактерицидное действие УЗ в основном обусловлено процессом кавитации, которая используется в пищевой промышленности для инактивации микробов.

Обработка ультразвуком сама по себе не очень эффективна для уничтожения бактерий в пищевых продуктах (Barba et al., 2017). Для промышленного применения УЗ необходимо использовать

в сочетании с другими процессами консервирования в целях усиления микробной инактивации (Park & Na, 2019). Использование ультразвука в сочетании с давлением и/или нагревом является перспективным способом обработки пищевых продуктов. Термозвуковая обработка (тепло плюс обработка ультразвуком), обработка давлением в сочетании с ультразвуком и обработка теплом в сочетании с давлением и ультразвуком, вероятно, являются лучшими методами инактивации, поскольку они более энергоэффективны и эффективны в уничтожении микроорганизмов. В настоящее время применение УЗ-обработки является объектом изучения и требует большого объема дополнительных исследований, чтобы более полно выяснить влияние ультразвука на свойства пищевых продуктов (Park & Na, 2019; Lee et al., 2013).

Обработка импульсным светом основана на применении кратковременных световых импульсов с интенсивным широким спектром. Импульсный свет — это нетепловая инновационная технология, используемая в качестве альтернативы традиционным методам дезинфекции и консервирования. Среди преимуществ можно выделить следующие: эффективность против большого разнообразия патогенных и других вредных микроорганизмов; не образует новых соединений (при использовании ксеноновых ламп-вспышек, которые нетоксичны и не содержат ртути); низкие эксплуатационные расходы. Обработка импульсным светом успешно применяется для микробиологического обеззараживания прозрачных напитков. Что касается недостатков, то наиболее важными являются высокие первоначальные инвестиционные затраты, короткий срок службы ламп, изменения pH и цвета при высокой интенсивности и перегреве и, следовательно, негативные изменения органолептических характеристик продукта. Тем не менее, недавно появились доказательства того, что обработка импульсным светом ниже критической плотности $3,82 \text{ Дж/см}^2$ сводит к минимуму фоторазрушение и потемнение модели раствора на основе фенола. Обработка импульсным светом в сочетании с глутатионом и ионами железа показала эффективность с целью снижения содержания патулина в яблочном соке до 97%. Однако, требуется больше данных о влиянии импульсного света на окислительную стабильность и вкусовые качества обрабатываемого продукта (Mahendran et al., 2019; Wiktor et al., 2019; Rodríguez-Bencomo et al., 2020).

Хотя альтернативы термической обработке представляются менее вредными, существует множество параметров и условий, которые влияют на качественные характеристики обрабатываемого продукта. Кроме того, необходимо проведение дополнительных исследований, которые должны быть сосредоточены на понимании механизмов, лежащих в основе изменений общего качества плодовых напитков брожения, а также на проектировании и оптимизации технологических процессов, которые необходимо детально изучить, чтобы максимально использовать их потенциал в качестве альтернативных нетепловых технологий при производстве напитков для максимального сохранения их качества.

Параметры окружающей среды

К наиболее важным факторам, позволяющим контролировать скорость негативных изменений в пищевых продуктах, относят параметры окружающей среды, оказывающие значительное влияние на скорость реакций, ухудшающих качество пищевых продуктов. Во время хранения под воздействием таких основных факторов, как температура и солнечный свет, в напитках брожения происходит интенсификация окислительно-восстановительных реакций, которые в свою очередь приводят к изменению химического состава и качественных характеристик напитков.

Общеизвестно, что температура существенно влияет на скорость химических, биохимических реакций и микробиологических процессов. Как и многие другие пищевые продукты, напитки из плодового сырья рекомендуется хранить при невысокой температуре окружающего воздуха, от 0 до 20 °С. Контроль температуры окружающего воздуха важен на всех этапах производства напитков — от розлива в потребительскую упаковку до реализации потребителю. Повышение температуры ускоряет процессы, вызывающие порчу напитка, связанную с риском микробиологической порчи, а также может привести к закисанию и появлению плесени в напитках (Ковалева с соавт., 2020; Кобелев с соавт., 2021).

Кроме того, повышение температуры хранения интенсифицирует процессы старения. Именно на этом эффекте основаны многие ускоренные ме-

тоды анализа и испытаний с целью подтверждения сроков годности, основанных на оценке скорости широкого спектра сложных химических, физических и сенсорных изменений, происходящих в пищевых продуктах (Ковалева с соавт., 2020; Кобелев с соавт., 2021; Матвеева & Хасанов, 2016).

Солнечный свет — один из наиболее агрессивных факторов старения в естественных условиях, выступает как катализатор радикальных реакций, существенно увеличивая их скорость. Солнечный свет содержит достаточное количество ультрафиолетового излучения и почти все фотобиологические реакции индуцируются этой частью солнечного спектра (Salih, 2006). Воздействие ультрафиолетового излучения инициирует свободнорадикальное окисление и катализирует другие стадии процесса окисления (Choudhary & Bandla, 2012). Воздействие солнечного света на светочувствительные пищевые продукты приводит к ухудшению качества, степень которого напрямую зависит от нескольких факторов, включая спектр и интенсивность света, а также время экспозиции и упаковочный материал.

Для более строгой регламентации лабораторных испытаний под воздействием УФ-излучения, как имитации солнечного света, необходимо определить степень влияния УФ-лучей на отдельные группы биологически активных веществ и возможные превращения в них. Биологические эффекты ультрафиолетового излучения сильно варьируются в зависимости от длины волны.

Фотохимическая деградация вызывается фотонами света, разрушающими химические связи. Для каждого типа химической связи существует критическая пороговая длина волны света, обладающего достаточной энергией, чтобы вызвать реакцию. Свет с любой длиной волны, меньшей порогового значения, может разорвать связь, но свет с большей длиной волны не может разорвать ее независимо от их интенсивности.

На сегодняшний день имеется недостаточный объем литературных данных о влиянии ультрафиолетовой обработки на функциональные свойства жидких пищевых продуктов, включая яблочный сок и сидр. Ультрафиолетовое излучение одобрено регулирующими органами и признано одним из самых простых и очень экологических способов уничтожения патогенных организмов.

Одно из ограничений его более широкого коммерческого применения заключается в отсутствии достаточного объема исследований сравнительного воздействия УФ-излучения на питательные вещества и качество продуктов (Koutchma et al., 2016).

В литературных источниках имеются сведения об исследованиях возможного образования фурана под действием УФ-излучения в яблочном сидре и в стандартных растворах компонентов яблочного сидра. Известно, что при термической обработке пищевых продуктов, в результате разложения углеводов, диссоциации аминокислот и окисления полиненасыщенных жирных кислот может образовываться такое токсическое соединение, как фуран. Результаты исследований показали, что обработка УФ-излучением способствовала образованию фурана в яблочном сидре. Авторами выдвинуто предположение, что основным источником фурана может быть фруктоза, так как обработка растворов фруктозы УФ-излучением (в дозах до 9 Дж/см²) приводила к образованию большего количества фурана, в то время как в растворах глюкозы или сахарозы было отмечено образование низких концентраций фурана, и практически его полное отсутствие было установлено в растворах аскорбиновой кислоты или яблочной кислоты, подвергнутых воздействию УФ-излучения (Fan & Geveke, 2007).

Имеются единичные литературные источники о влиянии ультрафиолетовой обработки на ферменты во фруктовых соках (Müller et al., 2014). До настоящего времени не сообщалось о влиянии ультрафиолетового излучения на содержание отдельных полифенолов и антиоксидантную активность яблочного сока (Islam et al., 2016).

Недостаточно информации о взаимодействии ультрафиолетового излучения со сложной пищевой матрицей, которое часто можно назвать переносом излучения в полупрозрачной или мутной среде. В пищевом продукте на получение дозы ультрафиолетового излучения может влиять несколько факторов. Было обнаружено, что одним из факторов, постоянно влияющих на эффективность инактивации ультрафиолетового излучения в жидкой системе, является поглощение. Изменения в поглощении ультрафиолетового излучения пищевыми продуктами необходимо учитывать при проектировании процесса консервирования (Koutchma, 2009).

Потеря питательных веществ и появление неприятных привкусов при воздействии УФ-излучения при обработке соков и других жидких пищевых продуктов требуют подробного изучения, и следует предпринять попытки свести к минимуму вредное воздействие ультрафиолетового излучения на антиоксиданты, изменения текстуры и цвета, а также образование неприятных привкусов и ароматов. Эти эффекты, весьма вероятно, зависят от длины волны и дозы и будут различными для разных жидких пищевых продуктов и пищевых смесей. Следовательно, чтобы определить влияние ультрафиолета, необходимо протестировать каждый продукт питания на предмет его спектральной чувствительности к ультрафиолету. Кроме того, знание кинетики разложения витаминов под воздействием ультрафиолетового облучения позволит оптимизировать микробную инактивацию при минимизации потерь витаминов.

ВЫВОДЫ

В представленном обзоре проведен анализ литературных источников и обобщены основные сведения о влиянии отдельных соединений химического состава сырья, различных методов обработки в процессе производства и внешних факторов среды во время хранения на качественные характеристики напитков брожения из плодового сырья. Отмечено участие сахаров, органических кислот, полифенольных соединений, ионов металлов и ферментов в формировании органолептических характеристик плодовых напитков, а также приведены сведения о влиянии указанных соединений на стабильность напитков. Наряду с широко известными методами стабилизации описаны исследования инновационных методов обработки с целью продления срока годности плодовых соков и напитков. Среди положительных моментов современных методов отмечены их эффективность при инактивации микроорганизмов, низкая энергоемкость, скорость обработки и низкие температуры воздействия на продукт. При этом выявлены проблемы, связанные с ограниченностью информации о воздействии данных методов на изменения вкусовых и питательных свойств напитков. Отмечено отрицательное влияние на качество и сроки годности сидров таких факторов окружающей среды, как температура и солнечный свет. Повышенная температура способствует ускоре-

нию процессов, связанных со старением и риском микробиологической порчи напитков. Солнечный свет, как источник ультрафиолетового излучения обладает бактерицидным эффектом, что является положительным фактором. С другой стороны, воздействие солнечного света во время хранения напитков из плодов может приводить к ухудшению их качества, индуцируя фотобиологические реакции, способствуя появлению неприятных тонов во вкусе, а также образованию токсических соединений. Отмечено, что недостаток информации о воздействии солнечного света на биологически активные вещества напитков требует дальнейшего изучения.

Таким образом, для обеспечения качества и сохранности каждого конкретного продукта, в том числе напитков брожения из плодового сырья в течение определенного срока, необходим комплексный подход к выявлению всех возможных факторов риска. Одним из направлений такого подхода может стать определение перечня научно обоснованных показателей, количественные или качественные уровни которых отражают изменения характеристических особенностей пищевого продукта. В том числе, необходимо глубокое изучение процессов, протекающих при производстве, хранении, транспортировании и реализации напитков, которые могут привести к ухудшению потребительских свойств данного продукта.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Егорова Олеся Сергеевна: концептуализация; методология; администрирование данных; создание черновика рукописи; создание рукописи и её редактирование; визуализация; руководство исследованием; администрирование проекта.

Акбулатова Диляра Рамилевна: подготовка и создание черновика рукописи, в частности написание первоначального текста рукописи, формальный анализ; проведение исследования.

Шилкин Алексей Александрович: подготовка и создание черновика рукописи, в частности написание первоначального текста рукописи, визуализация, верификация данных; формальный анализ.

ЛИТЕРАТУРА

- Кобелев, К. В., Волкова, Т. Н., Харламова, Л. Н., Лазарева, И. В., & Данилян, А. В. (2021). Методы ускоренного прогнозирования сроков годности пивных напитков. *Пищевая промышленность*, (7), 82–85. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.7.7.008>
- Ковалева, И. Л., Соболева, О. А., & Севостьянова, Е. М. (2020). Влияние методов «ускоренного старения» на сохранность потребительских свойств безалкогольных напитков с целью прогнозирования сроков годности. *Пиво и напитки*, (2), 6–10. <https://doi.org/10.24411/2072-9650-2020-10015>
- Кузьмина, Е. И., Егорова, О. С., & Акбулатова, Д. Р. (2022). Сидры в России и за рубежом. Сырье. *Пищевая промышленность*, (12), 87–91. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.12.12.018>
- Макаров, С. С., Жиров, В. М., Панасюк, А. Л., & Преснякова, О. П. (2018). Технологические аспекты производства фруктовых вин с повышенной биологической ценностью. *Пиво и напитки*, (2), 42–45.
- Матвеева, Н. А., & Хасанов, А. Р. (2016). Прогнозирование срока годности методом ускоренного тестирования в технологии напитков функционального назначения. *Научный журнал Национального исследовательского университета Института точной механики и оптики. Процессы и аппараты пищевых производств*, (4), 75–82.
- Панасюк, А. Л., Кузьмина, Е. И., & Егорова О. С. (2014). Изменение содержания органических кислот при производстве плодовых напитков и вин. *Пиво и напитки*, (2), 36–38.
- Посокина, Н. Е., & Захарова, А. И. (2023). Современные нетермические способы обработки растительного сырья, применяемые для увеличения его хранимоспособности. *Пищевые системы*, 6(1), 4–10. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-4-10>
- Ширшова, А. А., Агеева, Н. М., & Бирюкова, С. А. (2020). Исследование химического состава яблок различных сортов, произрастающих в хозяйствах Краснодарского края. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 82(2), 131–136. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-2-131-136>
- Akagić, A., Oras, A., Gaši, F., Meland, M., Drkenda, P., Memić S., Spaho, N., Žuljević, S. O., Jerković, I., Musić, O., & Hudina, M. (2022). A comparative study of ten pear (*pyrus communis* L.) cultivars in relation to the content of sugars, organic acids, and polyphenol compounds. *Foods*, 11(19), Article 3031. <https://doi.org/10.3390/foods11193031>
- Alberti, A., Machado dos Santos, T. P., Ferreira Zielinski, A. A., Eleuterio dos Santos, C. M., Braga, C. M., Demiate, I. M., & Nogueira, A. (2016). Impact on chemical profile in apple juice and cider made from unripe, ripe and senescent dessert varieties. *LWT – Food Science and Technology*, 65, 436–443. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.08.045>
- Arnold, M., & Gramza-Michałowska, A. (2022). Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in food science and food safety*, 21(6), 5038–5076 <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13059>
- Azhuvalappil, Z., Fan, X., Geveke, D. J., & Zhang, H. Q. (2010). Thermal and nonthermal processing of apple cider: storage quality under equivalent process conditions. *Journal of Food Quality*, 33(5), 612–631. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2010.00342.x>
- Barba, F. J., Koubaa, M., do Prado-Silva, L., Orlie, V., & Sant'Ana, A. S. (2017). Mild processing applied to the inactivation of the main foodborne bacterial pathogens: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.011>
- Başlar, M., & Ertugay, M. F. (2012). The effect of ultrasound and photosonication treatment on polyphenoloxidase (PPO) activity, total phenolic component and colour of apple juice. *International Journal of Food Science and Food Technology*, 48(4), 886–892. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12015>
- Calugar, P. C., Coldea, T. E., Salanță, L. C., Pop, C. R., Pasqualone, A., Burja-Udrea, C., Zhao, H., & Mudura, E. (2021). An overview of the factors influencing apple cider sensory and microbial quality from raw materials to emerging processing technologies. *Processes*, 9(3), Article 502. <https://doi.org/10.3390/pr9030502>
- Caminiti, I. M., Palgan, I., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., & Lyng, J. G. (2010). The effect of ultraviolet light on microbial inactivation and quality attributes of apple juice. *Food and Bioprocess Technology*, 5(2), 680–686. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0365-x>
- Charles-Rodríguez, A. V., Nevárez-Moorillón, G. V., Zhang, Q. H., & Ortega-Rivas, E. (2007). Comparison of thermal processing and pulsed electric fields treatment in pasteurization of apple juice. *Food and Bioprocess Technology*, 85(2), 93–97. <https://doi.org/10.1205/fbp06045>
- Choudhary, R., & Bandla, S. (2012). Ultraviolet Pasteurization for the Food Industry. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, 2(1), 12–15. <https://doi.org/10.5923/j.food.20120201.03>
- Chueca, B., Ramírez, N., Arvizu-Medrano, S. M., García-Gonzalo, D., & Pagán, R. (2015). Inactivation of spoiling microorganisms in apple juice by a combination of essential oils' constituents and physical treatments. *Food Science and Technology International*, 22(5), 389–398. <https://doi.org/10.1177/1082013215606832>
- Coldea, T. E., Socaciu, C., Mudura, E., Socaci, S. A., Ranga, F., Pop, C. R., Vriesekoop, F., & Pasqualone, A. (2020). Volatile and phenolic profiles of traditional Romanian apple brandy after rapid ageing with different wood chips. *Food Chemistry*, 320, Article 126643. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126643>
- Diao, E., Chu, X., Hou, H., Dong, H., & Gao, D. (2018). Improving the safety of apple juice by UV irradiation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 2005–2011. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9815-3>
- Donahue, D. W., Canitez, N., & Bushway, A. A. (2004). UV inactivation of *E. coli* O157:H7 in apple cider: Quality,

- sensory and shelf-life analysis. *Journal of Food Processing and Preservation*, 28(5), 368–387. <https://doi.org/10.1111/J.1745-4549.2004.23062.X>
- Dong, Q., Manns, D. C., Feng, G., Yue, T., Churey, J. J., & Worobo, R. W. (2010). Reduction of patulin in apple cider by UV radiation. *Journal of Food Protection*, 73(1), 69–74. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-73.1.69>
- Dos Santos, T. P. M., Alberti, A., Judacewski P., Zielinski, A. A. F., & Nogueira, A. (2018). Effect of sulphur dioxide concentration added at different processing stages on volatile composition of ciders. *Journal of the Institute of Brewing*, 124(3), 261–268. <https://doi.org/10.1002/jib.500>
- Falguera, V., Pagan, J., Garza, S., Garvin, A., & Ibarz, A. (2012). Inactivation of polyphenol oxidase by ultraviolet irradiation: Protective effect of melanins. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 305–309. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.005>
- Fan, X., & Geveke, D. J. (2007). Furan formation in sugar solution and apple cider upon ultraviolet treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(19), 7816–7821. <https://doi.org/10.1021/jf071366z>
- Feng, S., Yi, J., Li, X., Wu, X., Zhao, Y., Ma, Y., & Bi, J. (2021). Systematic review of phenolic compounds in apple fruits: Compositions, distribution, absorption, metabolism, and processing stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(1), 7–27. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05481>
- Guiné, R. P. F., Barroca, M. J., Coldea, T. E., Bartkiene, E., & Anjos, O. (2021). Apple fermented products: an overview of technology, properties and health effects. *Processes*, 9(2), Article 223. <https://doi.org/10.3390/pr9020223>
- Han, Y., Su, Zh., & Du, J. (2023). Effects of apple storage period on the organic acids and volatiles in apple wine. *LWT – Food Science and Technology*, 173, Article 114389. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114389>
- Ioannoua, I., Hafsa, I., Hamdib, S., Charbonnela, C., & Ghoulia, M. (2012). Review of the effects of food processing and formulation on flavonol and anthocyanin behavior. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.006>
- Islam, M. S., Patras, A., Pokharel, B., Wu, Y., Vergne, M. J., Shade, L., Xiao, H., & Sasges, M. (2016). UV-C irradiation as an alternative disinfection technique: Study of its effect on polyphenols and antioxidant activity of apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.02.009>
- Juhart, J., Medic, A., Veberic, R., Hudina, M., Jakopic, J., & Stampar, F. (2022). Phytochemical composition of red-fleshed apple cultivar ‘baya marisa’ compared to traditional, white-fleshed apple cultivar ‘golden delicious’. *Horticulturae*, 8(9), Article 811. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8090811>
- Jukanti, A. (2017). Function(s)/role(s) of polyphenol oxidases. In *Polyphenol oxidases (PPOs) in plants* (pp. 73–92). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5747-2_5
- Khan, M. H., Kiran, A., Saif, H., Nadeem, M. S., & Khan, M. (2022). Effect of apple quality, yeast strains and use of antimicrobial additives on cider production with therapeutic potential. *Acta Scientific Microbiology*, 5(1), 94–103. <https://doi.org/10.31080/asmi.2022.05.0990>
- Koutchma, T. (2009). Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. *Food and Bioprocess Technology*, 2(2), 138–155. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0178-3>
- Koutchma, T., Popović, V., Ros-Polski, V., & Popielarz, A. (2016). Effects of ultraviolet light and high-pressure processing on quality and health-related constituents of fresh juice products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(5), 844–867. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12214>
- Li, J., Zhang, C., Liu, H., Liu, J., & Jiao, Z. (2020). Profiles of sugar and organic acid of fruit juices: A comparative study and implication for authentication. *Journal of Food Quality*, 2020, Article 7236534. <https://doi.org/10.1155/2020/7236534>
- Lee, H., Kim, H., Cadwallader, K. R., Feng, H., & Martin, S. E. (2013). Sonication in combination with heat and low pressure as an alternative pasteurization treatment — Effect on Escherichia coli K12 inactivation and quality of apple cider. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(4), 1131–1138. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.01.003>
- Lobo, A. P., Bedriñana, R. P., Madrera, R. R., & Valles, B. S. (2021). Aromatic, olfactometric and consumer description of sweet ciders obtained by cryo-extraction. *Food Chemistry*, 338, Article 127829. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127829>
- Mahendran, R., Ramanan, K. R., Barba, F. J., Lorenzo, J. M., López-Fernández, O., Munekata, P. E. S., Roohinejad, S., Sant’Ana, A. S., & Tiwari, B. K. (2019). Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.010>
- Mannozi, C., Fauster, T., Haas, K., Tylewicz, U., Romani, S., Rosa, M. D., & Jaeger, H. (2018). Role of thermal and electric field effects during the pre-treatment of fruit and vegetable mash by pulsed electric fields (PEF) and ohmic heating (OH). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 48, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.004>
- Müller, A., Noack, L., Greiner, R., Stahl, M. R., & Posten, C. (2014). Effect of UV-C and UV-B treatment on polyphenol oxidase activity and shelf life of apple and grape juices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 498–504. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.05.014>
- Park, Sh.-Y., Kang, T.-M., Kim, M.-J., & Kim, M.-J. (2018). Enzymatic browning reaction of apple juices prepared using a blender and a low-speed masticating household juicer. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 82(11), 2000–2006. <https://doi.org/10.1080/09168451.2018.1497943>
- Park, J.-S., & Ha, J.-W. (2019). Ultrasound treatment combined with fumaric acid for inactivating food-borne pathogens in apple juice and its mechanisms. *Food Microbiology*, 84, Article 103277. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103277>
- Pinto, T., Vilela, A., & Cosme, F. (2022). Chemical and sensory characteristics of fruit juice and fruit fermented beverages and their consumer acceptance. *Beverages*, 8(2), Article 33. <https://doi.org/10.3390/beverages8020033>

- Preti, R., & Tarola, A. M. (2021). Study of polyphenols, antioxidant capacity and minerals for the valorisation of ancient apple cultivars from Northeast Italy. *European Food Research and Technology*, 247, 273–283. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03624-7>
- Rawson, A., Patras, A., Tiwari, B. K., Koutchma, T., & Brunton, N. (2011a). Effect of thermal and non-thermal processing technologies on the bioactive content of exotic fruits and their products: Review of recent advances. *Food Research International*, 44, 1875–1887. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.053>
- Rodríguez-Bencomo, J. J., Viñas, I., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2020). Formation of patulin-glutathione conjugates induced by pulsed light: A tentative strategy for patulin degradation in apple juices. *Food Chemistry*, 315, Article 126283. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126283>
- Saeeduddin, M., Abid, M., Jabbar, S., Wu, T., Hashim, M. M., Awad, F. N., Hu, B., Lei, S., & Zeng, X. (2015). Quality assessment of pear juice under ultrasound and commercial pasteurization processing conditions. *LWT – Food Science and Technology*, 64(1), 452–458. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.005>
- Salih, F. M. (2006). Risk assessment of combined photogenotoxic effects of sunlight and food additives. *Science of The Total Environment*, 362(1–3), 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.027>
- Simonato, B., Lorenzini, M., & Zapparoli, G. (2021). Effects of post-harvest fungal infection of apples on chemical characteristics of cider. *LWT – Food Science and Technology*, 138, Article 110620. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110620>
- Tarko, T., Januszek, M., Pater, A., Sroka, P., & Duda-Chodak, A. (2020). The quality of ciders depends on the must supplementation with mineral salts. *Molecules*, 25(16), Article 3640. <https://doi.org/10.3390/molecules25163640>
- Techakanon, C., & Sirimuangmoon, C. (2020). The effect of pasteurization and shelf life on the physicochemical, microbiological, antioxidant, and sensory properties of rose apple cider during cold storage. *Beverages*, 6(3), Article 43. <https://doi.org/10.3390/beverages6030043>
- Turk, M. F., Vorobiev, E., & Baron, E. (2012). Improving apple juice expression and quality by pulsed electric field on an industrial scale. *LWT – Food Science and Technology*, 49(2), 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.024>
- Ugarte-Romero, E., Feng, H., Martin, S. E., Cadwallader, K., & Robinson, S. J. (2006). Inactivation of *Escherichia coli* with power ultrasound in apple cider. *Journal of Food Science*, 71(2), 102–108. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb08890.x>
- Vasanth Rupasinghe, H. P., & Juan, L. (2012). Emerging preservation methods for fruit juices and beverages. In Y. El-Samragy (Ed.), *Food Additive* (pp. 65–82). Rijeka: InTech. <https://doi.org/10.5772/32148>
- Vidot, K., Rivard, C., Vooren, G. V., Siret, R., & Lahaye, M. (2020). Metallic ions distribution in texture and phenolic content contrasted cider apples. *Postharvest Biology and Technology*, 160, Article 111046. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111046>
- Wandjou, J. G. N., Mevi, S., Sagratini, G., Vittori, S., Dall'Acqua, S., Caprioli, G., Lupidi, G., Mombelli, G., Arpini, S., Allegrini, P., Les, F., López, V., & Maggi, F. (2020). Antioxidant and enzyme inhibitory properties of the polyphenolic-rich extract from an ancient apple variety of Central Italy (Mela Rosa dei Monti Sibillini). *Plants*, 9(1), Article 9. <https://doi.org/10.3390/plants9010009>
- Way, M. L., Jones, J. E., Longo, R., Damberg, R. G., & Swarts, N. D. (2022). A preliminary study of yeast strain influence on chemical and sensory characteristics of apple cider. *Fermentation*, 8(9), Article 455. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090455>
- Wibowo, S., Essel, E. A., Man, S. D., Bernaert, N., Droogenbroeck, B. V., Grauwet, T., Loey, A. V., & Hendrickx, M. (2019). Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurization on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.004>
- Wicklund, T., Skottheim, E. R., & Remberg, S. F. (2020). Various Factors Affect Product Properties in Apple Cider Production. *International Journal of Food Studies*, 9, SI84–SI96. <https://doi.org/10.7455/ijfs/9.SI.2020.a7>
- Wiktor, A., Mandal, R., Singh, A., & Pratap Singh, A. (2019). Pulsed Light treatment below a Critical Fluence (3.82 J/cm²) minimizes photo-degradation and browning of a model Phenolic (Gallic Acid) Solution. *Foods*, 8(9), Article 380. <https://doi.org/10.3390/foods8090380>
- Wu, C., Li, T., Qi, J., Jiang, T., Xu, H., & Lei, H. (2020). Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity, and flavor volatiles of apple juice. *LWT – Food Science and Technology*, 122, Article 109064. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109064>
- Xu, Z., Yang, Z., Ji, J., Mou, Y., Chen, F., Xiao, Z., Liao, X., Hu, X., & Ma, L. (2023). Polyphenol mediated non-enzymatic browning and its inhibition in apple juice. *Food Chemistry*, 404, Article 134504. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134504>
- Yang, Y., Shen, H., Tian, Y., You, Z., & Guo, Y. (2019). Effect of thermal pasteurization and ultraviolet treatment on the quality parameters of not-from-concentrate apple juice from different varieties. *CyTA – Journal of Food*, 17(1), 189–198. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1569725>
- Zhao, X. Q., & Bai, F. W. (2012). Zinc and yeast stress tolerance: micronutrient plays a big role. *Journal of Biotechnology*, 158(4), 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.06.038>
- Zhao, D., Lau, E., Padilla-Zakour, O. I., & Moraru, C. I. (2017). Role of pectin and haze particles in membrane fouling during cold microfiltration of apple cider. *Journal of Food Engineering*, 200, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.12.020>

REFERENCES

- Kobelev, K. V., Volkova, T. N., Kharlamova, L. N., Lazareva, I. V., & Danilyan, A. V. (2021). Metody uskorennoogo prognozirovaniya srokov godnosti pivnykh napitkov [Methods of accelerated prediction of the shelf life of beer drinks]. *Pishchevaya promyshlennost' [Food Industry]*, (7), 82–85. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.7.7.008>
- Kovaleva, I. L., Soboleva, O. A., & Sevost'yanova, E. M. (2020). Vliyanie metodov "uskorennoogo stareniya" na sokhrannost' potrebitel'skikh svoystv bezalkogol'nykh napitkov s tsel'yu prognozirovaniya srokov godnosti [The influence of "accelerated aging" methods on the safety of consumer properties of soft drinks in order to predict shelf life]. *Pivo i napitki [Beer and Drinks]*, (2), 6–10. <https://doi.org/10.24411/2072-9650-2020-10015>
- Kuz'mina, E. I., Egorova, O. S., & Akbulatova, D. R. (2022). Sidry v Rossii i za rubezhom. Syr'e [Ciders in Russia and abroad. Raw material]. *Pishchevaya promyshlennost' [Food Industry]*, (12), 87–91. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.12.12.018>
- Makarov, S. S., Zhironov, V. M., Panasyuk, A. L., & Presnyakova, O. P. (2018). Tekhnologicheskie aspekty proizvodstva fruktovykh vin s povyshennoi biologicheskoi tsennost'yu [Technological aspects of the production of fruit wines with increased biological value]. *Pivo i napitki [Beer and Drinks]*, (2), 42–45.
- Matveeva, N. A., & Khasanov, A. R. (2016). Prognozirovaniye sroka godnosti metodom uskorennoogo testirovaniya v tekhnologii napitkov funktsional'nogo naznacheniya [Prediction of shelf life by accelerated testing in the technology of functional beverages]. *Nauchnyi zhurnal Natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta Instituta tochnoi mekhaniki i optiki. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv [Scientific Journal of the National Research University Institute of Precision Mechanics and Optics. Processes and Devices of Food Production]*, (4), 75–82.
- Panasyuk, A. L., Kuz'mina, E. I., & Egorova O. S. (2014). Izmeneniye soderzhaniya organicheskikh kislot pri proizvodstve plodovykh napitkov i vin [Changes in the content of organic acids in the production of fruit drinks and wines]. *Pivo i napitki [Beer and Drinks]*, (2), 36–38.
- Posokina, N. E., & Zakharova, A. I. (2023). Sovremennyye netermicheskie sposoby obrabotki rastitel'nogo syr'ya, primenyaemye dlya uvelicheniya ego khranimosposobnosti [Modern non-thermal methods of processing plant raw materials used to increase its storage capacity]. *Pishchevye sistemy [Food Systems]*, 6(1), 4–10. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-4-10>
- Shirshova, A. A., Ageeva, N. M., & Biryukova, S. A. (2020). Issledovaniye khimicheskogo sostava yablok razlichnykh sortov, proizrastayushchikh v khozyaistvakh Krasnodarskogo kraya [Investigation of the chemical composition of apples of various varieties growing in the farms of the Krasnodar Territory]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies]*, 82(2), 131–136. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-2-131-136>
- Akagić, A., Oras, A., Gaši, F., Meland, M., Drkenda, P., Memić S., Spaho, N., Žuljević, S. O., Jerković, I., Musić, O., & Hudina, M. (2022). A comparative study of ten pear (*pyrus communis* L.) cultivars in relation to the content of sugars, organic acids, and polyphenol compounds. *Foods*, 11(19), Article 3031. <https://doi.org/10.3390/foods11193031>
- Alberti, A., Machado dos Santos, T. P., Ferreira Zielinski, A. A., Eleuterio dos Santos, C. M., Braga, C. M., Demiate, I.M., & Nogueira, A. (2016). Impact on chemical profile in apple juice and cider made from unripe, ripe and senescent dessert varieties. *LWT – Food Science and Technology*, 65, 436–443. <https://doi.org/10.1016/j.LWT.2015.08.045>
- Arnold, M., & Gramza-Michałowska, A. (2022). Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in food science and food safety*, 21(6), 5038–5076 <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13059>
- Azhuvalappil, Z., Fan, X., Geveke, D.J., & Zhang, H.Q. (2010). Thermal and nonthermal processing of apple cider: storage quality under equivalent process conditions. *Journal of Food Quality*, 33(5), 612–631. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2010.00342.x>
- Barba, F. J., Koubaa, M., do Prado-Silva, L., Orlie, V., & Sant'Ana, A. S. (2017). Mild processing applied to the inactivation of the main foodborne bacterial pathogens: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.011>
- Başlar, M., & Ertugay, M. F. (2012). The effect of ultrasound and photosonication treatment on polyphenoloxidase (PPO) activity, total phenolic component and colour of apple juice. *International Journal of Food Science and Food Technology*, 48(4), 886–892. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12015>
- Calugar, P. C., Coldea, T. E., Salanță, L. C., Pop, C. R., Pasqualone, A., Burja-Udrea, C., Zhao, H., & Mudura, E. (2021). An overview of the factors influencing apple cider sensory and microbial quality from raw materials to emerging processing technologies. *Processes*, 9(3), Article 502. <https://doi.org/10.3390/pr9030502>
- Caminiti, I. M., Palgan, I., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., & Lyng, J. G. (2010). The effect of ultraviolet light on microbial inactivation and quality attributes of apple juice. *Food and Bioprocess Technology*, 5(2), 680–686. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0365-x>
- Charles-Rodríguez, A. V., Nevárez-Moorillón, G. V., Zhang, Q. H., & Ortega-Rivas, E. (2007). Comparison of thermal processing and pulsed electric fields treatment in pasteurization of apple juice. *Food and Bioprocess Processing*, 85(2), 93–97. <https://doi.org/10.1205/fbp06045>
- Choudhary, R., & Bandla, S. (2012). Ultraviolet Pasteurization for the Food Industry. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, 2(1), 12–15. <https://doi.org/10.5923/j.food.20120201.03>
- Chueca, B., Ramírez, N., Arvizu-Medrano, S. M., García-Gonzalo, D., & Pagán, R. (2015). Inactivation of spoiling microorganisms in apple juice by a combination of essential oils' constituents and physical treatments. *Food Science and Technology International*, 22(5), 389–398. <https://doi.org/10.1177/1082013215606832>

- Coldea, T. E., Socaciu, C., Mudura, E., Socaci, S. A., Ranga, F., Pop, C. R., Vriesekoop, F., & Pasqualone, A. (2020). Volatile and phenolic profiles of traditional Romanian apple brandy after rapid ageing with different wood chips. *Food Chemistry*, 320, Article 126643. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126643>
- Diao, E., Chu, X., Hou, H., Dong, H., & Gao, D. (2018). Improving the safety of apple juice by UV irradiation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 2005–2011. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9815-3>
- Donahue, D. W., Canitez, N., & Bushway, A. A. (2004). UV inactivation of *E. coli* O157:H7 in apple cider: Quality, sensory and shelf-life analysis. *Journal of Food Processing and Preservation*, 28(5), 368–387. <https://doi.org/10.1111/J.1745-4549.2004.23062.X>
- Dong, Q., Manns, D. C., Feng, G., Yue, T., Churey, J. J., & Worobo, R. W. (2010). Reduction of patulin in apple cider by UV radiation. *Journal of Food Protection*, 73(1), 69–74. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-73.1.69>
- Dos Santos, T. P. M., Alberti, A., Judacewski P., Zielinski, A. A. F., & Nogueira, A. (2018). Effect of sulphur dioxide concentration added at different processing stages on volatile composition of ciders. *Journal of the Institute of Brewing*, 124(3), 261–268. <https://doi.org/10.1002/jib.500>
- Falguera, V., Pagan, J., Garza, S., Garvin, A., & Ibarz, A. (2012). Inactivation of polyphenol oxidase by ultraviolet irradiation: Protective effect of melanins. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 305–309. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.005>
- Fan, X., & Geveke, D. J. (2007). Furan formation in sugar solution and apple cider upon ultraviolet treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(19), 7816–7821. <https://doi.org/10.1021/jf071366z>
- Feng, S., Yi, J., Li, X., Wu, X., Zhao, Y., Ma, Y., & Bi, J. (2021). Systematic review of phenolic compounds in apple fruits: Compositions, distribution, absorption, metabolism, and processing stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(1), 7–27. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05481>
- Guiné, R. P. F., Barroca, M. J., Coldea, T. E., Bartkiene, E., & Anjos, O. (2021). Apple fermented products: an overview of technology, properties and health effects. *Processes*, 9(2), Article 223. <https://doi.org/10.3390/pr9020223>
- Han, Y., Su, Zh., & Du, J. (2023). Effects of apple storage period on the organic acids and volatiles in apple wine. *LWT – Food Science and Technology*, 173, Article 114389. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114389>
- Ioannou, I., Hafsa, I., Hamdib, S., Charbonnel, C., & Ghoul, M. (2012). Review of the effects of food processing and formulation on flavonol and anthocyanin behavior. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.006>
- Islam, M. S., Patras, A., Pokharel, B., Wu, Y., Vergne, M. J., Shade, L., Xiao, H., & Sasges, M. (2016). UV-C irradiation as an alternative disinfection technique: Study of its effect on polyphenols and antioxidant activity of apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.02.009>
- Juhart, J., Medic, A., Veberic, R., Hudina, M., Jakopic, J., & Stampar, F. (2022). Phytochemical composition of red-fleshed apple cultivar ‘baya marisa’ compared to traditional, white-fleshed apple cultivar ‘golden delicious’. *Horticulturae*, 8(9), Article 811. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8090811>
- Jukanti, A. (2017). Function(s)/role(s) of polyphenol oxidases. In *Polyphenol oxidases (PPOs) in plants* (pp. 73–92). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5747-2_5
- Khan, M. H., Kiran, A., Saif, H., Nadeem, M. S., & Khan, M. (2022). Effect of apple quality, yeast strains and use of antimicrobial additives on cider production with therapeutic potential. *Acta Scientifica Microbiology*, 5(1), 94–103. <https://doi.org/10.31080/asmi.2022.05.0990>
- Koutchma, T. (2009). Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. *Food and Bioprocess Technology*, 2(2), 138–155. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0178-3>
- Koutchma, T., Popović, V., Ros-Polski, V., & Popielarz, A. (2016). Effects of ultraviolet light and high-pressure processing on quality and health-related constituents of fresh juice products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(5), 844–867. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12214>
- Li, J., Zhang, C., Liu, H., Liu, J., & Jiao, Z. (2020). Profiles of sugar and organic acid of fruit juices: A comparative study and implication for authentication. *Journal of Food Quality*, 2020, Article 7236534. <https://doi.org/10.1155/2020/7236534>
- Lee, H., Kim, H., Cadwallader, K. R., Feng, H., & Martin, S. E. (2013). Sonication in combination with heat and low pressure as an alternative pasteurization treatment – Effect on *Escherichia coli* K12 inactivation and quality of apple cider. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(4), 1131–1138. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.01.003>
- Lobo, A. P., Bedriñana, R. P., Madrera, R. R., & Valles, B. S. (2021). Aromatic, olfactometric and consumer description of sweet ciders obtained by cryo-extraction. *Food Chemistry*, 338, Article 127829. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127829>
- Mahendran, R., Ramanan, K. R., Barba, F. J., Lorenzo, J. M., López-Fernández, O., Munekata, P. E. S., Roohinejad, S., Sant’Ana, A. S., & Tiwari, B. K. (2019). Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.010>
- Mannozi, C., Fauster, T., Haas, K., Tylewicz, U., Romani, S., Rosa, M. D., & Jaeger, H. (2018). Role of thermal and electric field effects during the pre-treatment of fruit and vegetable mash by pulsed electric fields (PEF) and ohmic heating (OH). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 48, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.004>
- Müller, A., Noack, L., Greiner, R., Stahl, M. R., & Posten, C. (2014). Effect of UV-C and UV-B treatment on polyphenol oxidase activity and shelf life of apple and grape juices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 498–504. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.05.014>
- Park, Sh.-Y., Kang, T.-M., Kim, M.-J., & Kim, M.-J. (2018). Enzymatic browning reaction of apple juices prepared using a blender and a low-speed masticating household juicer. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 82(11), 2000–2006. <https://doi.org/10.1080/09168451.2018.1497943>

- Park, J.-S., & Ha, J.-W. (2019). Ultrasound treatment combined with fumaric acid for inactivating food-borne pathogens in apple juice and its mechanisms. *Food Microbiology*, *84*, Article 103277. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103277>
- Pinto, T., Vilela, A., & Cosme, F. (2022). Chemical and sensory characteristics of fruit juice and fruit fermented beverages and their consumer acceptance. *Beverages*, *8*(2), Article 33. <https://doi.org/10.3390/beverages8020033>
- Preti, R., & Tarola, A. M. (2021). Study of polyphenols, antioxidant capacity and minerals for the valorisation of ancient apple cultivars from Northeast Italy. *European Food Research and Technology*, *247*, 273–283. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03624-7>
- Rawson, A., Patras, A., Tiwari, B. K., Koutchma, T., & Brunton, N. (2011a). Effect of thermal and non-thermal processing technologies on the bioactive content of exotic fruits and their products: Review of recent advances. *Food Research International*, *44*, 1875–1887. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.053>
- Rodríguez-Bencomo, J. J., Viñas, I., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2020). Formation of patulin-glutathione conjugates induced by pulsed light: A tentative strategy for patulin degradation in apple juices. *Food Chemistry*, *315*, Article 126283. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126283>
- Saeeduddin, M., Abid, M., Jabbar, S., Wu, T., Hashim, M. M., Awad, F. N., Hu, B., Lei, S., & Zeng, X. (2015). Quality assessment of pear juice under ultrasound and commercial pasteurization processing conditions. *LWT – Food Science and Technology*, *64*(1), 452–458. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.005>
- Salih, F. M. (2006). Risk assessment of combined photogenotoxic effects of sunlight and food additives. *Science of The Total Environment*, *362*(1–3), 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.027>
- Simonato, B., Lorenzini, M., & Zapparoli, G. (2021). Effects of post-harvest fungal infection of apples on chemical characteristics of cider. *LWT – Food Science and Technology*, *138*, Article 110620. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110620>
- Tarko, T., Januszek, M., Pater, A., Sroka, P., & Duda-Chodak, A. (2020). The quality of ciders depends on the must supplementation with mineral salts. *Molecules*, *25*(16), Article 3640. <https://doi.org/10.3390/molecules25163640>
- Techakanon, C., & Sirimuangmoon, C. (2020). The effect of pasteurization and shelf life on the physicochemical, microbiological, antioxidant, and sensory properties of rose apple cider during cold storage. *Beverages*, *6*(3), Article 43. <https://doi.org/10.3390/beverages6030043>
- Turk, M. F., Vorobiev, E., & Baron, E. (2012). Improving apple juice expression and quality by pulsed electric field on an industrial scale. *LWT – Food Science and Technology*, *49*(2), 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.024>
- Ugarte-Romero, E., Feng, H., Martin, S. E., Cadwallader, K., & Robinson, S. J. (2006). Inactivation of *Escherichia coli* with power ultrasound in apple cider. *Journal of Food Science*, *71*(2), 102–108. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb08890.x>
- Vasantha Rupasinghe, H. P., & Juan, L. (2012). Emerging preservation methods for fruit juices and beverages. In Y. El-Samragy (Ed.). *Food Additive* (pp. 65–82). Rijeka: InTech. <https://doi.org/10.5772/32148>
- Vidot, K., Rivard, C., Vooren, G. V., Siret, R., & Lahaye, M. (2020). Metallic ions distribution in texture and phenolic content contrasted cider apples. *Postharvest Biology and Technology*, *160*, Article 111046. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111046>
- Wandjou, J. G. N., Mevi, S., Sagratini, G., Vittori, S., Dall'Acqua, S., Caprioli, G., Lupidi, G., Mombelli, G., Arpini, S., Allegrini, P., Les, F., López, V., & Maggi, F. (2020). Antioxidant and enzyme inhibitory properties of the polyphenolic-rich extract from an ancient apple variety of Central Italy (Mela Rosa dei Monti Sibillini). *Plants*, *9*(1), Article 9. <https://doi.org/10.3390/plants9010009>
- Way, M. L., Jones, J. E., Longo, R., Dambergs, R. G., & Swarts, N. D. (2022). A preliminary study of yeast strain influence on chemical and sensory characteristics of apple cider. *Fermentation*, *8*(9), Article 455. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090455>
- Wibowo, S., Essel, E. A., Man, S. D., Bernaert, N., Droogenbroeck, B. V., Grauwet, T., Loey, A. V., & Hendrickx, M. (2019). Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurization on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *54*, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.004>
- Wicklund, T., Skottheim, E. R., & Remberg, S. F. (2020). Various Factors Affect Product Properties in Apple Cider Production. *International Journal of Food Studies*, *9*, SI84–SI96. <https://doi.org/10.7455/ijfs/9.SI.2020.a7>
- Wiktor, A., Mandal, R., Singh, A., & Pratap Singh, A. (2019). Pulsed Light treatment below a Critical Fluence (3.82 J/cm²) minimizes photo-degradation and browning of a model Phenolic (Gallic Acid) Solution. *Foods*, *8*(9), Article 380. <https://doi.org/10.3390/foods8090380>
- Wu, C., Li, T., Qi, J., Jiang, T., Xu, H., & Lei, H. (2020). Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity, and flavor volatiles of apple juice. *LWT – Food Science and Technology*, *122*, Article 109064. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109064>
- Xu, Z., Yang, Z., Ji, J., Mou, Y., Chen, F., Xiao, Z., Liao, X., Hu, X., & Ma, L. (2023). Polyphenol mediated non-enzymatic browning and its inhibition in apple juice. *Food Chemistry*, *404*, Article 134504. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134504>
- Yang, Y., Shen, H., Tian, Y., You, Z., & Guo, Y. (2019). Effect of thermal pasteurization and ultraviolet treatment on the quality parameters of not-from-concentrate apple juice from different varieties. *CyTA – Journal of Food*, *17*(1), 189–198. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1569725>
- Zhao, X. Q., & Bai, F. W. (2012). Zinc and yeast stress tolerance: micronutrient plays a big role. *Journal of Biotechnology*, *158*(4), 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.06.038>
- Zhao, D., Lau, E., Padilla-Zakour, O. I., & Moraru, C. I. (2017). Role of pectin and haze particles in membrane fouling during cold microfiltration of apple cider. *Journal of Food Engineering*, *200*, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.12.020>

УДК 621.365.46 : 615.322

Процесс стерилизации лекарственного растительного сырья *Origanum vulgare* L. при помощи управляемого инфракрасного излучения

И. А. Худонов¹, Е. Г. Худонова²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

² Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежовского, п. Молодежный, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Худонов Игорь Анатольевич
E-mail: hudonogovi@mail.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Худонов, И.А., & Худонова, Е.Г. (2023). Процесс стерилизации лекарственного растительного сырья *Origanum vulgare* L. при помощи управляемого инфракрасного излучения. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 33-43. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.346>

ПОСТУПИЛА: 24.01.2023

ПРИНЯТА: 14.07.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

**АННОТАЦИЯ**

Введение: Большое значение в фармацевтическом производстве и в сельском хозяйстве имеет чистота растительного сырья. Содержание микробной чистоты сырья необходимо довести до уровня, установленного ГФ и научно-технической документацией. Обработка сырья растительного происхождения с использованием инфракрасного облучения (ИК-облучения) обладает рядом преимуществ: высокой тепловой эффективностью, быстрой скоростью обработки, эффективностью обеззараживания обсемененного материала.

Цель: определение оптимального режима ИК-облучения лекарственного сырья душицы обыкновенной до требуемых стандартов, удовлетворяющей микробиологической чистоте. Объект исследования – сырье душицы обыкновенной, загрязненное аэробными бактериями (более 10^7 – при норме не более 10^7), дрожжевыми и плесневыми грибами (более 10^5 – при норме не более 10^4), а также другими кишечными бактериями (10^4 при норме 10^2).

Материалы и методы: Исследования оптимальных режимов термообработки обсемененного сырья душицы проводили на ИК-установке по 4 параметрам: времени обработки, интенсивности ИК-облучения, температуры обработки, толщины слоя растительного сырья. Образцы сырья были подвергнуты микробиологическим и фитохимическим анализам в «Центре сертификации контроля качества лекарственных средств комитета по фармацевтической деятельности и производству лекарств администрации Иркутской области и лаборатории Иркутского государственного центра Госсанэпиднадзора».

Результаты: При термообработке сырья душицы температура на поверхности сырья должна находиться в пределах 65–75° при экспозиции 15–45 секунд, интенсивности ИК-облучения 7,5 кВт/м². Нагрев сырья до температуры 85° и выше вызывает значительное снижение содержания эфирных масел (на 76% от исходного). Оптимальная температура нагрева – 65°, при которой содержание эфирных масел соответствует требованиям, предъявляемым к качеству сырья. При плотности мощности 2,5 и 5 кВт/м² стерилизация сырья не происходит.

Выводы: Предлагаемый энергосберегающий метод стерилизации позволяет снизить уровень микробной обсемененности сырья душицы обыкновенной до норм, установленных Государственной фармакопеей и санитарно-эпидемиологическим надзором и получить сырье повышенного качества с оптимальным составом эфирных масел (от 0,25% в контроле до 0,13% после обработки).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

стерилизация, растительное сырье, микробная чистота, душица

The Process of Sterilization of Medicinal Plant Raw Materials *Origanum Vulgare L.* using Controlled Infrared Radiation

¹ Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, Russia

² Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Yezhevsky, Molodezhny settlement, Russia

Igor A. Khudonogov¹, Elena G. Khudonogova²

CORRESPONDENCE:

Igor A. Khudonogov

E-mail: hudonogovi@mail.ru

FOR CITATIONS:

Khudonogova, E.G., & Khudonogova, I.A. (2023) The process of sterilization of medicinal plant raw materials *Origanum vulgare L.* using controlled infrared radiation. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 33-43. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.346>

RECEIVED: 24.01.2023

ACCEPTED: 14.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Background: The purity of plant raw materials is of great importance in pharmaceutical production and in agriculture. The content of microbial purity of raw materials must be brought to the level established by the GF and scientific and technical documentation. Processing of raw materials of plant origin using infrared irradiation (IR irradiation) has a number of advantages: high thermal efficiency, fast processing speed, effective disinfection of the seeded material.

Purpose: The aim is to determine the optimal mode of IR irradiation of *Origanum vulgare* medicinal raw materials to the required standards, satisfying microbiological purity. The object of the study is *Origanum vulgare* raw materials contaminated with aerobic bacteria (more than 10^7 – at a rate of no more than 10^7), yeast and mold fungi (more than 10^5 – at a rate of no more than 10^4), as well as other intestinal bacteria (10^4 at a rate of 10^2).

Materials and Methods: Studies of optimal modes of heat treatment of seeded *Origanum* raw materials were carried out on an IR installation according to 4 parameters: processing time, intensity of IR irradiation, processing temperature, layer thickness of vegetable raw materials. Samples of raw materials were subjected to microbiological and phytochemical analyses at the “Center for certification of quality control of medicines of the Committee for Pharmaceutical Activity and Production of Medicines of the Irkutsk Region Administration and the laboratory of the Irkutsk State Center of Gossanepidnadzor».

Results: During the heat treatment of *Origanum* raw materials, the temperature on the surface of the raw materials should be within 65–75° with an exposure of 15–45 seconds, the intensity of IR irradiation 7.5 kW/m². Heating of raw materials to a temperature of 85° and above causes a significant decrease in the content of essential oils (by 76% of the original). The optimal heating temperature is 65°, at which the content of essential oils meets the requirements for the quality of raw materials. At a power density of 2.5 and 5 kW/m², sterilization of raw materials does not occur.

Conclusion: The proposed energy-saving sterilization method allows reducing the level of microbial contamination of *Origanum vulgare* raw materials to the standards established by the State Pharmacopoeia and sanitary-epidemiological supervision and obtaining high-quality raw materials with an optimal composition of essential oils (from 0.25% in control to 0.13% after processing).

KEYWORDS

sterilization, vegetable raw materials, microbial purity, oregano

ВВЕДЕНИЕ

Большое значение в фармацевтическом производстве и в сельском хозяйстве имеет чистота растительного сырья. Растительное сырье, в результате хранения или неправильной сушки, довольно часто подвергается микробной загрязненности. В настоящее время нет возможности охватить все виды патогенных грибов и бактерии, поэтому микробиологический контроль ограничен лишь некоторыми видами, это в первую очередь это кишечные бактерии, стафилококк, синегнойная палочка. В нестерильных лекарственных средствах не допускается наличие бактерий семейства *Enterobacteriaceae*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Staphylococcus aureus*. В 1 г (мл) лекарственного средства при приеме внутрь допускается наличие не более 1000 бактерий и 100 дрожжевых и плесневых грибов (суммарно), а для местного употребления — не более 100 микроорганизмов, в том числе и грибов¹.

Одним из ценных лекарственных растений является душица обыкновенная (*Origanum vulgare L.*) — многолетний корневищный гемикриптофит высотой 25–55 см с черешковыми яйцевидными или продолговатыми листьями и прямостоячими метельчатыми, в верхней части, стеблями. Соцветие — щитковидная метелка с зеленоватыми или фиолетовыми прицветниками. Плод — округлый орешек. В Прибайкалье и Забайкалье произрастает в освещенных лесах, по их опушкам и полянам, по суходольным и пойменным лугам, среди кустарников. С лекарственной целью заготавливают цветки и листья растения в период цветения (в июле–августе). В траве душицы содержатся эфирные масла (до 1,2%, в состав которого входят тимол, карвакрол, геранилацетат, сесквитерпены и др.), дубильные вещества, аскорбиновая кислота и др.². В медицинской практике трава душицы — отхаркивающее, тонизирующее, потогонное, болеутоляющее и противовоспалительное средство, применяется при атонии кишечника, для возбуждения аппетита и улучшения пищеварения, при бронхитах и экземах. В народной медицине растение используется в качестве мочегонного и потогонного средства, от головной боли и гипертонии, входит в состав различных сборов (ветрогонного, грудно-

го, горлового и др.), применяется также наружно в виде ванн, компрессов при ревматических и др. болях (Телятьев, 1976).

В ГФ XI издания включены 4 метода стерилизации: термический (паровой и воздушный), химический (газовый и стерилизация растворами), стерилизация фильтрованием, радиационный. Надежность стерильности растительного сырья зависит от использования минимально обсемененного исходного сырья, стерильных вспомогательных материалов и асептических условий их приготовления, от выбора упаковки, обеспечивающей сохранение стерильности, от применения метода стерилизации, неразрушающего стерилизуемое лекарственное средство и упаковку, от контроля эффективности стерилизации и надлежащего хранения стерилизованных средств, а также от транспортировки, вскрытия и использования стерильных лекарственных препаратов и материалов без реконтаминации.

Технологии переработки растительного сырья и продуктов растительного происхождения, средств механизации и пр. изучались Счисленко, Бастроном (2018), Трубилиным, Виневским (2019), Лисицыным с соавт. (2020), Рудиком с соавт. (2020). Применение инфракрасного излучения в технологии сушки растительного сырья и продуктов растительного происхождения было изложено в работах Волончука (2011); Волончук с соавт. (2017), Демидовой с соавт. (2014), Епифанова & Лукиной (2019), Завалий с соавт. (2020), Кирдяшкина с соавт. (2020), Сучкова & Алтухова (2017), Хазагаева с соавт. (2021), Худогова, Худоговой (2010), Hernandez-Vizuetе & Michtchenko (2012). Влияние инфракрасного облучения семян зерновых культур изучалась Аксеновым с соавт. (2017), Благовым с соавт. (2021).

Результаты исследований авторов свидетельствуют о том, что ИК обработка оказывает существенное влияние, по сравнению с необлученным зерном, на декстринизацию крахмала изучаемых культур и может быть использована для усовершенствования технологии производства кормовой патоки, т.к. физические и химические изменения структуры зерновки способствуют более активному воздействию на нее ферментов (Аксенов с со-

¹ Государственная фармакопея СССР XI (1990), 2(11). Общие методы анализа. Лекарственное растительное сырье (с.187–199). М.: Медицина.

² Цицин, Н. В. (Ред.). (1962). *Атлас лекарственных растений СССР*. М.: Медгиз.

авт., 2017). Исследования Благова с соавт., показали, что использование инфракрасного излучения для обработки фуражного зерна также имеет широкие перспективы применения в кормлении сельскохозяйственных животных и птицы (особенно молодняка), так как позволяет повысить его вкусовые достоинства, переваримость питательных веществ, провести полное обеззараживание от патогенной микрофлоры и уничтожение амбарных вредителей (Благов с соавт., 2021).

Переработка растительного сырья СВЧ-излучением изучалась Перфиловой (2019), УФ-излучением — Завалий с соавт. (2020), Илюхиной с соавт. (2020). В перерабатывающих отраслях промышленности, в последнее время, все более популярным становится обработка сырья растительного происхождения с использованием инфракрасного облучения (ИК-облучения). Данный способ обладает рядом преимуществ: высокой тепловой эффективностью, быстрой скоростью нагрева (Cai et al., 2011; Еремеева & Макарова, 2017; Трефилов с соавт., 2019), эффективностью обеззараживания обсемененного материала (Худоногова с соавт., 2012). Например, ИК-облучение обсемененного зерна пшеницы, загрязненное плесневыми и дрожжевыми грибами, длится всего 1,5–2,0 минуты (Волончук с соавт., 2017). Результаты работ ряда авторов показали, что обсемененное растительное сырье топинамбура, эстрагона, базилика и др. видов, после сушки ИК-излучением по всем показателям удовлетворяло требованиям СанПиН 2.3.2.560–96³. Стерилизация продуктов при ИК-облучении происходит вследствие изменения кинетики биохимических реакций под воздействием тепла и внешнего электромагнитного поля с длинами волн инфракрасного диапазона (Паньковский, 2003).

Цель данного исследования — определение оптимального режима ИК-облучения лекарственного сырья душицы обыкновенной до требуемых стандартов, удовлетворяющей микробиологической чистоте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект

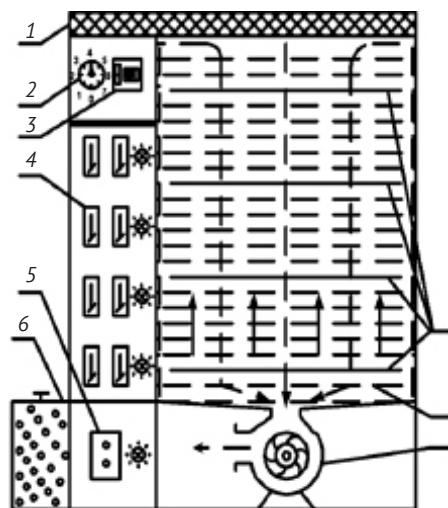
Сырье душицы обыкновенной, загрязненное аэробными бактериями (более 10^7 — при норме не более 10^7), дрожжевыми и плесневыми грибами (более 10^5 — при норме не более 10^4), а также другими кишечными бактериями (10^4 при норме 10^2). Исследования оптимальных режимов термообработки лекарственного сырья душицы проводили по 4 параметрам: времени обработки, интенсивности ИК-облучения, температуры обработки, толщины слоя растительного сырья⁴ (Khudonogova et al., 2020).

Оборудование

Экспериментальные исследования по снижению микробной обсемененности сырья душицы были проведены на ИК-установке, состоящей из облучателя, сушильной камеры, центробежного

Рисунок 1

Схема промышленной ИК-установки



Примечание: 1 — отражатель; 2 — переключатель уровней мощности; 3 — реле времени программное; 4 — пульт управления ИК облучателями; 5 — пульт управления центробежным вентилятором; 6 — регулятор уровней мощности; 7 — ИК облучатели; 8 — кассета сетчатая с сырьем; 9 — вентилятор центробежный; — поток воздуха; — направление перемещения кассет с сырьем (рисунок автора)

³ СанПиН 2.3.2.560–96. (1996). *Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов*. <https://docs.cntd.ru/document/9052436>

⁴ Гинсбург, А. С. (1976). *Технология сушки пищевых продуктов: Учебное пособие для вузов по специальности пищевой промышленности*. М.: Пищевая промышленность.

вентилятора, пульта с пусковой и измерительной аппаратурой (Рисунок 1).

В качестве источников излучения применяли силовые излучатели, ТЭНы, ламповые излучатели типа (ЗС, ИКЗ, ИКЗК, КИ и КГ), керамические излучатели, а также излучатели, изготовленные в лабораторных условиях на основе нихрома и слюдопластовых электронагревателей. В камере термообработки ИК-установки (1 × 1 м) были смонтированы 4 ИК-излучателя (мощностью до 30 кВт; производительностью по удалению влаги до 30 кг/ч). В промежутке между двумя плоскими излучателями помещалось от 1 до 5 кассет с растительным сырьем, а в камере, соответственно — от 3 до 15 и кассет и более.

Методы

Методика определения толщины слоя сырья в кассете и послойного перемещения кассеты с сырьем в зависимости от начальной влажности изложена в трудах В.Н. Карпова с позиции закона Бугера⁵. Набор аппаратуры управления позволяет регулировать уровнем мощности трехфазного ИК облучателя тремя методами: ступенчатым регулированием уровня мощности при помощи автоматических выключателей и семиступенчатого регулятора; плавным регулированием при помощи управляемых тиристоров; комбинациями ступенчатого и плавного методов.

Электроизмерительные приборы, а также электроизмерительный комплект К-505 использовали для проведения замеров напряжения тока, мощности и расхода электрической энергии. Измерение температуры нагрева растительного сырья душицы проводили хромель-копелевыми термопарами (диаметром 0,5 мм), соединенными с потенциометром ПП-01 (погрешность термопары при 23° = ±0,1%), учитывая дополнительную погрешность (±0,01% на градус показаний при отклонении от 23°). Измерение температуры нагрева излучателя проводили при помощи термопар, подключенных к по-

тенсиометру (ПП-63) в течение 1 минуты с шагом в 15 секунд, контроль осуществляли при помощи пирометра (ОППИР-09). Альбометром (с гальванометром ГСА) измеряли облученность лекарственного сырья (Худонов & Худонова, 2009).

Применительно к лекарственному сырью душицы исследовано влияние ИК-облучения на микрофлору и содержание биологически активных веществ в обрабатываемом материале⁶. Микробиологические и фитохимические анализы образцов растительного сырья душицы были выполнены в Центре сертификации контроля качества лекарственных средств комитета по фармацевтической деятельности и производству лекарств администрации Иркутской области и лаборатории Иркутского государственного центра Госсанэпиднадзора.

Анализ данных

Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли в программе «Excel 97» с учетом общепринятых методик⁷. В результате статистического анализа определили среднее значение для изучаемых показателей (температуры нагрева сырья, погрешности термопары, дополнительной погрешности, содержания эфирных масел в сырье). Статистическая обработка экспериментальных данных, микробиологические и фитохимические анализы растительных образцов позволили определить оптимальные параметры обработки материала для достижения эффекта стерилизации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс стерилизации, в первую очередь, характеризуется такими параметрами, как температура и время, именно эти параметры являются определяющими для гибели микроорганизмов. Управление ИК-облучателями с целью автоматизации и обеспечения режима облучения в эксперименте

⁵ Карпов, В. Н., & Шур, И. З. (1996). *Термодинамика оптических элементов АПК: Учебное пособие*. СПб.: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет.

⁶ Прохорова, М. И. (1982). *Методы биохимических исследований: Учебное пособие*. Л.: Изд-во ЛГУ.

⁷ Плохинский, Н. А. (1970). *Биометрия: Учебное пособие*. М.: Изд-во МГУ.

Таблица 1

Влияние параметров ИК-облучения на микробную обсемененность и содержание экстрактивных веществ в лекарственном сырье душицы обыкновенной (при толщине слоя измельченной фракции 7 мм)

№ варианта	Параметры обработки			Показатель микробной загрязненности в повторностях			Содержание эфирных масел после обработки, %
	Экспозиция, секунд	Плотность мощности, кВт/м ²	Температура нагрева, °С	1	2	3	
1	60	7,5	85 ± 1,80	–	–	–	0,06 ± 0,01
2	45	7,5	75 ± 1,60	–	–	–	0,08 ± 0,02
3	30	7,5	70 ± 0,44	–	–	–	0,10 ± 0,05
4	15	7,5	65 ± 2,30	–	–	–	0,13 ± 0,03
5	60	5	60 ± 1,00	–	+	–	0,16 ± 0,06
6	45	5	55 ± 0,15	+	+	–	0,18 ± 0,09
7	30	5	50 ± 0,90	–	+	+	0,18 ± 0,10
8	15	5	45 ± 1,06	+	+	+	0,20 ± 0,02
9	60	2,5	40 ± 1,50	+	+	+	0,21 ± 0,04
10	45	2,5	30 ± 2,00	+	+	+	0,23 ± 0,09
11	30	2,5	25 ± 0,66	+	+	+	0,24 ± 0,10
12	15	2,5	20 ± 0,53	+	+	+	0,25 ± 0,12
Контроль	0	0	0	+	+	+	0,25 ± 0,08

Примечание:

- эффект стерилизации достигнут,
- + эффект стерилизации не достигнут.

осуществляли с помощью электронных и электро-механических устройств⁸. На базе электро-механического реле времени разработаны устройства, позволяющие обеспечить заданный режим прерывного облучения, а программным регулятором температуры «Термодат 14» обеспечивалось плавное управление мощностью трехфазного ИК-облучателя. Влияние интенсивности и времени ИК-облучения на величину микробной обсемененности, качество и количество экстрактивных веществ в лекарственном растительном сырье душицы обыкновенной приведено в Таблице 1.

ИК-метод стерилизации растительного сырья подавляет микроорганизмы путем термического воздействия. За счет постоянного обновления поверхности облучения наложение вибраций на слой материала способствует равномерности обработки растительного материала. Результаты микробиологических и фитохимических анализов

образцов растительного сырья душицы представлены в Таблице 2.

Показателями качества лекарственного сырья является не только микробиологическая чистота и содержание биологически активных веществ, но и внешние признаки, например, наличие органических и минеральных примесей, влажность сырья и др. Полученные результаты анализа, свидетельствуют о том, что сырье, обработанное ИК-излучением (вариант 4) отвечает необходимым требованиям и нормативным документам.

Результаты исследований показали, что при термообработке сырья душицы обыкновенной температура на поверхности сырья должна находиться в пределах 65–75° при экспозиции 15–45 секунд, интенсивности ИК-облучения 7,5 кВт/м². Установлено, что нагрев сырья душицы до температуры 85° и выше вызывает значительно снижение содержания эфирных масел (на 76% от исходного).

⁸ Григорьева, В. А., & Зорин, В. М. (1982). *Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник*. М.: Энергоиздат.

Таблица 2

Результаты влияния ИК-облучения на качество лекарственного сырья душицы обыкновенной

Наименование показателей качества по Нормативному документу	Требования к качеству по Нормативному документу	Результаты анализа
Внешние признаки (измельченное сырье)	В соответствии с ГФ 11	Соответствует
Микроскопия	В соответствии с ГФ 11	Соответствует
Влажность	Не более 13 %	7,01 %
Почерневших и побуревших частей	Не более 7,0 %	0,52 %
Золы общей	Не более 10 %	6,19 %
Золы, не растворившейся в соляной кислоте 10 %	Не более 5 %	2,69 %
Кусочков стеблей и боковых веточек	Не более 40 %	35,2 %
Частиц, не проходящих сквозь сито с отверстиями диаметром 7 мм	Не более 10 %	Полное прохождение частиц
Частиц, не проходящих сквозь сито с отверстиями диаметром 0,5 мм	Не более 10 %	5,52 %
Органической примеси	Не более 1 %	Отсутствует
Минеральные примеси	Не более 1 %	Отсутствует
Эфирного масла	Не менее 0,08 %	0,13 %
Фасовка	±5 % (47,5–52,5 г)	49,8 %
Удельная активность Sr-90	Не более 100	1,0–12,0
Удельная активность Cs-137	Не более 400	5,4–8,0
Микробиологическая чистота:		
– аэробных бактерий	Не более 10 ⁷	6×10 ³
– дрожжевых и плесневых грибов	Не более 10 ⁴	4×10 ³
– <i>Escherichia coli</i>	Отсутствие	Отсутствует
– <i>Salmonella</i>	Отсутствие	Отсутствует
– <i>Staphylococcus aureus</i>	Отсутствие	Отсутствует
Других кишечных бактерий	Не более 10 ²	Менее 10 ²
Упаковка	В соответствии с ГФ 11	Соответствует
Маркировка	В соответствии с ГФ 11	Соответствует

Оптимальная температура нагрева сырья душицы обыкновенной — 65°, при этой температуре содержание эфирных масел снижается на допустимый уровень (48 %) и составляет 0,13 %, что соответствует требованиям, предъявляемым к качеству сырья. При плотности мощности 2,5 и 5 кВт/м² обеззараживания сырья душицы обыкновенной не происходит.

При сравнении полученных результатов с результатами работ по обеззараживанию ИК-излучением других видов лекарственных растений (чабреца, календулы, пустырника) можно сделать вывод о том, что обеззараживание сырья ИК-излучением существенно снижает уровень микробной загрязненности (Худонов & Худогова, 2009, 2012;

Khudonogova et al., 2020). Однако температуру нагрева, плотность мощности и экспозицию обработки сырья для каждого вида необходимо подбирать индивидуально, например, для стерилизации сырья пустырника и сохранения экстрактивных веществ оптимальной температурой является температура в пределах 60–80 °С при экспозиции 15–45 с и интенсивности облучения 7,5 кВт/м² (Худонов & Худогова, 2009); для сырья чабреца (тимьяна) оптимальной температурой является 55–78 °С при экспозиции 15–45 с и плотности мощности 5–7,6 кВт/м² (Худонов & Худогова, 2012); для сырья календулы лекарственной оптимальной температурой является 70–80 °С при экспозиции 30–60 с и плотности мощности 7,5 кВт/м² (Khudonogova et al., 2020).

Экспериментальные исследования показали, что ИК-метод обеззараживания лекарственного сырья оказывает термическое воздействие на микроорганизмы и подавляет их дальнейшее распространение, в большинстве случаев, при стерилизации сырья, интенсивность облучения находится в пределах $7,5 \text{ кВт/м}^2$, температура и время обработки сырья должны подбираться индивидуально в зависимости от степени зараженности и вида биологически активных веществ.

ВЫВОДЫ

Поставленная цель исследования достигнута, определены оптимальные режимы ИК-облучения лекарственного сырья на примере душицы обыкновенной до требуемых стандартов, удовлетворяющей микробиологической чистоте. Исследования оптимальных режимов термообработки лекарственного сырья душицы проводили по 4 параметрам: времени обработки, интенсивности ИК-облучения, температуры обработки, толщины слоя растительного сырья⁹. Предлагаемый энергосберегающий метод стерилизации лекарственного сырья, проведенный на ИК-установке, позволяет снизить уровень микробной обсемененности лекарственного сырья душицы обыкновенной до норм, установленных Государственной фармакопеей и санитарно-эпидемиологическим надзором и получить сырье повышенного качества с оптимальным составом эфирных масел — от 0,25% в контроле до 0,13% после обработки, что отвечает требованиям, предъявляемым к качеству сырья (согласно нормативам содержание эфирных масел в душице должно быть не менее 0,08%), при этом оптимальными параметрами обработки является экспозиция 15 секунд,

ЛИТЕРАТУРА

Аксенов, В. В., Волонук, С. К., Науменко, И. В., Веремейчик, Л. Ж., & Резепин, А. И. (2017). Влияние инфракрасного облучения на декстринизацию крахмала семян зерновых культур. В *Пища. Экология. Качество: Труды XIV международной научно-практической конференции* (с. 26–28). Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет.

интенсивность ИК-облучения — $7,5 \text{ кВт/м}^2$ и температура нагрева — 65° .

В настоящее время, подобные исследования ограничены изучением основных параметров обеззараживания загрязненного сырья, которые применимы лишь для немногих видов лекарственных растений, например душицы обыкновенной, чабреца, календулы, пустырника. Изученный метод стерилизации можно использовать для обеззараживания других видов растительного сырья, продуктов растительного происхождения и кормового назначения. Однако для установления параметров обработки, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований, касающихся конкретного вида сырья. В связи с чем, направлением дальнейших исследований является выявление оптимальных режимов обеззараживания ИК-излучением обсемененного сырья других видов ценных лекарственных растений, используемых в медицинской практике, кормовых и пищевых полезных растений.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Худоногов Игорь Анатольевич: концептуализация; методология; администрирование данных; создание черновика рукописи; создание рукописи и её редактирование; визуализация; руководство исследованием; администрирование проекта.

Худоногова Елена Геннадьевна: верификация данных; формальный анализ; проведение исследования; ресурсы; создание рукописи и её редактирование.

Благов, Д. А., Миронова, И. В., Туктаров, М. Ф., Майорова, Ж. С., Позолотина, В. А., & Тетерина, О. А. (2021). Влияние инфракрасного облучения на гигиенические характеристики и питательность зерновых кормов. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, (1), 140–144. <http://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-87-1-140-144>

⁹ Гинсбург, А. С. (1976). *Технология сушки пищевых продуктов: Учебное пособие для вузов по специальности пищевой промышленности*. М.: Пищевая промышленность.

- Волончук, С. К. (2011). Теоретическое обоснование и практическое применение инфракрасного излучения в технологии сушки растительного сырья. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*, (9–10), 116–123.
- Волончук, С. К., Аксенов, В. В., & Резепин, А. И. (2017). Исследование деструкции кукурузного крахмала инфракрасным облучением. *Современные тенденции развития науки и технологий*, (2), 64–67.
- Демидов, С. Ф., Кременевская, М. И., Вороненко, Б. А., Демидов, А. С., & Запрометов, А. А. (2014). Сушка листьев брусники инфракрасным излучением. *Научный журнал Национального исследовательского университета Института точной механики и оптики. Процессы и аппараты пищевых производств*, (2), 9–14.
- Епифанов, А. Д., & Лукина, Г. В. (2019). Обработка отходов кедрового промысла ИК-облучением. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, (10), 168–174.
- Еремеева, Н. Б., & Макарова, Н. В. (2017). ИК облучение как способ активации процессов экстрагирования антиоксидантов из растительного сырья. В *Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков: Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции* (с. 12–15). Новосибирск: Центр развития научного сотрудничества.
- Завалий, А. А., Воложанинов, С. С., Лаго, Л. А., & Рыбалко, А. С. (2020). Эффективность устройств инфракрасной сушки сельскохозяйственного растительного сырья. В *Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ 2020: Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Академика А. В. Лыкова* (с. 49–54). Симферополь: Российский государственный аграрный университет.
- Илюхина, Н. В., Колоколова, А. Ю., Тришканева, М. В., Крюкова, Е. В., Горячева, Е. Д., & Беркетова, Л. В. (2020). Исследование динамики ингибирования микрофлоры растительного сырья в результате обработки ультрафиолетовым излучением. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 117–126. <https://doi.org/10.36107/spfr.2021.194>
- Кирдяшкин, В. В., Кандроков, Р. Х., Андреева, А. А., & Щебелев, В. И. (2020). Получение высокодисперсной гречневой муки для детского питания с применением инфракрасной обработки. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 43–54. <https://doi.org/10.36107/spfr.2020.357>
- Лисицын, А. Н., Марков, В. Н., Григорьева, В. Н., Тагиев, Ш. К., & Ефимов, А. В. (2020). Изменение природной локализации масла в семенах как показатель их качества. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 8–21. <http://doi.org/10.36107/spfr.2020.369>
- Паньковский, Г. А. (2003). Микробная и химическая безопасность получения ИК-сушкой растительных продуктов. *Пищевая и перерабатывающая промышленность*, (2), 457–459.
- Перфилова, О. В. (2019). Применение СВЧ-, ИК-нагрева в технологии получения морковного порошка из выжимок. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(1), 144–148. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-144-148>
- Рудик, Ф. Я., Моргунова, Н. Л., Красникова, Е. С., Фауст, Е. А., & Семилет, Н. А. (2020). Технология и средство механизации для обработки зерна. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 137–147. <https://doi.org/10.36107/spfr.2020.211>
- Сучков, Н. С., & Алтухов, И. В. (2017). Технология получения продовольственного сырья с использованием ИК-сушки. В *Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: Материалы региональной научно-практической конференции молодых учёных* (с. 180–185). Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского.
- Счисленко, Д. М., & Бастрон, А. В. (2018). Мобильная гелиосушильная установка для сушки плодов ягодных культур. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, (6), 131–135.
- Телятьев, В. В. (1976) *Целебные клады Восточной Сибири*. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство.
- Трефилов, Р. А., Касаткина, Н. Ю., Бадретдинова, И. В., Сергеев, А. А., Корепанов, Ю. Г., Арсланов, Ф. Р., & Касаткин, В. В. (2019). Оценка режимов процесса предпосевной обработки семян инфракрасным облучением. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, (7), 1–14. <http://doi.org/10.21515/1990-4665-151-003>
- Трубилин, Е. И., & Винецкий, Е. И. (2019). Энергоемкость сушки растительного сырья: Проблемы и пути решения. *Технический оппонент*, (1), 48–53.
- Хаззагаев, О. С., Шелкунов, А. В., & Очиров, В. Д. (2021). Расчет параметров ИК-установки для сушки пищевого растительного сырья. В *Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: Материалы всероссийской научно-практической конференции* (с. 191–198). Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского.
- Худонов, И. А., & Худогова, Е. Г. (2009). Инфракрасное излучение как метод обеззараживания лекарственного растительного сырья. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*, (6), 80–84.
- Худонов, И. А., & Худогова, Е. Г. (2010). Методика и техника получения термо- и дериватографических характеристик лекарственных растений. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*, (5), 97–100.
- Худогова, Е. Г., Худонов, И. А., & Худонов, А. М. (2012). Обеззараживание лекарственного растительного сырья чабреца методом инфракрасного излучения. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, (7), 144–147.
- Cai, Y., Yu, Y., Duan, G., & Li, Y. (2011). Study on infrared-assisted extraction coupled with high performance liquid chromatography (HPLC) for determination of catechin, epicatechin and procyanidin B2 in grape seeds. *Food*

- Chemistry*, 127(4), 1872–1877. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.026>
- Hernandez-Vizuetе, M., & Michtchenko, A. (2012). Photobiostimulation effects produced by the infrared laser radiation =980 nm on the growth of the wheat seeds (*Triticum aestivum* L.). *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*, 33, 409–416.
- Khudonogova, Ye. G., Polovinkina, S. V., Sizykh, S. V., Tungrikova, V. V., Khudonogov, I. A., Rachenko, M. A., Rachenko, A. M., & Mikhlyayeva, A. A. (2020). The sanitation of herbal substances using infrared radiation as exemplified by *Calendula officinalis* L. In *Health Sciences Research: Proceedings of the International Conference* (pp. 207–211). Tomsk: Tomsk State University. <https://doi.org/10.2991/ahsr.k.201001.042>

REFERENCES

- Aksenov, V. V., Volonuk, S. K., Naumenko, I. V., Veremeichik, L. Zh., & Rezepin, A. I. (2017). Vliyanie infrakrasnogo oblucheniya na dekstrinizatsiyu krakhmala semyan zernovykh kul'tur [Effect of infrared irradiation on starch dextrinization of grain seeds]. In *Pishcha. Ekologiya. Kachestvo: Trudy XIV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [The Food. Ecology. Quality: Proceedings of the 14th International scientific and practical conference]* (pp. 26–28). Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet.
- Blagov, D. A., Mironova, I. V., Tuktarov, M. F., Maiorova, Zh. S., Pozolotina, V. A., & Teterina, O. A. (2021). Vliyanie infrakrasnogo oblucheniya na gigienicheskie kharakteristiki i pitatel'nost' zernovykh kormov [The effect of infrared irradiation on the hygienic characteristics and nutritional value of grain feed]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]*, (1), 140–144. <http://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-87-1-140-144>
- Государственная фармакопея СССР XI (1990), 2(11). Общие методы анализа. Лекарственное растительное сырье (с.187–199). М.: Медицина.
- Demidov, S. F., Kremenevskaya, M. I., Voronenko, B. A., Demidov, A. S., & Zaprometov, A. A. (2014). Sushka list'ev brusniki infrakrasnym izlucheniem [Drying of lingonberry leaves by infrared radiation]. *Nauchnyi zhurnal Natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta Instituta tochnoi mekhaniki i optiki. Protssy i apparaty pishchevykh proizvodstv [Scientific Journal of the National Research University Institute of Precision Mechanics and Optics. Processes and Devices of Food Production]*, (2), 9–14.
- Epifanov, A. D., & Lukina, G. V. (2019). Obrabotka otkhodov kedrovogo promysla IK-oblucheniem [Processing of cedar industry waste by IR irradiation]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]*, (10), 168–174.
- Eremeeva, N. B., & Makarova, N. V. (2017). IK obluchenie kak sposob aktivatsii protsessov ekstragirovaniya antioksidantov iz rastitel'nogo syr'ya [IR irradiation as a way to activate the processes of extracting antioxidants from plant raw materials]. In *Sel'skokhozyaistvennye nauki i agropromyshlennyi kompleks na rubezhe vekov: Sbornik materialov XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Agricultural sciences and agro-industrial complex at the turn of the century: The Collection of materials of the XIX International Scientific and Practical Conference]* (pp. 12–15). Novosibirsk: Tsentr razvitiya nauchnogo sotrudnichestva.
- Ilyukhina, N. V., Kolokolova, A. Yu., Trishkaneva, M. V., Kryukova, E. V., Goryacheva, E. D., & Berketova, L. V. (2020). Issledovanie dinamiki ingibirovaniya mikroflory rastitel'nogo syr'ya v rezul'tate obrabotki ul'trafioletovym izlucheniem [Investigation of the dynamics of inhibition of the microflora of plant raw materials as a result of treatment with ultraviolet radiation]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya [Storage and Processing of Farm Products]*, (1), 117–126. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.194>
- Khazagaev, O. S., Shelkunov, A. V., & Ochirov, V. D. (2021). Raschet parametrov IK-ustanovki dlya sushki pishchevogo rastitel'nogo syr'ya [Calculation of the parameters of an IR installation for drying food plant raw materials]. In *Nauchnye issledovaniya studentov v reshenii aktual'nykh problem APK: Materialy vsereossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Scientific research of students in solving urgent problems of the agro-industrial complex: Materials of the All-Russian scientific and practical conference]* (pp. 191–198). Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni A. A. Ezhevskogo.
- Khudonogov, I. A., & Khudonogova, E. G. (2009). Infrakrasnoe izluchenie kak metod obezrazhivaniya lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya [Infrared radiation as a method of disinfection of medicinal plant raw materials]. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki [Siberian Bulletin of Agricultural Science]*, (6), 80–84.
- Khudonogov, I. A., & Khudonogova, E. G. (2010). Metodika i tekhnika polucheniya termo- i derivatograficheskikh kharakteristik lekarstvennykh rastenii [Methods and techniques for obtaining thermo- and derivatographic characteristics of medicinal plants]. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki [Siberian Bulletin of Agricultural Science]*, (5), 97–100.
- Khudonogova, E. G., Khudonogov, I. A., & Khudonogov, A. M. (2012). Obezrazhivanie lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya chabretsa metodom infrakrasnogo izlucheniya [Disinfection of medicinal plant raw materials of thyme by infrared radiation]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]*, (7), 144–147.
- Kirdyashkin, V. V., Kandrov, R. Kh., Andreeva, A. A., & Shchebelev, V. I. (2020). Poluchenie vysokodispersnoi infrakrasnoi obrabotki [Obtaining highly dispersed buckwheat flour for baby food using infrared processing]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya [Storage and Processing*

- of Farm Products], (4), 43–54. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.357>
- Lisitsyn, A. N., Markov, V. N., Grigor'eva, V. N., Tagiev, Sh. K., & Efimov, A. V. (2020). Izmenenie prirodnoi lokalizatsii masla v semenakh kak pokazatel' ikh kachestva [Changes in the natural localization of oil in seeds as an indicator of their quality]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and Processing of Farm Products], (4), 8–21. <http://doi.org/10.36107/spfp.2020.369>
- Pan'kovskii, G. A. (2003). Mikrobnaya i khimicheskaya bezopasnost' polucheniya IK-sushkoi rastitel'nykh produktov [Microbial and chemical safety of obtaining plant products by IR drying]. *Pishcheyaya i pererabatyvayushchaya promyshlennost'* [Food and Processing Industry], (2), 457–459.
- Perfilova, O. V. (2019). Primenenie SVCh-, IK-nagreva v tekhnologii polucheniya morkovnogo poroshka iz vyzhimok [The use of microwave and IR heating in the technology of obtaining carrot powder from pomace]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 81(1), 144–148. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-144-148>
- Rudik, F. Ya., Morgunova, N. L., Krasnikova, E. S., Faust, E. A., & Semilet, N. A. (2020). Tekhnologiya i sredstvo mekhanizatsii dlya obrabotki zerna [Technology and means of mechanization for grain processing]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and Processing of Farm Products], (1), 137–147. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.211>
- Schislenko, D. M., & Bastron, A. V. (2018). Mobil'naya geliosushil'naya ustanova dlya sushki plodov yagodnykh kul'tur [Mobile solar drying plant for drying fruit and berry crops]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], (6), 131–135.
- Suchkov, N. S., & Altukhov, I. V. (2017). Tekhnologiya polucheniya prodovol'stvennogo syr'ya s ispol'zovaniem IK-sushki [Technology for obtaining food raw materials using IR drying]. In *Nauchnye issledovaniya i razrabotki k vnedreniyu v APK: Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh* [Research and development for implementation in the agro-industrial complex: Materials of the regional scientific and practical conference of young scientists] (pp. 180–185). Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni A. A. Ezhevskogo.
- Telyat'ev, V. V. (1976) *Tselebnye klady Vostochnoi Sibiri* [Healing Treasures of Eastern Siberia]. Irkutsk: Vostochno-Sibirskoe knizhnoe izdatel'stvo.
- Trefilov, R. A., Kasatkina, N. Yu., Badretdinova, I. V., Sergeev, A. A., Korepanov, Yu. G., Arslanov, F. R., & Kasatkin, V. V. (2019). Otsenka rezhimov protsessa predposevnoi obrabotki semyan infrakrasnym oblucheniem [Evaluation of the modes of the process of pre-sowing seed treatment by infrared irradiation]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic Online Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], (7), 1–14. <http://doi.org/10.21515/1990-4665-151-003>
- Trubilin, E. I., & Vinevskii, E. I. (2019). Energoemkost' sushki rastitel'nogo syr'ya: Problemy i puti resheniya [The energy intensity of drying vegetable raw materials: Problems and solutions]. *Tekhnicheskii opponet* [Technical Opponent], (1), 48–53.
- Volonchuk, S. K. (2011). Teoreticheskoe obosnovanie i prakticheskoe primeneniye infrakrasnogo izlucheniya v tekhnologii sushki rastitel'nogo syr'ya [Theoretical justification and practical application of infrared radiation in the technology of drying vegetable raw materials]. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* [Siberian Bulletin of Agricultural Science], (9–10), 116–123.
- Volonchuk, S. K., Aksenov, V. V., & Rezepin, A. I. (2017). Issledovanie destruktivnoi kukuruznogo krakhmala infrakrasnym oblucheniem [Investigation of the destruction of corn starch by infrared irradiation]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii* [Modern Trends in the Development of Science and Technology], (2), 64–67.
- Zavaliy, A. A., Volozhaninov, S. S., Lago, L. A., & Rybalko, A. S. (2020). Effektivnost' ustroystv infrakrasnoi sushki sel'skokhozyaistvennogo rastitel'nogo syr'ya [Efficiency of the device of infrared drying of agricultural plant raw materials]. In *Sovremennye energosberegayushchie teplovyte tekhnologii (sushka i teplovyte protsessy) SETT 2020: Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 110-letiyu so dnya rozhdeniya Akademika A. V. Lykova* [Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal processes) SET 2020: Collection of scientific papers of the VII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician A.V. Lykovo] (pp. 49–54). Simferopol': Rossiiskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet.
- Cai, Y., Yu, Y., Duan, G., & Li, Y. (2011). Study on infrared-assisted extraction coupled with high performance liquid chromatography (HPLC) for determination of catechin, epicatechin and procyanidin B2 in grape seeds. *Food Chemistry*, 127(4), 1872–1877. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.026>
- Hernandez-Vizuet, M., & Michtchenko, A. (2012). Photobiostimulation effects produced by the infrared laser radiation =980 nm on the growth of the wheat seeds (*Triticum aestivum* L.). *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*, 33, 409–416.
- Khudonogova, Ye. G., Polovinkina, S. V., Sizykh, S. V., Tungrikova, V. V., Khudonogov, I. A., Rachenko, M. A., Rachenko, A. M., & Mikhlyayeva, A. A. (2020). The sanitation of herbal substances using infrared radiation as exemplified by *Calendula officinalis* L. In *Health Sciences Research: Proceedings of the International Conference* (pp. 207–211). Tomsk: Tomsk State University. <https://doi.org/10.2991/ahsr.k.201001.042>

УДК 66.022.1.

Влияние предварительной обработки импульсным электрическим полем на процесс сушки: обзор предметного поля

ООО «БЕЛПРОСАКВА», г. Минск,
Республика Беларусь

Л. Ч. Бурак, А. Н. Сапач

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Бурак Леонид Чеславович
E-mail: leonidburak@gmail.com

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Бурак, Л.Ч., & Сапач, А.Н. (2023). Влияние предварительной обработки импульсным электрическим полем на процесс сушки: обзор предметного поля. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 44-71. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.418>

ПОСТУПИЛА: 20.03.2023

ПРИНЯТА: 14.06.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Основное влияние на качество сушеных продуктов, включая физико-химические, микробиологические, органолептические показатели и пищевую ценность, оказывает используемый технологический процесс сушки. Цель данной статьи – критический обзор результатов опубликованных научных исследований применения импульсного электрического поля, с целью обработки пищевых продуктов перед процессом сушки.

Материалы и методы: Поиск научной литературы на английском языке по вопросам влияния предварительной обработки сырья импульсным электрическим полем на процесс сушки и качество готовой сушеной продукции проводили в библиографических базах «Scopus» и «Web of Science». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2006–2023 гг. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам (показатель цитируемости выше 3). Протокол PRIZMA отражает этапы отбора источников. Результаты анализа источников представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Материалами для исследования послужили 126 статей.

Результаты: Сушка с применением предварительной обработки импульсным электрическим полем способствует сохранению физико-химических свойств высушенных продуктов, их цвета и содержащихся биологически активных соединений, а также улучшает кинетику сушки. В отличие от традиционных технологий, сушка с использованием импульсного электрического поля обеспечивает селективную дезинтеграцию клеток, не оказывая при этом отрицательного воздействия на качество продукта. Предварительная обработка импульсным электрическим полем вызывает инактивацию микроорганизмов и окислительных ферментов, что способствует максимальному сохранению качественных показателей готового продукта после сушки. Плоды и овощи, предварительно обработанные импульсным электрическим полем, обладают улучшенными качественными показателями после сушки по сравнению с теми, которые не подвергались обработке. Готовые продукты, обработанные импульсным электрическим полем перед сушкой, имели более насыщенный цвет и более высокую антиоксидантную активность, а также время процесса сушки таких продуктов значительно короче.

Выводы: Предварительная обработка импульсным электрическим полем перед сушкой способствует сокращению времени сушки, снижению энергоемкости и сохранению биологически активных соединений в готовом продукте. Материалы данной статьи могут быть использованы при проведении дальнейших научных исследований и промышленного использования данной технологии обработки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

сушка, обработка, импульсное электрическое поле, проницаемость, вакуумная сушка, сублимационная сушка, качество, эффективность, энергоемкость

Influence of Pre-Treatment by a Pulsed Electric Field on the Drying Process: Scoping Review

BELROSAKVA LLC, Minsk,
Republic of Belarus

CORRESPONDENCE:

Leonid Ch. Burak

E-mail: leonidburak@gmail.com

FOR CITATIONS:

Burak, L.C., & Sapach, A.N. (2023).

Influence of pre-treatment by a pulsed electric field on the drying process:

Scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 44-71.

<https://doi.org/10.36107/spfp.2023.418>

RECEIVED: 20.03.2023

ACCEPTED: 14.06.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



Leonid Ch. Burak, Aleksander N. Sapach

ABSTRACT

Background: The main influence on the quality of dried products, including physicochemical, microbiological, organoleptic indicators and nutritional value, is exerted by the drying process used. Recently, as a method of pre-treatment of plant materials before drying, the method of exposure to a pulsed electric field is used. The purpose of this article is to critically review the results of published scientific studies on the use of a pulsed electric field to treat foodstuffs prior to the drying process. The assessment of the action of a pulsed electric field was analyzed on the basis of the obtained physical and organoleptic indicators of dried products and drying kinetics.

Materials and Methods: The search for foreign scientific literature in English on the influence of pre-treatment of raw materials by a pulsed electric field on the drying process and the quality of finished dried products was carried out in the bibliographic databases «Scopus» and «Web of Science». The period 2006–2023 was adopted as the time frame for the review of scientific publications. When performing the work, scientific methods were used to search and screen scientific literature, extract data, analyze them, systematize and generalize. When selecting publications for review, priority was given to highly cited sources (citation index above 3). The results of the analysis were presented in the form of tables and charts for data visualization. To review the subject field of the study, an algorithm was used in accordance with the PRIZMA protocol and a scheme for conducting the study was drawn up. Materials for the study were 126 articles.

Results: A review of the scientific literature showed that drying with the use of pre-treatment with a pulsed electric field contributes to the preservation of the physico-chemical properties of dried products, their colour and contained biologically active compounds, and also improves the drying kinetics. Unlike traditional technologies, drying using a pulsed electric field provides selective disintegration of cells without adversely affecting the quality of the product. Pre-treatment with a pulsed electric field causes inactivation of microorganisms and oxidative enzymes, which contributes to the maximum preservation of the quality indicators of the finished product after drying. Fruits and vegetables pre-treated with pulsed electric have improved quality after drying compared to those that have not been processed. Finished products treated with a pulsed electric field before drying had a more saturated color and higher antioxidant activity, and the drying process time for such products is much shorter.

Conclusion: Processing with a pulsed electric field is one of the innovative technologies that can be used to improve the quality of dried products and optimize traditional drying methods. Pre-treatment with a pulsed electric field before drying helps to reduce the drying time, reduce energy consumption and preserve biologically active compounds in the finished product. The materials of this article can be used in further scientific research and industrial use of this processing technology.

KEYWORDS

drying, processing, pulsed electric field, permeability, vacuum drying, freeze drying, quality, efficiency, energy intensity

ВВЕДЕНИЕ

Обработка импульсным электрическим полем (ИЭП) — это признанная нетермическая технология, которая используется для сохранения качества продуктов за счет применения коротких импульсов в диапазоне напряженности электрического поля (Zhang et al., 2020). ИЭП имеет различные преимущества, такие как экологичность, низкое энергопотребление, экономическая эффективность и короткое время обработки при сохранении органолептических и питательных качеств пищи и продлении срока ее хранения без использования химических остатков или загрязнения окружающей среды. Следовательно, эту технологию можно применять для стерилизации, обеззараживания, размораживания и консервирования пищевых продуктов (Gavahian et al., 2020; Gómez et al., 2019). ИЭП индуцирует разницу в трансмембранном потенциале, что приводит к разрушению мембраны или локальным структурным изменениям. Когда трансмембранный потенциал превышает определенный порог, клеточная мембрана подвергается обратимой или необратимой пермеабилитации, что приводит к биохимическим и физиологическим изменениям и даже гибели клетки (Zhang et al., 2020).

Одна из стратегий, используемых для сохранения пищевых продуктов, заключается в минимизации содержания воды посредством сушки — процесса, который удаляет воду из пищевой матрицы, увеличивая срок хранения продуктов и делая их менее подверженными порче (Ghasemi et al., 2021; Mousakhani-Ganjeh et al., 2021). Сушку можно проводить при низких (например, сублимационной сушке) и повышенных температурах. Хотя сушка при низких температурах занимает больше времени, сушка при высоких температурах может ухудшить качество пищевых продуктов. В последние годы новые технологии, такие как ИЭП, начали применять в качестве предварительной обработки, чтобы сократить время сушки и максимально сохранить органолептические показатели продукта, а также повысить энергоэффективность и снизить эксплуатационные расходы. (Llavata et al., 2020). Более того, скорость тепло- и массопереноса между клетками и окружающей их средой имеет тенденцию к увеличению внутри растительной ткани, что облегчает доступ воды к поверхности и ее испарение (Kempkes & Munderville, 2018; Barba et al., 2015). Эффективность использования ИЭП в ка-

честве предварительной обработки перед сушкой оценивали с использованием многих видов сырья, таких как нарезанные пастернак и морковь (Alam et al., 2018; Wiktor et al., 2016), яблоке (Chauhan et al 2018; Lammerskitten et al., 2019; Parniakov et al., 2016), картофеле (Shorstkii et al., 2022), базилик (Telfser & Galindo, 2019), киви (Lamanauskas et al., 2015), красный перец (Won et al., 2015) и сливы (Rahaman et al., 2019). Действие ИЭП приводило к увеличению скорости распада клеток и выделению водяного пара на поверхность продукта. Это явление увеличивает диффузию, что, в свою очередь, может сократить время сушки (Ostermeier et al., 2018). В другом исследовании листья базилика были предварительно обработаны ИЭП и высушены в вакууме, в результате чего высушенные листья имели цвет и запах, похожие на свежие листья. Предварительная обработка ИЭП перед сушкой способствует сохранению многих биологически активных соединений, которые оказывают влияние на цвет, пищевую ценность и антиоксидантную активность (Wiktor et al., 2021). Комбинация ИЭП и методов сушки может использоваться для достижения максимального сохранения структуры высушенных продуктов (Telfser & Galindo, 2019).

Цель данной статьи — обзор, изучение и критический анализ результатов научных исследований о влиянии предварительной обработки ИЭП перед проведением сушки на кинетику сушки, сохранение физико-химических показателей, биологически активных соединений и пищевой ценности готовой продукции, а также на энергоемкость процесса сушки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Базы данных и временные рамки

Поиск зарубежной научной литературы на английском языке по вопросам влияния предварительной обработки сырья импульсным электрическим полем на процесс сушки и качество готовой сушеной продукции проводили в библиографических базах «Scopus», «Web of Science». Анализировались научные публикации за период 2010–2023 гг.

Критерии включения и исключения источников

Для поисковых запросов в зарубежных базах данных «Scopus», «Web of Science», были использованы следующие ключевые слова и словосочетания: processing, pulsed electric field, permeability, vacuum drying, freeze drying, quality, efficiency, energy intensity

Критерии включения:

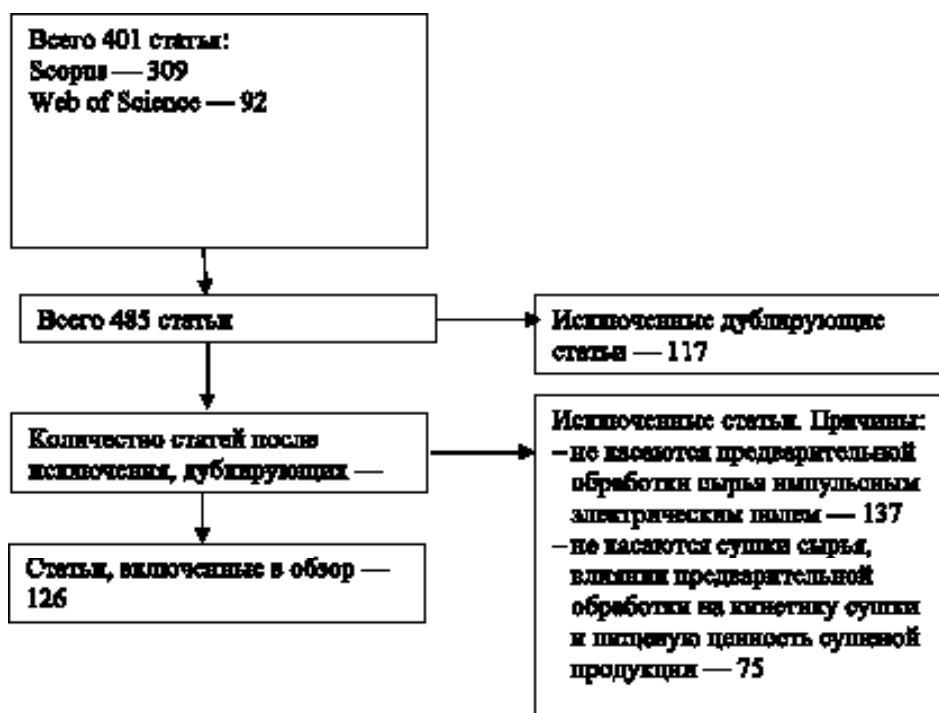
- (1) Статья написана в период 2010–2023 год.
- (2) Статья соответствует теме исследования.
- (3) Типы анализируемых статей — оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, материалы конференций, симпозиумов, краткие отчеты.

Критерии исключения:

- (1) Статья не соответствует теме данного обзора: не касаются тематики влияния предварительной обработки сырья импульсным электрическим полем на процесс сушки и изменения физико-химических и органолептических показателей сырья и готовой сушеной продукции.
- (2) Статья написана не на и английском языке.

Рисунок 1

Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA.



- (3) Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Анализ и систематизация данных

Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRISMA и составили схему проведения исследования (Рисунок 1).

Извлечение и анализ данных

Для анализа источников и поиска ответов на поставленные вопросы исследования: рассмотреть влияние предварительной обработки пищевого сырья импульсным электрическим полем на процесс сушки, а также параметров процесса сушки и изменение физико-химических показателей и пищевой ценности сушеной продукции; установить влияние предварительной обработки на скорость процесса

Таблица 1
Пример извлечения данных из статей, включенных в обзор

№	Заглавие	Автор и год	Влияние предварительной обработки ИЭП на кинетику сушки и физические свойства продукта	Основные принципы обработки ИЭП	Влияние предварительной обработки ИЭП изменение качественных показателей сушеной продукции	Преимущества и недостатки обработки ИЭП перед сушкой
1	Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot.	Alam, M. R., Lyng, J. G., Frontuto, D., Marra, F., & Cinquanta, L. (2018)	Dry carrots and parsnip slices can be used as food ingredients for further food preparations but also as healthy snacks, thanks to their health benefits. Pulsed electric field (PEF) resulted to be an effective pretreatment for carrots and parsnips before undergoing convective drying, because it reduced the drying time (up to 28% in parsnip and 21% in carrot slices) and, particularly at mild temperatures (50 to 60 °C), it did not affect the texture properties of both carrot and parsnip. PEF pretreatment of these roots before convective heating can be surely suggested as industrial application.	–	Also, PEF pretreatment influenced color changes: PEF pretreated dried carrots showed a significant ($p < .05$) reduction in lightness values (L^*) compared to untreated dried ones, although PEF pretreated parsnip had a significant ($p < .05$) increase in redness values (a^*).	–
2	Applicability of pulsed electric field (PEF) pre-treatment for a convective two-step drying process	Ostermeier, R., Pamiakov, O., Topfl, S., & Jäger, H. (2020).	It was shown that applying a PEF pre-treatment of 1.07 and 4.0 kJ/kg to whole onions prior to drying resulted in a positive change in the drying kinetics. For drying at a constant temperature of 85 °C, the BP was achieved 20 min faster. Moreover, PEF treatment resulted in a 25% faster drying process.	–	Regarding the quality of the PEF pre-treated product dried at 85/65 °C, practically no blisters were present and the pyruvic acid content was 14.5% higher in comparison to the untreated sample. Furthermore, PEF pre-treatment resulted in an enhanced rehydration behavior represented by a 47% higher RC.	–
3	Correlation of the cell disintegration index with Luikov's heat and mass transfer parameters for drying of pulsed electric field (PEF) pretreated plant materials.	Shorstkii, I., Sosnin, M., Smetana, S., Toepfl, S., Pamiakov, O., & Wiktor, A. (2022).	–	–	–	The formulation and the solution procedures were applied to simulate the simultaneous heat and mass transfer in selected vegetables subjected to the convective drying. Suggested model had a good correlation with experimental results. Moreover, cell disintegration index can be used as a controllable parameter in heat and mass transfer models to predict drying behavior of potato, onion, and carrot tissues. Obtained drying models can be used as a mathematical tool to predict drying behavior for various types of agricultural products pre-treated by pulsed electric field.

сушки, энергоемкость, преимущества и ограничения применения процесса предварительной обработки импульсным электрическим полем перед сушкой. Извлекались данные из 126 статей, соответствующих критериям включения, и вносились в Таблицу 1.

Источники были проанализированы для сравнения и анализа химического состава и качества сырья, применяемого при производстве напитков брожения из плодового сырья; влияния способов обработки и параметров окружающей среды на качество и сроки годности напитков.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные принципы предварительной обработки ИЭП и ее механизмы

Использование метода импульсного электрического поля (ИЭП) в пищевой промышленности имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами термической обработки пищевых продуктов. ИЭП использует электрическую амплитуду высокого напряжения, электрические волны высокого напряжения (обычно 10–80 кВ/см) и короткие электрические импульсы (обычно от микросекунд до миллисекунд) (Nowosad et al., 2021).

В отличие от термоэлектрических способов, таких как омический нагрев (Gavahian & Farahnaky, 2018) и другие низкотемпературные технологии, включая длительное воздействие электрического поля (Gavahian & Tiwari, 2020) и действие электростатического поля высокого напряжения (Nguyen et al., 2021) действие ИЭП не вызывает значительного увеличения температуры, поэтому данная обработка не является термической. Обработка ИЭП включает в себя подачу высоковольтных (от 100–300 В/см до 20–80 кВ/см) и коротких электрических импульсов (<1 с) на продукт в жидком или твердом состоянии, который находится между двумя электродами. Основные элементы установки ИЭП включают камеру обработки, генератор высоковольтных импульсов, устройства управления и контроля. Генератор импульсов вырабатывает высоковольтные импульсы, которые направляются на два электрода внутри этой камеры, между которыми помещается образец.

ИЭП улучшает электрическую проницаемость и проводимость клеточной мембраны. Действие электрического поля на клетку происходит в течение нескольких сотен микросекунд, что вызывает процесс электропорации, т. е. создание пор в мембране, что может вызывать разрыв ткани. Пористость является динамическим свойством продукта, поэтому эффекты электропорации могут быть обратимыми или необратимыми. Электрический пробой является обратимым, когда индуцированные отверстия малы по сравнению с площадью поверхности мембраны и вызваны низкоинтенсивной обработкой ИЭП (Vaessen et al., 2019).

Увеличение напряженности ИЭП и продолжительности обработки приводит к образованию крупных пор, а затем к необратимому разрыву мембраны, что приводит к гибели клеток (Nowosad et al., 2021; Chen et al., 2022a; Chen et al., 2022b). Необратимая пермеабиллизация мембран растительных клеток может применяться в самых разных областях. Обработка ИЭП способствует сохранению физико-химических и органолептических показателей жидких пищевых продуктов и увеличению срока годности, без изменения их пищевой ценности.

На эффективность электропроницаемости мембран влияют различные параметры, в том числе напряженность электрического поля, состав мембраны, параметры импульса (такие как число импульсов, продолжительность, амплитуда и частота повторения), конфигурация камеры обработки, окружающая среда и тип клеток. форма и размер (Saletnik et al., 2022; Dalvi-Isfahan et al., 2016; Dellaros et al., 2016; Demir et al., 2018; Devkota et al., 2022). Использование ИЭП по обработке пищевых продуктов широко изучается, так как действие ИЭП способно вызывать инактивацию микроорганизмов, улучшать массоперенос, не вызывая при этом изменение состава биологически активных соединений продукта.

При комнатной или температуре (20–50°C) напряженность электрического поля 300–1000 В/см и длительность импульса 100–1000 мкс позволяют относительно эффективно воздействовать на растительную ткань. Использование ИЭП в процессах экстракции является наиболее эффективной, по сравнению с другими методами, так как способствует максимальному извлечению экстраги-

рующих веществ (Kempkes & Munderville, 2018; Dhua et al., 2022; El Kantar et al., 2018; Fauster et al., 2018; Ferreira-Holderbaum et al., 2010; Gamboa-Santos et al., 2014).

Эффективность действия ИЭП по инактивации ферментов во многом зависит от типа фермента и условий проведения обработки. Структурные, конформационные и функциональные изменения ферментов под действием внешних электрических полей приводят к образованию свободных радикалов, вызывающих агрегацию и разворачивание белков за счет поглощения энергии полярными группами белков (Han et al., 2018).

Влияние предварительной обработки ИЭП перед сушкой на качество продуктов

В промышленных масштабах сушку растительного сырья осуществляют различными способами сушки, включая сушку горячим воздухом, вакуумом, замораживанием и распылением, а также осмотическую дегидратацию (Tomasí et al., 2021; Gavahian et al., 2018; Guionet et al., 2021; Guionet et al., 2015; Heinz & Toerfl, 2022). В определенных условиях использования каждый метод имеет свои преимущества. Конвективная сушка или сушка горячим воздухом является наиболее часто ис-

пользуемым методом удаления влаги. На кинетику сушки горячим воздухом влияют температура, воздушный поток объем загрузки продукта. Более высокие температуры обычно увеличивают скорость сушки. Однако максимальная температура ограничена термочувствительностью материала, поскольку высокая температура может ухудшить биоактивные питательные вещества и качество продукта. При вакуумной сушке вода испаряется при низких температурах и низком атмосферном давлении (<101,330 кПа). Сушка вымораживанием или лиофилизацией позволяют получить высококачественный конечный продукт, поскольку процесс проводится при низкой температуре и незначительному присутствию кислорода воздуха.

Все методы сушки имеют общую способность изменять физические и химические свойства продукта, причем не всегда положительным образом. С целью обеспечения высокого качества продукта использование современных технологий, таких как обработка ИЭП представляет интерес как для научного сообщества, так и для предприятий пищевой промышленности (Lammerskitten et al., 2020; Al-Sayed et al., 2018; Hill et al., 2022; Huang et al., 2020; Iaccheri et al., 2021; Iaccheri et al., 2021b; Jacobo-Velázquez et al., 2017; Jacobo-Velázquez et al., 2011). Несколько исследований на фруктах и овощах продемонстрировали способность ИЭП

Таблица 2

Обзор результатов предварительной обработки ИЭП продуктов растительного происхождения перед сушкой

Способ сушки	Параметры качества	Параметры обработки ИЭП	Обрабатываемое сырье	Полученные результаты	Источник
Сушка горячим воздухом	Физические свойства	20 кВ/см, 1000 импульсов, 65,2 кДж/кг, 20 мкс	Морковь	Образец с предварительной обработкой ИЭП привел к уменьшению легкости по сравнению с необработанным. Предварительная обработка ИЭП не оказывала влияние на структуру при температурах (50–60 °C), но оно возрастало при температуре образца 70 °C.	Alam et al., 2018
		20 кВ/см, 20 мкс, 1,0 Гц	Гриб шиитаке	Высушенные (65 °C) грибы шиитаке, обработанные ИЭП, имели более высокое общее содержание фенолов (193,32 мкг/мкл), чем сушеные грибы без обработки ИЭП (161,76 мкг/мкл).	Liet al., 2021
		2 кВ/см, 2 мс, 200 импульсов, 2,5 кДж/кг	Черника	Предварительная обработка ИЭП перед сушкой горячим воздухом (45–75 °C) улучшила сохранение концентрации витамина С в чернике. Сохранение витамина С было выше в образцах, обработанных ИЭП (18–21 %), чем в необработанных (16–19 %).	Yu et al., 2017

Продолжение Таблицы 2

Способ сушки	Параметры качества	Параметры обработки ИЭП	Обрабатываемое сырье	Полученные результаты	Источник
	Эффективность сушки	1–2 кВ/см, 25–75 импульсов	Яблоко	Предварительная обработка ИЭП ускоряет высушивание по сравнению с необработанными образцами. Более длительный ИЭП и более высокие температуры сушки ускоряют распад клеток и скорость сушки. На вход энергии ИЭП влияли сила и количество импульсов, а не температура.	Chauhan et al., 2018
		325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Листья базилика	При использовании ИЭП в качестве предварительной обработки время сушки сократилось на 57% (с 23,5 до 10,8 ч при температуре сушки 40 °С).	Telfser & Galindo, 2019
		40 мкс, 1 кВ/см, 0,25–10 кДж/кг	Картофель	Предварительная обработка сократила время сушки на 6,9–20% (с 483 до 380–450 мин). Безразмерный коэффициент влажности уменьшался с увеличением числа импульсов.	Shorstkii et al., 2022
Вакуумная сушка	Физические свойства	325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Листья базилика	Обработанные ИЭП, высушенные в вакууме листья лучше сохраняют железистые трихомы, чем необработанные. Высушенные в вакууме образцы, обработанные ИЭП, имели более свежий цвет (85,7%), чем необработанные образцы (14,3%).	Telfser & Galindo, 2019
		0,6 кВ/см, 10 импульсов, 100 мкс	Морковь	Применение обработки ИЭП приводило к меньшим изменениям окраски (ΔE) при всех исследованных температурах сушки от 25 до 90 °С по сравнению с необработанными образцами.	Liu et al., 2020
	Питательные свойства	0,6 кВ/см, 10 импульсов, 100 мкс	Морковь	Образцы, обработанные ИЭП и высушенные в вакууме при 25–90 °С, содержали на 24–33 мг/100 г сухого вещества больше β -каротина, чем необработанные образцы. Больше β -каротина разлагается при более высоких температурах сушки.	Liu et al., 2020
		2 кВ/см, 2 мс, 200 импульсов, 2,5 кДж/кг	Черника	Предварительная обработка ИЭП перед вакуумной сушкой (45–75 °С) улучшала концентрацию витамина С в чернике. Сохранение витамина С было выше в образцах, обработанных ИЭП (19–46%), чем в необработанных (16–43%).	Liu et al., 2017
	Эффективность сушки	325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Листья базилика	При использовании ИЭП в качестве предварительной обработки время сушки сократилось на 33% (с 15 до 10 часов).	Telfser & Galindo, 2019
		600 В/см, 100 импульсов, 100 мкс	Картофель	Предварительная обработка ИЭП сократила время вакуумной сушки на 22–27% при 40–70 °С по сравнению с необработанным материалом. Предварительная обработка ИЭП показала, что при низких температурах внутри образцов испаряется больше свободной воды на 18–27 °С.	Liu et al., 2018

Способ сушки	Параметры качества	Параметры обработки ИЭП	Обрабатываемое сырье	Полученные результаты	Источник
Сублимационная сушка	Физические свойства	325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Листья базилика	Как необработанные, так и обработанные ИЭП лиофилизированные листья имеют поврежденную поверхность трихом. Образцы, обработанные ИЭП, сохраняли менее свежий цвет (14,3 %), чем необработанные (57,2 %).	Telfser & Galindo, 2019
		400 В/см, 100 мкс	Клубника	Твердость клубники снижается после обработки ИЭП в течение 0,096 с. Упругость и когезивность предварительно обработанных образцов увеличиваются по сравнению с интактными образцами, и этот рост продолжается со временем обработки ИЭП.	Al-Sayed et al., 2018
	Питательные свойства	1,07 кВ/см, 0,5–5 кДж/кг	Яблоко	Образец, обработанный ИЭП, сохранил общее содержание фенолов, более высокое потребление энергии, более высокое содержание фенолов (47 % по сравнению с необработанным), но более низкую антиоксидантную активность (DPPH 53 % и ABTS 60 %).	Lammerskiten, Mykhailyk, et al., 2019
Эффективность сушки		325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Яблоко	При использовании ИЭП в качестве предварительной обработки время сушки сократилось на 57 % (с 12 до 9 часов).	Lammerskiten, Mykhailyk, et al., 2019
		1,07 кВ/см, 2 Гц	Яблоко	Образцы, обработанные ИЭП показали снижение остаточной влажности на 82 %. Предварительная обработка ИЭП сократила время лиофилизации с 8 до 5 часов.	Lammerskiten, Mykhailyk, et al., 2019
		90 мкс, 1–2 кВ/см, 10–60 импульсов, 0,026 кДж/г	Яблоко	Предварительная обработка ИЭП сократила время сушки на 17,7 % и потребление энергии на 24,7 %, а также увеличила коэффициент регидратации на 65,22 %. Меньшая напряженность электрического поля привела к более высокой эффективности.	Wu & Zhang, 2019

сократить время обработки за счет увеличения скорости сушки и сокращения времени сушки, как показано в Таблице 2. Электропорация ИЭП может улучшить проницаемость клеточных мембран растительных клеток, что приводит к увеличению перемещения содержимого из клеток. ИЭП также может увеличить удаление влаги из тканей растений, обезвоженных при более высокой скорости высыхания. Использование ИЭП в качестве предварительной обработки во время обезвоживания растительного сырья было изучено для различных продуктов.

Физические свойства

Растительная ткань

Обработка ИЭП может оказывать влияние на структуру пищевого продукта (Zhang et al., 2019). В результате умеренного воздействия импульсного электрического поля некоторые клетки теряют свою проницаемость, но, если действие прекращается в течение нескольких секунд, клеточные мембраны могут повторно восстанавливать нарушенную проницаемость. Обработка электрическим полем (1000 В/см) увеличила пористость

ткани яблока на 5 %, а образовавшиеся поры были меньше, чем поры в необработанных образцах яблок. Парняков и др. (2016) сообщили, что яблоки, предварительно обработанные ИЭП перед вакуумной сублимационной сушкой, помогают сохранить форму после сушки, предотвращают усадку и увеличивают поры в тканях по сравнению с яблоками, не обработанными ИЭП. Индекс дезинтеграции Z (значение Z) используется для описания распада клеток и измерения влияния электрического поля на пищевые ингредиенты. Значение индекса дезинтеграции (Z) оказывает значительное влияние на регидратационную способность. Высокая регидратационная способность установлена при $Z = 0,96$. Кроме того, электропорированные образцы имели крупные поры. Воздействие ИЭП на яблоки ($W = 0,5-1$ кДж/кг, $E = 1,07$ кВ/см) выявило большие поры и высокую пористость по сухому веществу (СВ). Это подтверждает сохранение макроформ после предварительной обработки ИЭП (Lammerskitten, Wiktor, et al., 2019; Arshad et al., 2020; Arshad et al., 2021). Результаты других исследований также показывают, что действие ИЭП увеличило размер пор на ≈ 86 и регидратационную способность на $\approx 1,3$.

Лиофилизированные образцы обработанные ИЭП в основном характеризуются сублимацией, тогда как образцы без сушки вымораживанием и обработкой ИЭП контролировались испарением. Таким образом, удержание жидкости способствует сохранению исходной структуры, и как следствие, к минимальной потере объема. Процесс сублимационной сушки с использованием низких температур увеличивает усадку сырья, так как требует длительного времени воздействия. Проведенный анализ результатов научных исследований позволяет сделать вывод, что предварительная обработка ИЭП сырья перед сушкой значительно снижает негативное воздействие и способствует сохранению качественных показателей сушеного продукта (Lammerskitten et al., 2019a; Neri et al., 2021; Jin et al., 2017; Kandušer et al., 2017; Kumar et al., 2021; Kwao et al., 2016; Lasekan et al., 2017; López-Gámez et al., 2020; Lung et al., 2022).

Распад клеток

Индекс распада клеток (ИРК), степень повреждения ткани, является важным показателем в исследованиях сушки и используется для оценки степе-

ни разрушения клеток. Значения ИРК варьируется от 0 для неповрежденной ткани до 1 для сильно поврежденной ткани. Более высокая дезинтеграция клеток указывает на большее количество отверстий в клеточных стенках растительной ткани, что позволяет большему количеству молекул воды проходить через клеточную стенку. Действие ИЭП способствует дезинтеграции клеточного материала, ускоряет перенос массы и тепла из матрицы целевого соединения, обеспечивая эффективность, диффузию или экстракцию прессованием растворителем, наряду с замораживанием, сушкой вымораживанием, осмотической дегидратацией и сушкой.

Эффективность предварительной обработки ИЭП зависит от вида сырья и его характеристик. Сырая морковь имеет двумерную анизотропную анатомическую характеристику за счет удлинения клеток в направлении роста; прежде всего, в коре идентифицируется наружная область, тогда как внутренняя сосудистая ткань образована стелой. После сушки эта анизотропия в определенной степени сохраняется (Alam et al., 2018). Подобно клеткам моркови, клетки пастернака маленькие и круглые, диаметром около 100 мкм. Влияние предварительной обработки ИЭП на уровень разрушения клеток было проанализировано с помощью ИРК: образцы моркови показали значительный рост ИРК и установились на уровне около 0,8 примерно через 20 мс и 1000 импульсов, что указывает на высокую степень повреждения ткани. Между тем, ИРК для пастернака был выше, приближаясь к 1 за 200 мс и 10 000 импульсов. Разница в эффективности электропорации между морковью и пастернаком была связана со структурными различиями между двумя корнями, поскольку пастернак имеет более высокое содержание нерастворимой клетчатки, что затрудняет его разрушение.

На значение Z для каждого образца влияют различия в характеристиках импульса. Предварительная обработка ИЭП для сушки лука горячим воздухом была эффективна при напряженности электрического поля до 1,07 кВ/см. Увеличение ИРК привело к увеличению Z до 0,6, поэтому больше влаги могло быть перенесено изнутри наружу клетки (Ostermeier et al., 2018). Напротив, при удельной энергии 3 кДж/кг и напряженности электрического поля 1,0 кВ/см значения Z для моркови, лука и картофеля составляли $0,65 \pm 0,1$, $0,72 \pm 0,09$ и $0,83 \pm 0,08$. соответственно.

При исследовании высушенных листьев базилика (*Ocimum basilicum* L.) обработка ИЭП могла поддерживать жизнеспособность клеток в тканях. Однако при увеличении ширины импульса и количества импульсов (400 мкм и 990 импульсов) жизнеспособность клеток терялась из-за необратимого повреждения клеток (необратимая пермеабиллизация). Установлено, что необратимое открытие замыкающих клеток в результате обработки ИЭП может сократить время сушки базилика на 37% при температуре сушки 50 °С, в то время как Telfser и Galindo (2019) наблюдали сокращение времени на 57% при температуре сушки 40 °С в процессе сушки базилика на том же устройстве.

Цвет

Цвет — это критерий оценки свойств сушеных пищевых продуктов, оказывающий значительное влияние на восприятие потребителя. Применение ИЭП при сушке моркови с использованием вакуумной сушилки привело к значительным различиям в цвете. Образец, высушенный при 90 °С, имел наиболее значительное изменение цвета (ΔE) по сравнению с сушкой при более низких температурах (25, 50 и 75 °С), а образцы обработанные ИЭП имели более низкую ΔE по сравнению с образцами без применения ИЭП (Liu et al., 2020). Реакции потемнения (как ферментативные, так и неферментативные, реакция Майяра) при более высоких температурах сушки могли быть причиной различий в цвете Каротиноиды окисляются при длительном воздействии воздуха и высоких температур. Значение * показывает степень красного/зеленого цвета и зависит от ферментативной реакции потемнения (Lammerskitten et al., 2019b).

Кроме того, ИЭП может сократить время сушки, тем самым сводя к минимуму обесцвечивание. В цветовом диапазоне значения L сушеная морковь, обработанная ИЭП, имела более низкое снижение значения L по сравнению с необработанной сушеной морковью. Электропорация под действием ИЭП увеличивает секрецию внутриклеточного содержимого, такого как каротиноиды (Alam et al., 2018). При сушке листьев базилика на воздухе образцы с обработкой ИЭП и без нее не показали существенной разницы в цвете. Между тем, высушенные в вакууме и замороженные листья базилика, обработанные ИЭП, имели значительно большее изменение цвета. Такое изменение цвета может быть связано

с распадом хлорофилла. Обычная сушка на воздухе вызывает изменение цвета листьев на желтый; это происходит потому, что хлорофилл более чувствителен к теплу. На это указывает сдвиг значения оттенка (Δh), что способствует более желтому цвету (Telfser & Galindo, 2019).

Лиофилизированные яблоки, подвергнутые предварительной обработке ИЭП, показали значительно разные значения светлоты ($p < 0,05$) в образцах с большей удельной теплотой (1 кДж/кг). На большее значение легкости влияет большая пористость продукта. Кроме того, образцы с обработкой ИЭП имеют более быструю ферментативную реакцию потемнения, чем образцы без нее. Однако во время сушки вымораживанием реакцию потемнения можно подавить, поскольку в сушильной камере мало кислорода и низкая температура, связанная с перепадом давления (Lammerskitten et al., 2019a). Различие в цвете тканей сушеных яблок, особенно с предварительной обработкой ИЭП, связано с изменением общего содержания фенольных соединений. Обработка ИЭП и полифенолоксидаза вызывают окрашивание (потемнение), особенно при повреждении структуры ткани яблока. В другом исследовании осмо-дегидратированной клюквы, подвергнутой бланшированию с последующей обработкой ультразвуком и ИЭП, сочетание бланширования с ультразвуком и ИЭП привело к лучшему сохранению цвета и более высокой антиоксидантной активности, чем только бланшированные образцы (Nowacka et al., 2019). Когда свежие срезы обрабатывали ИЭП, на проницаемость клеток влияла электропорация, которая изменяла структуру ткани и процесс массопереноса. Кроме того, содержание сахара в образцах, обработанных ИЭП, значительно снизилось, что привело к ингибированию реакции Майяра и снижению образования акриламида (Li et al., 2020).

Регидратационная способность

В результате научных исследований было установлено, что предварительная обработка ИЭП и сушка влияют на регидратационную способность листьев базилика, поскольку обработка ИЭП приводит к более быстрому поглощению воды. Однако существенной разницы в регидратационной способности между контрольными образцами и образцами, обработанными ИЭП после вакуумной сушки, не наблюдалось. Способность к регидратации связана

со степенью структурного коллапса, при котором вакуумная сушка вызывает сохранение структуры и высокую пористость тканей, что обеспечивает большую способность к регидратации, чем сушка на воздухе (Telfser & Galindo, 2019; Wiktor et al., 2013; Yamakage et al., 2021; Zderic & Zondervan, 2016; Zderic et al., 2013; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2012).

Применение предварительной обработки ИЭП на лиофилизированной яблочной ткани показало лучшие свойства регидратации, чем у образцов без предварительной обработки, где образец обработанный ИЭП более пористый, чем необработанный материал. Кроме того, низкая температура сушки позволяет избежать реакций карамелизации простых сахаров; вместо этого они хорошо растворяются в воде и не играют никакой роли при регидратации. Образцы сушеных яблок с предварительной обработкой ИЭП также имели более твердую текстуру, чем образцы без предварительной обработки после 1 месяца хранения (Lammerskitten et al., 2019a).

Механические свойства

Предварительная обработка ИЭП может повлиять на текстуру тканей сухих продуктов. Исследование образцов сушеной моркови показало более низкое значение деформации (30%) в образце, обработанном ИЭП при 100 импульсах при 5 кВ/см (410,6 Н), чем в образце без предварительной обработки (689,2 Н). Предварительная обработка ИЭП может сделать материал более чувствительным к сжатию из-за внутреннего разрушения конструкции, что облегчит уплотнение разрушенного материала при том же смещении. Это также может быть связано с повышенной экспрессией сока клеточных материалов после применения ИЭП, что может способствовать сжатию (Wiktor et al., 2018). Сушка моркови и пастернака с предварительной обработкой ИЭП не оказала заметного влияния на параметры напряжения сдвига. Яблоки, подвергнутые предварительной обработке ИЭП и сублимационной сушке, имели меньшее значение механического дескриптора (7,5–9,5 Н), чем яблоки без предварительной обработки ИЭП (20,6 Н). Твердость яблока была снижена на 53,8–63,1% за счет обработки ИЭП перед сушкой вымораживанием. Обработка ИЭП может изменить физические свойства, такие как упругость, вязкость и активность воды растительных продуктов.

Пищевая ценность

β-каротин

В одном исследовании обработка ИЭП перед вакуумной сушкой моркови (207 мг/100 г сухого вещества) способствовала сохранению большего количества β-каротина, чем без обработки ИЭП (170 мг/100 г сухого вещества). Это различие было вызвано увеличением внутриклеточного высвобождения β-каротина под действием ИЭП. Кроме того, как с обработкой ИЭП, так и без нее, сушка приводила к значительному снижению содержания β-каротина по сравнению с тем, что было до сушки. При сушке с температурой 90 °C морковь, обработанная ИЭП содержала 155 мг/100 г сухого вещества β-каротина, а морковь без обработки — только 131 мг/100 г сухого вещества. Такая же тенденция наблюдалась при температурах сушки 25, 50 и 75 °C. Однако сушка при 90 °C привела к наибольшей деградации β-каротина, 25%, и только 17,8% деградации при температуре сушки 25 °C. Это было связано с ускоренным окислением пигмента при высоких температурах сушки. Образцам моркови, подвергнутым обработке ИЭП, требовалось на 33–55% меньше времени сушки с минимальным разложением β-каротина по сравнению с образцами без обработки ИЭП. Установлено, что предварительная обработка ИЭП способствует снижению разложения β-каротина, так как после обработки время сушки значительно меньше чем без предварительной обработки (Liu et al., 2020).

При исследовании сушеного манго, подвергнутого предварительной обработке ИЭП с последующей сушкой в вакууме или горячим воздухом, общее содержание каротиноидов в образце обработанным ИЭП было выше, чем в контрольном образце, а именно 50,8 мг/100 г сухого вещества для вакуумной сушки и 57,5 мг./100 г СВ при сушке горячим воздухом, в то время как в образцах без предварительной обработки сохранялось только 21 мг/100 г СВ при вакуумной сушке и 47,0 мг/100 г сухого вещества при сушке горячим воздухом (Lammerskitten et al., 2020). В другом исследовании влияния комбинации ИЭП и ультразвуковой обработки на сушку клюквы содержание антоцианов в образцах, обработанных ИЭП и ультразвуком, было меньше, чем в образцах, подвергнутых бланшированию; это было связано с большей дезинтеграцией материала и большим выщелачиванием полярных сое-

динений. Кроме того, образование радикалов ОН из-за ИЭП и предварительной обработки ультразвуком могло снизить содержание антоцианов в осмодегидратированной клюкве (Nowaska et al., 2019). Подобно исследованию высушенных распылением порошков, полученных из сока красного болгарского перца, обработанного ИЭП, использование ИЭП при 3 кДж/кг способствовало более высокому общему содержанию каротиноидов, чем ИЭП при 1 кДж/кг (620 и 605 мг β -каротина/100 мг). г ДМ соответственно). Высокое удержание при применении ИЭП в дозе 3 кДж/кг может быть связано с тем, что сок, полученный из материала, обработанного ИЭП, содержит более высокую долю этого соединения (Rybak et al., 2020).

Общее количество фенольных соединений

При исследовании сушеных яблок, предварительно обработанных ИЭП дозой 0,5–1 кДж/кг, общее содержание фенолов было на 47,3% выше, чем в яблоках без предварительной обработки ИЭП. Это происходит в результате индуцированной ИЭП образования новых соединений, которые можно обнаружить с помощью метода Фолина-Чокальтеу. Кроме того, на основе анализа антиоксидантной активности сушеных яблок, предварительно обработанных ИЭП, было отмечено снижение DPPH на 52,7% и ABTS на 60,0% по сравнению с яблоками без предварительной обработки ИЭП, что связано с просачиванием биоактивных компонентов в среду во время обработки. Несмотря на эти результаты, не наблюдалось существенной связи между общим содержанием фенолов в анализах ABTS или DPPH (Lammerskitten et al., 2019b). Вероятно, это связано с тем, что реагент Фолина-Чокальтеу не является селективным и может взаимодействовать с другими молекулами, содержащими гидроксильную группу, такими как аскорбиновая кислота, восстанавливающие сахара и продукты ферментативного потемнения (Wiktor et al., 2015). Исследование сушеного манго показало, что в образцах, предварительно обработанных ИЭП содержалось 184,2 мг эквивалента хлорогеновой кислоты (САЕ)/100 г сухого вещества, что было выше, чем у сушеного манго без обработки ИЭП, в диапазоне 120,7–165,2. мг САЕ/100 г ДМ, демонстрируя удержание 70% фенольных соединений после предварительной обработки ИЭП (Lammerskitten et al., 2020).

Витамин С

Согласно литературным данным, с увеличением температуры и времени сушки содержание витамина С в различных видах фруктов снижается (Bozkir, 2020). Результаты исследования авторов Mannozi et al. (2020), показывают, что содержание витамина С увеличивается с повышением температуры сушки, это может быть связано с более короткой продолжительностью обработки при максимальной температуре.

Этапы низкотемпературной обработки, такие как те, которые использовались в контрольном образце или те, которые использовали предварительную обработку, помогли сохранить концентрацию витамина С и некоторых других компонентов. ИЭП изменяет структуру витамина С, способствуя превращению изомера витамина С из его енольной формы в кето-форму. Кроме того, ИЭП не вызывало разрушения витамина С или медленной окислительной деградации, но улучшало антиоксидантную активность витамина С, образцов, обработанных ИЭП. Данные были получены Yu et al. (2017), где концентрация витамина С и других соединений, таких как антоцианы и общее количество фенолов, а также антиоксидантная активность черники, обработанной ИЭП, существенно не отличались ($p > 0,05$) по сравнению с образцами, не обработанными ИЭП. После сушки черники с использованием 12 различных методов, включая сушку горячим воздухом и вакуумную сушку при 45, 60 и 75 °С, сохранение витамина С было выше в образцах, обработанных ИЭП, до вакуумной сушки (19–46%), чем в необработанных образцах. (16–43%). Точно так же удержание витамина С было выше в образцах, обработанных ИЭП перед сушкой горячим воздухом (18–21%), чем в необработанных образцах (16–19%).

Из-за необратимых окислительных процессов сушка горячим воздухом резко снижает концентрацию витамина С независимо от температуры сушки. Об аналогичном результате сообщили López et al. (2010), которые показали, что черника, высушенная горячим воздухом при температуре 80 °С, потеряла 92% содержания витамина С, что указывает на то, что недостаток кислорода в окружающей среде и короткая продолжительность вакуумной сушки могли привести к большому сохранению витамина С.

Эффективность сушки

Скорость сушки

Влияние ИЭП на кинетику сушки зависит от множества параметров, и трудно определить прямую корреляцию с распадом клеток. Поскольку материалы, обработанные ИЭП, имеют большую дисперсию воды и пара, процесс сушки короче. Снижение влажности с течением времени в материале, обработанном ИЭП, намного значительнее, чем в необработанном материале (Golberg et al., 2016). По сравнению с материалом, не обработанным ИЭП, время, необходимое для сушки, может быть сокращено в два-три раза. Продолжительность обезвоживания связана со скоростью разрушения клеток и количеством необходимой энергии. По мере увеличения поступления энергии распад клеток происходит за счет более высокой скорости проницаемости мембраны. Повышенная проницаемость мембраны приводит к более высокой скорости переноса воды, что ведет к более быстрому высыханию. Поскольку молекулы воды мобилизуются через пористость, время, необходимое для достижения поверхности ткани посредством капиллярности, сокращается, что приводит к более быстрому высыханию (Chauhan et al., 2018).

ИЭП удаляет воду из поврежденных клеток, усиливая механизмы массообмена. Это увеличивает движение воды из образцов во внешнюю среду, ускоряя испарение. Как следствие, скорость сушки увеличивается; чем больше степень повреждения ткани, обработанной ИЭП, тем быстрее происходит процесс сушки (Patel et al., 2015). Использование ИЭП для улучшения вакуумной сублимационной сушки тканей фруктов и овощей приводило к увеличению диаметра пор.

Мягкие температуры сушки (50 и 60 °C) повышают эффективность обработки ИЭП моркови; напротив, 70 °C не оказало существенного влияния (Alam et al., 2018). Это можно объяснить тем, что на скорость сушки влияет не только количество выделяемой воды, но и физико-химические свойства материала, его плотность и пористость (Tamer et al., 2016). Анализ текстуры картофеля, поврежденного ИЭП, и картофеля, подвергнутого замораживанию-оттаиванию, выявил значительно отличающиеся от ИЭП структуры и меньшие изменения (Liu et al., 2021).

Потребление энергии

Энергоемкость и качество производимых пищевых продуктов являются важными критериями выбора технологии сушки. Меньшее время сушки может привести к снижению потребления энергии. Увеличение интенсивности ИЭП и удельного расхода энергии приводит к увеличению индекса дезинтеграции клеточных мембран, что улучшает как скорость высыхания, так и потерю влаги. При той же температуре увеличение интенсивности ИЭП улучшило коэффициент диффузии воды. Кроме того, более высокие коэффициенты диффузии приводят к большей передаче влаги. При одинаковых температурах самая высокая интенсивность ИЭП приводила к более высокой скорости сушки и сокращению времени сушки (Rahaman et al., 2019). Кроме того, по сравнению с сушкой удельные энергозатраты ИЭП ничтожно малы. Потребление энергии при использовании методов сушки с помощью ИЭП ниже, чем при обезвоживании неповрежденного продукта, из-за значительно более короткого времени сушки (Wiktor & Witrowa-Rajchert, 2016). Морковь, обработанная ИЭП 5 кВ/см с 10–100 импульсами, привела к удельному потреблению энергии 8–80 кДж/кг соответственно. Согласно этим выводам, изменение числа импульсов является одним из лучших способов ускорить сушку и снизить потребление энергии. Были случаи, когда проводимость обработанного материала не увеличивалась с увеличением продолжительности обработки ИЭП. Кроме того, большее потребление энергии при обработке ИЭП может не привести к сокращению времени сушки из-за перенасыщенной электропорации. Следовательно, с точки зрения сушки электропорационное перенасыщение следует определять как перфорацию клеточных мембран выше оптимальной. Растительная ткань разрушается после высыхания из-за повышенного разрушения клеточной мембраны. По сравнению с затратами энергии на обычную сушку (4,0–6,0 МДж/кг отделенной воды) увеличение затрат энергии на обработку ИЭП относительно невелико (0,2–20 кДж/кг) (Ostermeier et al., 2020). Удельный расход энергии, необходимый для достижения пермеабилитации ткани, составляет 1–10 кДж/кг (0,3–3 кВтч/т) обрабатываемого материала. Стоимость электроэнергии в размере 0,10 евро/кВтч соотносится со стоимостью электроэнергии в размере 0,03–0,30 евро/тонну переработанного продукта (Barba et al., 2015; Ostermeier

et al., 2020). Кроме того, стоимость электроэнергии в каждой стране разная. Следовательно, технология ИЭП может представлять значительный интерес, поскольку она более энергоэффективная и экономична, увеличивает пропускную способность, а также является устойчивой и экологически чистой.

Преимущества и ограничения предварительной обработки ИЭП перед сушкой

Предварительная обработка ИЭП широко используется для облегчения процесса сушки продуктов растительного происхождения. Как показано в Таблице 2. ИЭП, как метод предварительной обработки перед процессом сушки имеет как преимущества, так и ограничения. Поскольку электропорация ИЭП «разрыхляет» клетки и улучшает количество воды, теряемой при сушке, требуется более короткий период сушки; кроме того, предварительная обработка ИЭП может эффективно снизить общее потребление энергии в процессе сушки. Сокращение времени сушки может привести к тому, что материалы сохраняют больше пи-

тательных веществ и биологически активных соединений. Обратимая пермеабиллизация в качестве предварительной обработки сушки имеет большой потенциал для промышленного применения благодаря очевидным преимуществам ИЭП. Большое количество растительных продуктов в промышленности может создать проблему для крупномасштабного производства, поскольку потребуются системы ИЭП непрерывного действия и с высокой производительностью. Несмотря на это, ученые во всем мире приложили немало усилий для масштабирования этой технологии. Следует также отметить, что эффективность электропорации зависит от нескольких параметров, таких как тип материалов и используемый метод сушки. Кроме того, его эффективность также зависит от различных параметров обработки. Стандартной технологии применения ИЭП не существует. Двумя наиболее часто корректируемыми переменными являются потребляемая энергия и напряженность электрического поля, которые можно использовать для сравнения результатов различных исследовательских групп (Barba et al., 2015). Преимущества и ограничения применения ИЭП в качестве вспомогательной технологии сушки представлены в Таблице 3.

Таблица 3
Преимущества и недостатки ИЭП как способа предварительной обработки перед сушкой

Преимущества/ограничения	Эффективность	Примеры	Источник
Преимущества	Способствует максимальному сохранению питательных веществ	Сохранение β-каротина в высушенных образцах улучшилось за счет сокращения времени сушки с предварительной обработкой ИЭП по сравнению с необработанным образцом. В яблоках, обработанных ИЭП перед сушкой общее содержание фенолов на 47,3 % выше, чем в яблоках без предварительной обработки ИЭП. Сушеные грибы шиитакэ (<i>Lentinus edodes</i>), предварительно обработанные ИЭП (1 кВ/см), имеют более высокое общее содержание фенолов (193,32 мкг/мкл), чем высушенные грибы без обработки ИЭП (161,76 мкг/мкл).	(Liu et al., 2020; Wiktor et al., 2015; Li et al., 2021)
	Лучшая регидратация	ИЭП может ингибировать усадку и обеспечивает сохранение макроформы и развитие крупных пор. Большая регидратационная способность и высокая скорость пропитки влагой и более быстрое водопоглощение по сравнению с образцом без предварительной обработки ИЭП Ткань, обработанная ИЭП имела более высокий уровень хрупкости и ломкости, но необработанная ткань имела более твердую и растрескивающуюся текстуру. Образцы, предварительно обработанные ИЭП, имели большее восстановление после регидратации.	(Parniakov et al., 2016; Lammerskitten, Wiktor, et al., 2019; Telfser & Galindo, 2019; Kwao et al., 2016)

Окончание Таблицы 2

Преимущества/ограничения	Эффективность	Примеры	Источник
Преимущества	Увеличение стабильности цвета	Цвет, близкий к свежему продукту/свежему сырью Обесцвечивание может быть сведено к минимуму.	(Telfser & Galindo, 2019; Liu et al., 2020)
	Повышение эффективности сушки	Улучшение кинетики сушки Снижение потребления энергии.	(Chauhan et al., 2018; Lamanauskas et al., 2015; Lammerskitten, Wiktor, et al., 2019; Liu et al., 2018; Shorstkii et al., 2022; Telfser & Galindo, 2019; Wu & Zhang, 2019)
Ограничения	Низкая производительность обработки	Обычно емкость ИЭП для лабораторного масштаба, потребность в установках для промышленного производства. Обычно еще нужен процесс нарезки или резки. Обычно используется камера периодического действия.	(Alam et al., 2018; Chauhan et al., 2018; Lammerskitten, Wiktor, et al., 2018; Rahaman et al., 2019; Shorstkii et al., 2022; Vorobiev & Lebovka, 2019; Wiktor et al., 2016; Yamakage et al., 2021)
		Различное корректирующее/модифицированное оборудование	Ограниченная эффективность электрического поля была обусловлена ярко выраженными защитными эффектами, которые не зависели от конструкции и установки камеры обработки. Отсутствие надежных и гораздо более практичных электрических систем было определено как главный камень преткновения на пути производственного использования ИЭП.
		Загрязнение и коррозия электродов, химические изменения, миграция материала электродов и электролиз воды в камере обработки могут вызвать проблемы с продуктом. Ограниченные определения результатов затрудняют сравнение результатов лабораторных исследований; неправильно выбранные параметры обработки ИЭП могут привести к ее неэффективности.	(Wiktor & Witrowa-Rajchert, 2016). (Golberg et al., 2016). (Nowacka et al., 2019). Yamakage et al., 2021; Zderic & Zondervan, 2016; Zderic et al., 2013; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2012).
	Расходы	Общая стоимость ИЭП была на 147% (2,2 цента/л) выше, чем стоимость обычной термической обработки (1,5 цента/л).	(Arshad et al. 2020, 2021; Schottroff et al., 2020; Timmermans et al., 2019)

ВЫВОДЫ

Сушка сырья является наиболее распространенным способом обработки растительного сырья, который способствует получению продуктов с длительным сроком хранения. Вместе с тем проведение процесса сушки растительного сырья требуют длительного времени, что оказывает негативное влияние на качество пищевых продуктов. Импульсное электрическое поле (ИЭП) представляет собой технологию нетермической обработки пищевых продуктов, которая вызывает электропорацию клеточной

мембраны, тем самым улучшая массоперенос через клеточную мембрану. Обработка импульсным электрическим полем является одной из эффективных технологий, которую целесообразно использовать в качестве предварительной обработки перед сушкой пищевого сырья с целью максимального сохранения органолептических, физико-химических показателей и пищевой ценности. Многие виды плодоовощного сырья, предварительно обработанные ИЭП, обладают улучшенными качественными показателями после сушки по сравнению с теми, которые не были предварительно обработа-

ны. Овощи, фрукты и растительное сырье, обработанные ИЭП имеют более яркий цвет, демонстрируют более высокое удержание β -каротина и более высокую антиоксидантную активность, а также время процесса сушки таких продуктов значительно короче.

Предварительная обработка импульсным электрическим полем перед сушкой способствует сокращению времени сушки, снижению энергоемкости и сохранению биологически активных соединений в готовом продукте.

В ходе проведения будущих научных исследований результаты данного обзора могут служить достоверной и основополагающей информацией для более точной оценки факторов, оказывающих влияние на эффективность ИЭП. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на установление оптимальных условий обработки растительной продукции ИЭП, конкретных параметров обработки для различных видов сырья, а также

материала и геометрии электродов, чтобы свести к минимуму все имеющиеся недостатки ИЭП. Материалы данной статьи могут быть использованы в научных целях в качестве источника достоверных обобщенных данных, а также для промышленного внедрения эффективной технологии обработки сырья ИЭП перед сушкой, установлении оптимальных параметров обработки для различных видов сырья.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Бурак Леонид Чеславович: руководство исследованием, концептуализация, методология, проведение исследования, верификация данных, формальный анализ, создание рукописи и её редактирование, визуализация.

Сапач Александр Николаевич: проведение исследования, верификация данных, формальный анализ, создание рукописи и её редактирование, визуализация.

ЛИТЕРАТУРА

- Al-Sayed, L., Boy, V., Madieta, E., Mehinagic, E., & Lanoisellé, J.-L. (2018). Pulsed electric fields (ИЭП) as pre-treatment for freeze-drying of plant tissues. In *IDS'2018: 21st international drying symposium* (pp. 11–14). València. <https://doi.org/10.4995/ids2018.2018.7484>
- Alam, M. R., Lyng, J. G., Frontuto, D., Marra, F., & Cinquanta, L. (2018). Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot. *Journal of Food Science*, 83(8), 2159–2166. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14216>
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Munir, A., Buntat, Z., Ahmad, M. H., Jusoh, Y. M. M., Bekhit, A. E. D., Roobab, U., Manzoor, M. F., & Aadil, R. M. (2020). Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. *Trends in Food Science and Technology*, 104, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.008>
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., El-Din Bekhit, A., Liu, Z. W., & Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 111, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>
- Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., Saraiva, J. A., Raso, J., Martin-Belloso, O., Witrowa-Rajchert, D., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77(4), 773–798. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.015>
- Bobinaitė, R., Pataro, G., Lamanaukas, N., Šatkauskas, S., Viškelis, P., & Ferrari, G. (2015). Application of pulsed electric field in the production of juice and extraction of bioactive compounds from blueberry fruits and their by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 5898–5905. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1668-0>
- Bozkir, H. (2020). Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), Article e13485. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13485>
- Buchmann, L., & Mathys, A. (2019). Perspective on pulsed electric field treatment in the bio-based industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, Article 00265. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00265>
- Chauhan, O. P., Sayanfar, S., & Toepfl, S. (2018). Effect of pulsed electric field on texture and drying time of apple slices. *Journal of Food Science and Technology*, 55(6), 2251–2258. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3142-x>
- Chen, B., Chang, C., Cheng, K., Hou, C., Lin, J., Chen, M., Permatasari, S., Chen, C., & Hsieh, C. (2022). Using the response surface methodology to establish the optimal conditions for preserving bananas (*Musa acuminata*) in a pulsed electric field and to decrease browning induced by storage at a low temperature. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, Article 100804. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100804>

- Chen, B. R., Wang, Z. M., Lin, J. W., Wen, Q. H., Xu, F. Y., Li, J., Wang, R., & Zeng, X. A. (2022). Improving emulsification performance of waxy maize starch by esterification combined with pulsed electric field. *Food Hydrocolloids*, *129*, Article 107655. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107655>
- Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Le-Bail, A., & Xanthakis, E. (2016). The principles of high voltage electric field and its application in food processing: A review. *Food Research International*, *89*(1), 48–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.002>
- Dellarosa, N., Tappi, S., Ragni, L., Laghi, L., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2016). Metabolic response of fresh-cut apples induced by pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *38*(B), 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.016>
- Demir, E., Dymek, K., & Galindo, F. G. (2018). Technology allowing baby spinach leaves to acquire freezing tolerance. *Food and Bioprocess Technology*, *11*(4), 809–817. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2044-7>
- Devkota, L., He, L., Bittencourt, C., Midgley, J., & Haritos, V. S. (2022). Thermal and pulsed electric field assisted hydration of common beans. *LWT – Food Science and Technology*, *158*, Article 113163. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113163>
- Dhua, S., Kumar, K., Sharanagat, V. S., & Nema, P. K. (2022). Bioactive compounds and its optimization from food waste: Review on novel extraction techniques. *Nutrition and Food Science*, *52*(8), 1270–1288. <https://doi.org/10.1108/NFS-12-2021-0373>
- El Kantar, S., Boussetta, N., Lebovka, N., Foucart, F., Rajha, H. N., Maroun, R. G., Louka, N., & Vorobiev, E. (2018). Pulsed electric field treatment of citrus fruits: Improvement of juice and polyphenols extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *46*, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.024>
- Fauster, T., Schlossnikl, D., Rath, F., Ostermeier, R., Teufel, F., Toepfl, S., & Jaeger, H. (2018). Impact of pulsed electric field pretreatment on process performance of industrial French fries production. *Journal of Food Engineering*, *235*, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.023>
- Ferreira-Holderbaum, D., Kon, T., Kudo, T., & Pedro Guerra, M. (2010). Enzymatic browning, polyphenol oxidase activity, and polyphenols in four apple cultivars: Dynamics during fruit development. *HortScience*, *45*(8), 1150–1154. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.8.1150>
- Gamboa-Santos, J., Megías-Pérez, R., Soria, A. C., Olano, A., Montilla, A., & Villamiel, M. (2014). Impact of processing conditions on the kinetic of vitamin C degradation and 2-furoylmethyl amino acid formation in dried strawberries. *Food Chemistry*, *153*, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.004>
- Gavahian, M., Chu, Y. H., & Sastry, S. (2018). Extraction from food and natural products by moderate electric field: Mechanisms, benefits, and potential industrial applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *17*(4), 1040–1052. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12362>
- Gavahian, M., & Farahnaky, A. (2018). Ohmic-assisted hydrodistillation technology: A review. *Trends in Food Science and Technology*, *72*, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.12.014>
- Gavahian, M., Pallares, N., Al Khawli, F., Ferrer, E., & Barba, F. J. (2020). Recent advances in the application of innovative food processing technologies for mycotoxins and pesticide reduction in foods. *Trends in Food Science and Technology*, *106*, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.018>
- Gavahian, M., & Tiwari, B. K. (2020). Moderate electric fields and ohmic heating as promising fermentation tools. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *64*, Article 102422. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102422>
- Ghasemi, J., Moradi, M., Karparvarfard, S. H., Golmakani, M. T., & Khaneghah, A. M. (2021). Thin layer drying kinetics of lemon verbena leaves: A quality assessment and mathematical modeling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, *13*(1), 59–72. <https://doi.org/10.15586/qas.v13i1.835>
- Golberg, A., Sack, M., Teissie, J., Pataro, G., Pliquet, U., Saulis, G., Stefan, T., Miklavcic, D., Vorobiev, E., & Frey, W. (2016). Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development. *Biotechnology for Biofuels*, *9*(1), Article 94. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0508-z>
- Gómez, B., Munekata, P. E. S., Gavahian, M., Barba, F. J., Martí-Quijal, F. J., Bolumar, T., Campagnol, P. C. B., Tomasevic, I., & Lorenzo, J. M. (2019). Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: An overview. *Food Research International*, *123*, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.047>
- Guionet, A., Fujiwara, T., Sato, H., Takahashi, K., Takaki, K., Matsui, M., Tanino, T., & Ohshima, T. (2021). Pulsed electric fields act on tryptophan to inactivate α -amylase. *Journal of Electrostatics*, *112*, Article 103597. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103597>
- Guionet, A., David, F., Zaepffel, C., Coustets, M., Helmi, K., Cheype, C., Packan, D., Garnier, J. P., Blanckaert, V., & Teissie, J. (2015). *E. coli* electroirradiation on a closed loop circuit by using milli-, micro- and nanosecond pulsed electric fields: Comparison between energy costs. *Bioelectrochemistry*, *103*, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.08.021>
- Han, Z., Cai, M. J., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2018). Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review. *Trends in Food Science and Technology*, *75*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.017>
- Heinz, V., & Toepfl, S. (2022). Pulsed electric fields industrial equipment design. In J. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl (Eds.). *Pulsed electric fields technology for the food industry. Food engineering series* (pp. 489–504). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_17
- Hill, K., Ostermeier, R., Töpfl, S., & Heinz, V. (2022). Pulsed electric fields in the potato industry. In J. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl (Eds.). *Pulsed electric fields technology for the food industry. Food engineering series* (pp. 325–335). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_9
- Huang, D., Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sunden, B., & Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the

- drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, Article 104950. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104950>
- Iaccheri, E., Castagnini, J. M., Rosa, D. M., & Rocculi, P. (2021a). New insights into the glass transition of dried fruits and vegetables and the effect of pulsed electric field treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102566. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102566>
- Iaccheri, E., Castagnini, J. M., Tylewicz, U., & Rocculi, P. (2021b). Modelling the mechanical properties and sorption behaviour of pulsed electric fields treated carrots and potatoes after air drying for food chain management. *Biosystems Engineering*, 223(B), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.011>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Cuéllar-Villarreal, M. del R., Welti-Chanes, J., Cisneros-Zevallos, L., Ramos-Parra, P. A., & Hernández-Brenes, C. (2017). Nonthermal processing technologies as elicitors to induce the biosynthesis and accumulation of nutraceuticals in plant foods. *Trends in Food Science and Technology*, 60, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.021>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Martínez-Hernández, G. B., Del C Rodríguez, S., Cao, C. M., & Cisneros-Zevallos, L. (2011). Plants as biofactories: Physiological role of reactive oxygen species on the accumulation of phenolic antioxidants in carrot tissue under wounding and hyperoxia stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(12), 6583–6593. <https://doi.org/10.1021/jf2006529>
- Jin, T. Z., Yu, Y., & Gurtler, J. B. (2017). Effects of pulsed electric field processing on microbial survival, quality change and nutritional characteristics of blueberries. *LWT – Food Science and Technology*, 77, 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.009>
- Kandušer, M., Belič, A., Čorović, S., & Škrjanc, I. (2017). Modular Serial Flow Through device for pulsed electric field treatment of the liquid samples. *Scientific Reports*, 7(1), Article 8115. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08620-8>
- Kempkes, M., & Munderville, M. (2018). Pulsed electric fields (ИЭП) processing of fruit and vegetables. In *21st International Conference on Pulsed Power* (Article 17580667). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PPC.2017.8291186>
- Kumar, Y., Bashir, A. A., & Indore, N., Vishwakarma, R. K., & Singh, R. K. (2021). Pulsed electric field. In C. M. Galanakis (Ed.), *Sustainable food processing and engineering challenges* (pp. 137–179). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822714-5.00005-X>
- Kwao, S., Al-Hamimi, S., Damas, M. E. V., Rasmusson, A. G., & Gómez Galindo, F. (2016). Effect of guard cells electroporation on drying kinetics and aroma compounds of Genovese basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38(A), 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.011>
- Lamanauskas, N., Šatkauskas, S., Bobinaite, R., & Viškelis, P. (2015). Pulsed electric field impact on *Actinidia kolomikta* drying efficiency. *Journal of Food Process Engineering*, 38(3), 243–249. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12161>
- Lammerskitten, A., Mykhailik, V., Wiktor, A., Toepfl, S., Nowacka, M., Bialik, M., Czyżewski, J., Witrowa-Rajchert, D., & Parniakov, O. (2019a). Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 57, Article 102211. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102211>
- Lammerskitten, A., Shorstkii, I., Parniakov, O., Mykhailik, V., Toepfl, S., Rybak, K., Dadan, M., Nowacka, M., & Wiktor, A. (2020). The effect of different methods of mango drying assisted by a pulsed electric field on chemical and physical properties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(12), Article e14973. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14973>
- Lammerskitten, A., Wiktor, A., Siemer, C., Toepfl, S., Mykhailik, V., Gondek, E., Rybak, K., Witrowa-Rajchert, D., & Parniakov, O. (2019b). The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples. *Journal of Food Engineering*, 252, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.006>
- Lasekan, O., Ng, S., Azeez, S., Shittu, R., Teoh, L., & Gholivand, S. (2017). Effect of pulsed electric field processing on flavor and color of liquid foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), 1–14. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12940>
- Li, J., Shi, J., Huang, X., Wang, T., Zou, X., Li, Z., Zhang, D., Zhang, W., & Xu, Y. (2020). Effects of pulsed electric field pretreatment on frying quality of fresh-cut lotus root slices. *LWT – Food Science and Technology*, 132, Article 109873. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109873>
- Li, X., Li, J., Wang, R., Rahaman, A., Zeng, X. A., & Brennan, C. S. (2021). Combined effects of pulsed electric field and ultrasound pretreatments on mass transfer and quality of mushrooms. *LWT – Food Science and Technology*, 150, Article 112008. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112008>
- Liu, C., Grimi, N., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2021). Effects of pulsed electric fields and preliminary vacuum drying on freezing assisted processes in potato tissue. *Food and Bioprocess Technology*, 125, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.11.002>
- Liu, C., Grimi, N., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2018). Effects of pulsed electric fields treatment on vacuum drying of potato tissue. *LWT – Food Science and Technology*, 95, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.090>
- Liu, C., Pirozzi, A., Ferrari, G., Vorobiev, E., & Grimi, N. (2020). Effects of pulsed electric fields on vacuum drying and quality characteristics of dried carrot. *Food and Bioprocess Technology*, 13(1), 45–52. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02364-1>
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., & Cárcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.001>
- López-Gámez, G., Elez-Martínez, P., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2020). Pulsed electric fields affect endogenous enzyme activities, respiration and biosynthesis of phenolic compounds in carrots. *Postharvest Biology and Technology*, 168, Article 111284. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111284>
- López, J., Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E., & Di Scala, K. (2010). Effect of air temperature on drying kinetics, vitamin C, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness

- of blueberries variety O'Neil. *Food and Bioprocess Technology*, 3(5), 772–777. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0306-8>
- Lung, C. T., Chang, C. K., Cheng, F. C., Hou, C. Y., Chen, M. H., Santoso, S. P., Yudhistira, B., & Hsieh, C. W. (2022). Effects of pulsed electric field-assisted thawing on the characteristics and quality of Pekin duck meat. *Food Chemistry*, 390, Article 133137. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133137>
- Mahnič-Kalamiza, S., Vorobiev, E., & Miklavčič, D. (2014). Electroporation in food processing and biorefinery. *Journal of Membrane Biology*, 247(12), 1279–1304. <https://doi.org/10.1007/s00232-014-9737-x>
- Mannozi, C., Tylewicz, U., Tappi, S., Rosa, M. D., Rocculi, P., & Romani, S. (2020). The influence of different pre-treatments on the quality and nutritional characteristics in dried undersized yellow kiwifruit. *Applied Sciences*, 10(23), Article 8432. <https://doi.org/10.3390/app10238432>
- Masood, H., Diao, Y., Cullen, P. J., Lee, N. A., & Trujillo, F. J. (2018). A comparative study on the performance of three treatment chamber designs for radio frequency electric field processing. *Computers and Chemical Engineering*, 108, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.09.009>
- Meza-Jiménez, M., De, L., Pokhrel, P. R., Robles de la Torre, R. R., Barbosa-Canovas, G. V., & Hernández-Sánchez, H. (2019). Effect of pulsed electric fields on the activity of food-grade papain in a continuous system. *LWT – Food Science and Technology*, 109, 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.037>
- Mohamed, M., & Eissa, A. (2012). Pulsed electric fields for food processing technology. In A. Amer Eissa (Ed.). *Structure and function of food engineering* (pp. 275–306). InTech.
- Morales-de la Peña, M., Welte-Chanes, J., & Martín-Belloso, O. (2019). Novel technologies to improve food safety and quality. *Current Opinion in Food Science*, 30, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.10.009>
- Mousakhani-Ganjeh, A., Amiri, A., Nasrollahzadeh, F., Wiktor, A., Nilghaz, A., Pratap-Singh, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Electro-based technologies in food drying – A comprehensive review. *LWT – Food Science and Technology*, 145, Article 111315. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111315>
- Neri, L., Giancaterino, M., Rocchi, R., Tylewicz, U., Valbonetti, L., Faieta, M., & Pittia, P. (2021). Pulsed electric fields (ИЭП) as hot air drying pre-treatment: Effect on quality and functional properties of saffron (*Crocus sativus* L.). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102592. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102592>
- Nguyen, T. M. C., Gavahian, M., & Tsai, P. J. (2021). Effects of ultrasound-assisted extraction (UAE), high voltage electric field (HVEF), high pressure processing (HPP), and combined methods (HVEF+UAE and HPP+UAE) on Gac leaves extraction. *LWT – Food Science and Technology*, 143, Article 111131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111131>
- Nowacka, M., Wiktor, A., Anuszevska, A., Dadan, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023>
- Nowosad, K., Sujka, M., Pankiewicz, U., & Kowalski, R. (2021). The application of technology in food processing and human nutrition. *Journal of Food Science and Technology*, 58(2), 397–411. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04512-4>
- Ostermeier, R., Giersemehl, P., Siemer, C., Töpfl, S., & Jäger, H. (2018). Influence of pulsed electric field pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. *Journal of Food Engineering*, 237, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.010>
- Ostermeier, R., Parniakov, O., Töpfl, S., & Jäger, H. (2020). Applicability of pulsed electric field (ИЭП) pre-treatment for a convective two-step drying process. *Foods*, 9(4), 9–12. <https://doi.org/10.3390/foods9040512>
- Pang, L., Lu, G., Cheng, J., Lu, X., Ma, D., Li, Q., Li, Z., Zheng, J., Zhang, C., & Pan, S. (2021). Physiological and biochemical characteristics of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) roots treated by a high voltage alternating electric field during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 180, Article 111619. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111619>
- Parniakov, O., Lebovka, N. I., Bals, O., & Vorobiev, E. (2015). Effect of electric field and osmotic pre-treatments on quality of apples after freezing-thawing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 29, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.03.011>
- Parniakov, O., Lebovka, N. I., Van Hecke, E., & Vorobiev, E. (2014). Pulsed electric field assisted pressure extraction and solvent extraction from mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 174–183. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1059-y>
- Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2016). Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.002>
- Pataro, G., & Ferrari, G. (2020). Limitations of pulsed electric field utilization in food industry. In F. J. Barba, O. Parniakov, & A. Wiktor (Eds.). *Pulsed electric fields to obtain healthier and sustainable food for tomorrow* (pp. 283–310). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816402-0.00013-6>
- Patel, S. M., Jameel, F., Sane, S. U., & Kamat, M. (2015). Lyophilization process design and development using QbD principles. In F. Jameel, S. Hershenson, M. Khan, & S. Martin-Moe (Eds.). *Quality by design for biopharmaceutical drug product development* (vol. 18, pp. 303–329). Springer Science. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2316-8_14
- Pereira, R. N., Galindo, F. G., Vicente, A. A., & Dejmek, P. (2009). Effects of pulsed electric field on the viscoelastic properties of potato tissue. *Food Biophysics*, 4(3), 229–239. <https://doi.org/10.1007/s11483-009-9120-0>
- Rahaman, A., Siddeeg, A., Manzoor, M. F., Zeng, X. A., Ali, S., Baloch, Z., Li, J., & Wen, Q. H. (2019). Impact of pulsed electric field treatment on drying kinetics, mass transfer, colour parameters and microstructure of plum. *Journal of*

- Food Science and Technology*, 56(5), 2670–2678. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03755-0>
- Raso, J., Frey, W., Ferrari, G., Pataro, G., Knorr, D., Teissie, J., & Miklavčič, D. (2016). Recommendations guidelines on the key information to be reported in studies of application of technology in food and biotechnological processes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.003>
- Rybak, K., Samborska, K., Jedlinska, A., Parniak, O., Nowacka, M., Witrowa-Rajchert, D., & Wiktor, A. (2020). The impact of pulsed electric field pretreatment of bell pepper on the selected properties of spray dried juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 65, Article 102446. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102446>
- Sack, M., Eing, C., Berghöfer, T., Buth, L., Stängle, R., Frey, W., & Bluhm, H. (2008). Electroporation-assisted dewatering as an alternative method for drying plants. *Transactions on Plasma Science*, 36(3), 2577–2585. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2002440>
- Salehi, F. (2020). Physico-chemical properties of fruit and vegetable juices as affected by pulsed electric field: A review. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1036–1050. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1775250>
- Saletnik, B., Zagula, G., Aneta, S., Marcin, B., Ewelina, S., & Czesław, P. (2022). Effect of magnetic and electrical fields on yield, shelf life and quality of fruits. *Applied Sciences*, 12(6), Article 3183. <https://doi.org/10.3390/app12063183>
- Sampedro, F., McAloon, A., Yee, W., Fan, X., Zhang, H. Q., & Geveke, D. J. (2013). Cost analysis of commercial pasteurization of orange juice by pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.10.002>
- Sánchez-Vega, R., Elez-Martínez, P., & Martín-Belloso, O. (2014). Effects of high-intensity pulsed electric fields processing parameters on the chlorophyll content and its degradation compounds in broccoli juice. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), 1137–1148. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1152-2>
- Schottroff, F., Johnson, K., Johnson, N. B., Bédard, M. F., & Jaeger, H. (2020). Challenges and limitations for the decontamination of high solids protein solutions at neutral pH using pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 268, Article 109737. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109737>
- Shorstkii, I., Sosnin, M., Smetana, S., Toepfl, S., Parniak, O., & Wiktor, A. (2022). Correlation of the cell disintegration index with Luikov's heat and mass transfer parameters for drying of pulsed electric field (ИЭП) pretreated plant materials. *Journal of Food Engineering*, 316, Article 110822. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110822>
- Singh, M., Patra, S., & Rajesh, K. S. (2021). Common techniques and methods for screening of natural products for developing of anticancer drugs. In A. K. Srivastava, V. K. Kannaujia, R. K. Singh, & D. Singh (Eds.). *Evolutionary diversity as a source for anticancer molecules* (pp. 323–353). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821710-8.00015-1>
- Sulaimana, A. S., Chang, C.-K., Hou, C.-Y., Yudhistira, B., Punthi, F., Lung, C.-T., Cheng, K.-C., Santoso, S. P., & Hsieh, C.-W. (2021). Effect of oxidative stress on physicochemical quality of Taiwanese seagrape (*Caulerpa lentillifera*) with the application of alternating current electric field (ACEF) during post-harvest storage. *Processes*, 9(6), Article 1011. <https://doi.org/10.3390/pr9061011>
- Sun, J., Bai, W., Zhang, Y., Liao, X., & Hu, X. (2011). Effects of electrode materials on the degradation, spectral characteristics, visual colour, and antioxidant capacity of cyanidin-3-glucoside and cyanidin-3-sophoroside during pulsed electric field treatment. *Food Chemistry*, 128(3), 742–747. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.099>
- Sun, T., & Ling, F. (2021). Optimization method of microwave drying process parameters for rice. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 13(3), 10–20. <https://doi.org/10.15586/qas.v13i3.917>
- Tamer, C., Isci, A., Kutlu, N., Sakiyan, O., Sahin, S., & Sumnu, G. (2016). Effect of drying on porous characteristics of orange peel. *International Journal of Food Engineering*, 12(9), 921–928. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0075>
- Tanino, T., Hirohara, M., Moteki, R., Matsui, M., & Ohshima, T. (2020). Engineering of pulsed electric field treatment using carbon materials as electrode and application to pasteurization of sake. *Journal of Electrostatics*, 104, Article 103424. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103424>
- Telfser, A., & Galindo, F. G. (2019). Effect of reversible permeabilization in combination with different drying methods on the structure and sensorial quality of dried basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *LWT – Food Science and Technology*, 99, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.062>
- Terefe, N. S., Buckow, R., & Versteeg, C. (2015). Quality-related enzymes in plant-based products: Effects of novel food processing technologies part 2: Pulsed electric field processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(1), 1–5. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.701253>
- Timmermans, R. A. H., Mastwijk, H. C., Berendsen, L. B. J. M., Nederhoff, A. L., Matser, A. M., Van Boekel, M. A. J. S., & Nierop Groot, M. N. (2019). Moderate intensity Pulsed Electric Fields as alternative mild preservation technology for fruit juice. *International Journal of Food Microbiology*, 298, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.02.015>
- Toepfl, S., & Knorr, D. (2006). Pulsed electric fields as a pretreatment technique in drying processes. *Stewart Postharvest Review*, 4(3), 1–6. <https://doi.org/10.2212/spr.2006.4.3>
- Toepfl, S., Siemer, C., Saldaña-Navarro, G., & Heinz, V. (2014). Overview of pulsed electric fields processing for food. In D.-W. Sun (Ed.). *Emerging technologies for food processing* (2nd ed., pp. 93–114). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-411479-1.00006-1>
- Tomasi, J. D. C., De Lima, G. G., Wendling, I., Helm, C. V., Hansel, F. A., De Godoy, R. C. B., Grunennvaldt, R. L., De Melo, T. O., Tomazzoli, M. M., & Deschamps, C. (2021). Effects of different drying methods on the chemical, nutritional and colour of yerba mate (*Ilex paraguariensis*)

- leaves. *International Journal of Food Engineering*, 17(7), 551–560. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0312>
- Tylewicz, U., Mannozi, C., Castagnini, J. M., Genovese, J., Romani, S., Rocculi, P., & Rosa, M. D. (2022). Application of ИЭП- and OD-assisted drying for kiwifruit waste valorisation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, Article 102952. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102952>
- Tylewicz, U., Tappi, S., Mannozi, C., Romani, S., Dellarosa, N., Laghi, L., Ragni, L., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2017). Effect of pulsed electric field (ИЭП) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. *Journal of Food Engineering*, 213, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.028>
- Vaessen, E. M. J., Timmermans, R. A. H., Tempelaars, M. H., Schutyser, M. A. I., & den Besten, H. M. W. (2019). Reversibility of membrane permeabilization upon pulsed electric field treatment in *Lactobacillus plantarum* WCFS1. *Scientific Reports*, 9(1), Article 19990. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56299-w>
- Van Wyk, S., Silva, F. V. M., & Farid, M. M. (2019). Pulsed electric field treatment of red wine: Inactivation of *Brettanomyces* and potential hazard caused by metal ion dissolution. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.11.001>
- Voda, A., Homan, N., Witek, M., Duijster, A., van Dalen, G., van der Sman, R., Nijssse, J., van Vliet, L., Van As, H., & van Duynhoven, J. (2012). The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot. *Food Research International*, 49(2), 687–693. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.08.019>
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2019). Pulsed electric field in green processing and preservation of food products. In F. Chemat, E. Vorobiev (Eds.). *Green food processing techniques* (pp. 403–430). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815353-6.00015-x>
- Waghmare, R. (2021). Refractance window drying: A cohort review on quality characteristics. *Trends in Food Science and Technology*, 110(50), 652–662. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.030>
- Wang, Q., Li, Y., Sun, D. W., & Zhu, Z. (2018). Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: Principles and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2285–2298. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1434609>
- Wiktor, A., Dadan, M., Nowacka, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). The impact of combination of pulsed electric field and ultrasound treatment on air drying kinetics and quality of carrot tissue. *LWT – Food Science and Technology*, 110, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.060>
- Wiktor, A., Gondek, E., Jakubczyk, E., Dadan, M., Nowacka, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2018). Acoustic and mechanical properties of carrot tissue treated by pulsed electric field, ultrasound and combination of both. *Journal of Food Engineering*, 238, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.001>
- Wiktor, A., Iwaniuk, M., Śledź, M., Nowacka, M., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2013). Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technology*, 31(1), 112–119. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.724128>
- Wiktor, A., Lammerskitten, A., Barba, F. J., Michalski, M., Toepfl, S., & Parniakov, O. (2021). Drying processes assisted by ИЭП for plant-based materials. In K. Knoerzer, K. Muthukumarappan (Eds.). *Innovative food processing technologies: A comprehensive review* (pp. 272–275). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815781-7.00001-9>
- Wiktor, A., Nowacka, M., Dadan, M., Rybak, K., Lojkowski, W., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). The effect of pulsed electric field on drying kinetics, color, and microstructure of carrot. *Drying Technology*, 34(11), 1286–1296. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1105813>
- Wiktor, A., Sledz, M., Nowacka, M., Rybak, K., Chudoba, T., Lojkowski, W., & Witrowa-Rajchert, D. (2015). The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.04.004>
- Wiktor, A., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). Pulsed electric fields as pretreatment for subsequent food process operations. In D. Miklavcic (Ed.). *Handbook of electroporation* (pp. 1–16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26779-1_178-1
- Won, Y. C., Min, S. C., & Lee, D. U. (2015). Accelerated drying and improved color properties of red pepper by pretreatment of pulsed electric fields. *Drying Technology*, 33(8), 926–932. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.999371>
- Wu, Y., & Zhang, D. (2019). Pulsed electric field enhanced freeze-drying of apple tissue. *Czech Journal of Food Sciences*, 37(6), 432–438. <https://doi.org/10.17221/230/2018-CJFS>
- Yamakage, K., Yamada, T., Takahashi, K., Takaki, K., Komuro, M., Sasaki, K., Aoki, H., Kamagata, J., Koide, S., & Orikasa, T. (2021). Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 68, Article 102615. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102615>
- Yu, Y., Jin, T. Z., & Xiao, G. (2017). Effects of pulsed electric fields pretreatment and drying method on drying characteristics and nutritive quality of blueberries. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), Article e13303. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13303>
- Zderic, A., & Zondervan, E. (2016). Polyphenol extraction from fresh tea leaves by pulsed electric field: A study of mechanisms. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 586–592. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.03.010>
- Zderic, A., Zondervan, E., & Meuldijk, J. (2013). Breakage of cellular tissue by pulsed electric field: Extraction of polyphenols from fresh tea leaves. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1795–1800. <https://doi.org/10.3303/CET1332300>
- Zhang, C., Yang, Y. H., Zhao, X. D., Zhang, L., Li, Q., Wu, C., Ding, X., & Qian, J. Y. (2021). Assessment of impact of pulsed electric field on functional, rheological and structural

- properties of vital wheat gluten. *LWT – Food Science and Technology*, 147, Article 111536. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111536>
- Zhang, S., Sun, L., Ju, H., Bao, Z., Zeng, X., & Lin, S. (2021). Research advances and application of pulsed electric field on proteins and peptides in food. *Food Research International*, 139(1), Article 109914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109914>
- Zhang, Z. H., Wang, L. H., Zeng, X. A., Han, Z., & Brennan, C. S. (2019). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 1–13. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13903>
- Zhang, Z. H., Zeng, X. A., Brennan, C. S., Brennan, M., Han, Z., & Xiong, X. Y. (2015). Effects of pulsed electric fields (ИЭП) on vitamin C and its antioxidant properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(10), 24159–24173. <https://doi.org/10.3390/ijms161024159>
- Zhang, Z., Zhang, B., Yang, R., & Zhao, W. (2020). Recent developments in the preservation of raw fresh food by pulsed electric field. *Food Reviews International*, 38(1), 247–265. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1860083>
- Zhao, W., Yang, R., & Zhang, H. Q. (2012). Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins. *Trends in Food Science and Technology*, 27(2), 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.05.007>

REFERENCES

- Al-Sayed, L., Boy, V., Madieta, E., Mehinagic, E., & Lanoisellé, J.-L. (2018). Pulsed electric fields (ИЭП) as pre-treatment for freeze-drying of plant tissues. In *IDS'2018: 21st international drying symposium* (pp. 11–14). València, Spain. <https://doi.org/10.4995/ids2018.2018.7484>
- Alam, M. R., Lyng, J. G., Frontuto, D., Marra, F., & Cinquanta, L. (2018). Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot. *Journal of Food Science*, 83(8), 2159–2166. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14216>
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Munir, A., Buntat, Z., Ahmad, M. H., Jusoh, Y. M. M., Bekhit, A. E. D., Roobab, U., Manzoor, M. F., & Aadil, R. M. (2020). Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. *Trends in Food Science and Technology*, 104, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.008>
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., El-Din Bekhit, A., Liu, Z. W., & Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 111, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>
- Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., Saraiva, J. A., Raso, J., Martin-Belloso, O., Witrowa-Rajchert, D., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77(4), 773–798. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.015>
- Bobinaitė, R., Pataro, G., Lamanauskas, N., Šatkauskas, S., Viškelis, P., & Ferrari, G. (2015). Application of pulsed electric field in the production of juice and extraction of bioactive compounds from blueberry fruits and their by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 5898–5905. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1668-0>
- Bozkir, H. (2020). Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), Article e13485. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13485>
- Buchmann, L., & Mathys, A. (2019). Perspective on pulsed electric field treatment in the bio-based industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, Article 00265. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00265>
- Chauhan, O. P., Sayanfar, S., & Toepfl, S. (2018). Effect of pulsed electric field on texture and drying time of apple slices. *Journal of Food Science and Technology*, 55(6), 2251–2258. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3142-x>
- Chen, B., Chang, C., Cheng, K., Hou, C., Lin, J., Chen, M., Permatasari, S., Chen, C., & Hsieh, C. (2022). Using the response surface methodology to establish the optimal conditions for preserving bananas (*Musa acuminata*) in a pulsed electric field and to decrease browning induced by storage at a low temperature. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, Article 100804. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.100804>
- Chen, B. R., Wang, Z. M., Lin, J. W., Wen, Q. H., Xu, F. Y., Li, J., Wang, R., & Zeng, X. A. (2022). Improving emulsification performance of waxy maize starch by esterification combined with pulsed electric field. *Food Hydrocolloids*, 129, Article 107655. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107655>
- Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Le-Bail, A., & Xanthakis, E. (2016). The principles of high voltage electric field and its application in food processing: A review. *Food Research International*, 89(1), 48–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.002>
- Dellarosa, N., Tappi, S., Ragni, L., Laghi, L., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2016). Metabolic response of fresh-cut apples induced by pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38(B), 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.016>
- Demir, E., Dymek, K., & Galindo, F. G. (2018). Technology allowing baby spinach leaves to acquire freezing tolerance. *Food and Bioprocess Technology*, 11(4), 809–817. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2044-7>
- Devkota, L., He, L., Bittencourt, C., Midgley, J., & Haritos, V. S. (2022). Thermal and pulsed electric field assisted hydration of common beans. *LWT – Food Science and Technology*, 158, Article 113163. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113163>

- Dhua, S., Kumar, K., Sharanagat, V. S., & Nema, P. K. (2022). Bioactive compounds and its optimization from food waste: Review on novel extraction techniques. *Nutrition and Food Science*, 52(8), 1270–1288. <https://doi.org/10.1108/NFS-12-2021-0373>
- El Kantar, S., Boussetta, N., Lebovka, N., Foucart, F., Rajha, H. N., Maroun, R. G., Louka, N., & Vorobiev, E. (2018). Pulsed electric field treatment of citrus fruits: Improvement of juice and polyphenols extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 46, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.024>
- Fauster, T., Schlossnikl, D., Rath, F., Ostermeier, R., Teufel, F., Toepfl, S., & Jaeger, H. (2018). Impact of pulsed electric field pretreatment on process performance of industrial French fries production. *Journal of Food Engineering*, 235, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.023>
- Ferreira-Holderbaum, D., Kon, T., Kudo, T., & Pedro Guerra, M. (2010). Enzymatic browning, polyphenol oxidase activity, and polyphenols in four apple cultivars: Dynamics during fruit development. *HortScience*, 45(8), 1150–1154. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.8.1150>
- Gamboa-Santos, J., Megías-Pérez, R., Soria, A. C., Olano, A., Montilla, A., & Villamiel, M. (2014). Impact of processing conditions on the kinetic of vitamin C degradation and 2-furoylmethyl amino acid formation in dried strawberries. *Food Chemistry*, 153, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.004>
- Gavahian, M., Chu, Y. H., & Sastry, S. (2018). Extraction from food and natural products by moderate electric field: Mechanisms, benefits, and potential industrial applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 1040–1052. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12362>
- Gavahian, M., & Farahnaky, A. (2018). Ohmic-assisted hydrodistillation technology: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 72, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.12.014>
- Gavahian, M., Pallares, N., Al Khawli, F., Ferrer, E., & Barba, F. J. (2020). Recent advances in the application of innovative food processing technologies for mycotoxins and pesticide reduction in foods. *Trends in Food Science and Technology*, 106, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.018>
- Gavahian, M., & Tiwari, B. K. (2020). Moderate electric fields and ohmic heating as promising fermentation tools. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 64, Article 102422. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102422>
- Ghasemi, J., Moradi, M., Karparvarfard, S. H., Golmakani, M. T., & Khaneghah, A. M. (2021). Thin layer drying kinetics of lemon verbena leaves: A quality assessment and mathematical modeling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 13(1), 59–72. <https://doi.org/10.15586/qas.v13i1.835>
- Golberg, A., Sack, M., Teissie, J., Pataro, G., Pliquet, U., Saulis, G., Stefan, T., Miklavcic, D., Vorobiev, E., & Frey, W. (2016). Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), Article 94. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0508-z>
- Gómez, B., Munekata, P. E. S., Gavahian, M., Barba, F. J., Martí-Quijal, F. J., Bolumar, T., Campagnol, P. C. B., Tomasevic, I., & Lorenzo, J. M. (2019). Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: An overview. *Food Research International*, 123, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.047>
- Guionet, A., Fujiwara, T., Sato, H., Takahashi, K., Takaki, K., Matsui, M., Tanino, T., & Ohshima, T. (2021). Pulsed electric fields act on tryptophan to inactivate α -amylase. *Journal of Electrostatics*, 112, Article 103597. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103597>
- Guionet, A., David, F., Zaepffel, C., Coustets, M., Helmi, K., Cheyde, C., Packan, D., Garnier, J. P., Blanckaert, V., & Teissie, J. (2015). *E. coli* electroirradiation on a closed loop circuit by using milli-, micro- and nanosecond pulsed electric fields: Comparison between energy costs. *Bioelectrochemistry*, 103, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.08.021>
- Han, Z., Cai, M. J., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2018). Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 75, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.017>
- Heinz, V., & Toepfl, S. (2022). Pulsed electric fields industrial equipment design. In J. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl (Eds.). *Pulsed electric fields technology for the food industry. Food engineering series* (pp. 489–504). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_17
- Hill, K., Ostermeier, R., Töpfl, S., & Heinz, V. (2022). Pulsed electric fields in the potato industry. In J. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl (Eds.). *Pulsed electric fields technology for the food industry. Food engineering series* (pp. 325–335). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_9
- Huang, D., Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sunden, B., & Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, Article 104950. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104950>
- Iaccheri, E., Castagnini, J. M., Rosa, D. M., & Rocculi, P. (2021a). New insights into the glass transition of dried fruits and vegetables and the effect of pulsed electric field treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102566. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102566>
- Iaccheri, E., Castagnini, J. M., Tylewicz, U., & Rocculi, P. (2021b). Modelling the mechanical properties and sorption behaviour of pulsed electric fields treated carrots and potatoes after air drying for food chain management. *Biosystems Engineering*, 223(B), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.011>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Cuéllar-Villarreal, M. del R., Welti-Chanes, J., Cisneros-Zevallos, L., Ramos-Parra, P. A., & Hernández-Brenes, C. (2017). Nonthermal processing technologies as elicitors to induce the biosynthesis and accumulation of nutraceuticals in plant foods. *Trends in Food Science and Technology*, 60, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.021>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Martínez-Hernández, G. B., Del C Rodríguez, S., Cao, C. M., & Cisneros-Zevallos, L. (2011). Plants as biofactories: Physiological role of reactive oxygen species on the accumulation of phenolic antioxidants in carrot tissue under wounding and hyperoxia stress. *Journal*

- of *Agricultural and Food Chemistry*, 59(12), 6583–6593. <https://doi.org/10.1021/jf2006529>
- Jin, T. Z., Yu, Y., & Gurtler, J. B. (2017). Effects of pulsed electric field processing on microbial survival, quality change and nutritional characteristics of blueberries. *LWT – Food Science and Technology*, 77, 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.009>
- Kandušer, M., Belič, A., Čorović, S., & Škrjanc, I. (2017). Modular Serial Flow Through device for pulsed electric field treatment of the liquid samples. *Scientific Reports*, 7(1), Article 8115. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08620-8>
- Kempkes, M., & Munderville, M. (2018). Pulsed electric fields (ИЭП) processing of fruit and vegetables. In *21st International Conference on Pulsed Power* (Article 17580667). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PPC.2017.8291186>
- Kumar, Y., Bashir, A. A., & Indore, N., Vishwakarma, R. K., & Singh, R. K. (2021). Pulsed electric field. In C. M. Galanakis (Ed.), *Sustainable food processing and engineering challenges* (pp. 137–179). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822714-5.00005-X>
- Kwao, S., Al-Hamimi, S., Damas, M. E. V., Rasmusson, A. G., & Gómez Galindo, F. (2016). Effect of guard cells electroporation on drying kinetics and aroma compounds of Genovese basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38(A), 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.011>
- Lamanauskas, N., Šatkauskas, S., Bobinaite, R., & Viškelis, P. (2015). Pulsed electric field impact on *Actinidia kolomikta* drying efficiency. *Journal of Food Process Engineering*, 38(3), 243–249. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12161>
- Lammerskitten, A., Mykhailyk, V., Wiktor, A., Toepfl, S., Nowacka, M., Bialik, M., Czyżewski, J., Witrowa-Rajchert, D., & Parniakov, O. (2019a). Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 57, Article 102211. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102211>
- Lammerskitten, A., Shorstkii, I., Parniakov, O., Mykhailyk, V., Toepfl, S., Rybak, K., Dadan, M., Nowacka, M., & Wiktor, A. (2020). The effect of different methods of mango drying assisted by a pulsed electric field on chemical and physical properties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(12), Article e14973. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14973>
- Lammerskitten, A., Wiktor, A., Siemer, C., Toepfl, S., Mykhailyk, V., Gondek, E., Rybak, K., Witrowa-Rajchert, D., & Parniakov, O. (2019b). The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples. *Journal of Food Engineering*, 252, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.006>
- Lasekan, O., Ng, S., Azeez, S., Shittu, R., Teoh, L., & Gholivand, S. (2017). Effect of pulsed electric field processing on flavor and color of liquid foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), 1–14. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12940>
- Li, J., Shi, J., Huang, X., Wang, T., Zou, X., Li, Z., Zhang, D., Zhang, W., & Xu, Y. (2020). Effects of pulsed electric field pretreatment on frying quality of fresh-cut lotus root slices. *LWT – Food Science and Technology*, 132, Article 109873. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109873>
- Li, X., Li, J., Wang, R., Rahaman, A., Zeng, X. A., & Brennan, C. S. (2021). Combined effects of pulsed electric field and ultrasound pretreatments on mass transfer and quality of mushrooms. *LWT – Food Science and Technology*, 150, Article 112008. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112008>
- Liu, C., Grimi, N., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2021). Effects of pulsed electric fields and preliminary vacuum drying on freezing assisted processes in potato tissue. *Food and Bioprocess Processing*, 125, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.11.002>
- Liu, C., Grimi, N., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2018). Effects of pulsed electric fields treatment on vacuum drying of potato tissue. *LWT – Food Science and Technology*, 95, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.090>
- Liu, C., Pirozzi, A., Ferrari, G., Vorobiev, E., & Grimi, N. (2020). Effects of pulsed electric fields on vacuum drying and quality characteristics of dried carrot. *Food and Bioprocess Technology*, 13(1), 45–52. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02364-1>
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., & Cárcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.001>
- López-Gámez, G., Elez-Martínez, P., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2020). Pulsed electric fields affect endogenous enzyme activities, respiration and biosynthesis of phenolic compounds in carrots. *Postharvest Biology and Technology*, 168, Article 111284. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111284>
- López, J., Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E., & Di Scala, K. (2010). Effect of air temperature on drying kinetics, vitamin C, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness of blueberries variety O’Neil. *Food and Bioprocess Technology*, 3(5), 772–777. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0306-8>
- Lung, C. T., Chang, C. K., Cheng, F. C., Hou, C. Y., Chen, M. H., Santoso, S. P., Yudhistira, B., & Hsieh, C. W. (2022). Effects of pulsed electric field-assisted thawing on the characteristics and quality of Pekin duck meat. *Food Chemistry*, 390, Article 133137. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133137>
- Mahnič-Kalamiza, S., Vorobiev, E., & Miklavčič, D. (2014). Electroporation in food processing and biorefinery. *Journal of Membrane Biology*, 247(12), 1279–1304. <https://doi.org/10.1007/s00232-014-9737-x>
- Mannozi, C., Tylewicz, U., Tappi, S., Rosa, M. D., Rocculi, P., & Romani, S. (2020). The influence of different pre-treatments on the quality and nutritional characteristics in dried undersized yellow kiwifruit. *Applied Sciences*, 10(23), Article 8432. <https://doi.org/10.3390/app10238432>
- Masood, H., Diao, Y., Cullen, P. J., Lee, N. A., & Trujillo, F. J. (2018). A comparative study on the performance of three treatment chamber designs for radio frequency electric field processing. *Computers and Chemical Engineering*, 108, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.09.009>
- Meza-Jiménez, M., De, L., Pokhrel, P. R., Robles de la Torre, R. R., Barbosa-Canovas, G. V., & Hernández-Sánchez, H. (2019).

- Effect of pulsed electric fields on the activity of food-grade papain in a continuous system. *LWT – Food Science and Technology*, 109, 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.037>
- Mohamed, M., & Eissa, A. (2012). Pulsed electric fields for food processing technology. In A. Amer Eissa (Ed.). *Structure and function of food engineering* (pp. 275–306). InTech.
- Morales-de la Peña, M., Welte-Chanes, J., & Martín-Belloso, O. (2019). Novel technologies to improve food safety and quality. *Current Opinion in Food Science*, 30, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.10.009>
- Mousakhani-Ganjeh, A., Amiri, A., Nasrollahzadeh, F., Wiktor, A., Nilghaz, A., Pratap-Singh, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Electro-based technologies in food drying – A comprehensive review. *LWT – Food Science and Technology*, 145, Article 111315. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111315>
- Neri, L., Giancaterino, M., Rocchi, R., Tylewicz, U., Valbonetti, L., Faieta, M., & Pittia, P. (2021). Pulsed electric fields (ИЭП) as hot air drying pre-treatment: Effect on quality and functional properties of saffron (*Crocus sativus* L.). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102592. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102592>
- Nguyen, T. M. C., Gavahian, M., & Tsai, P. J. (2021). Effects of ultrasound-assisted extraction (UAE), high voltage electric field (HVEF), high pressure processing (HPP), and combined methods (HVEF+UAE and HPP+UAE) on Gac leaves extraction. *LWT – Food Science and Technology*, 143, Article 111131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111131>
- Nowacka, M., Wiktor, A., Anuszevska, A., Dadan, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023>
- Nowosad, K., Sujka, M., Pankiewicz, U., & Kowalski, R. (2021). The application of technology in food processing and human nutrition. *Journal of Food Science and Technology*, 58(2), 397–411. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04512-4>
- Ostermeier, R., Giersemehl, P., Siemer, C., Töpfl, S., & Jäger, H. (2018). Influence of pulsed electric field pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. *Journal of Food Engineering*, 237, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.010>
- Ostermeier, R., Parniakov, O., Töpfl, S., & Jäger, H. (2020). Applicability of pulsed electric field (ИЭП) pre-treatment for a convective two-step drying process. *Foods*, 9(4), 9–12. <https://doi.org/10.3390/foods9040512>
- Pang, L., Lu, G., Cheng, J., Lu, X., Ma, D., Li, Q., Li, Z., Zheng, J., Zhang, C., & Pan, S. (2021). Physiological and biochemical characteristics of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) roots treated by a high voltage alternating electric field during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 180, Article 111619. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111619>
- Parniakov, O., Lebovka, N. I., Bals, O., & Vorobiev, E. (2015). Effect of electric field and osmotic pre-treatments on quality of apples after freezing-thawing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 29, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.03.011>
- Parniakov, O., Lebovka, N. I., Van Hecke, E., & Vorobiev, E. (2014). Pulsed electric field assisted pressure extraction and solvent extraction from mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 174–183. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1059-y>
- Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2016). Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.002>
- Pataro, G., & Ferrari, G. (2020). Limitations of pulsed electric field utilization in food industry. In F. J. Barba, O. Parniakov, & A. Wiktor (Eds.). *Pulsed electric fields to obtain healthier and sustainable food for tomorrow* (pp. 283–310). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816402-0.00013-6>
- Patel, S. M., Jameel, F., Sane, S. U., & Kamat, M. (2015). Lyophilization process design and development using QbD principles. In F. Jameel, S. Hershenson, M. Khan, & S. Martin-Moe (Eds.). *Quality by design for biopharmaceutical drug product development* (vol. 18, pp. 303–329). Springer Science. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2316-8_14
- Pereira, R. N., Galindo, F. G., Vicente, A. A., & Dejmek, P. (2009). Effects of pulsed electric field on the viscoelastic properties of potato tissue. *Food Biophysics*, 4(3), 229–239. <https://doi.org/10.1007/s11483-009-9120-0>
- Rahaman, A., Siddeeg, A., Manzoor, M. F., Zeng, X. A., Ali, S., Baloch, Z., Li, J., & Wen, Q. H. (2019). Impact of pulsed electric field treatment on drying kinetics, mass transfer, colour parameters and microstructure of plum. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2670–2678. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03755-0>
- Raso, J., Frey, W., Ferrari, G., Pataro, G., Knorr, D., Teissie, J., & Miklavčič, D. (2016). Recommendations guidelines on the key information to be reported in studies of application of technology in food and biotechnological processes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.003>
- Rybak, K., Samborska, K., Jedlinska, A., Parniakov, O., Nowacka, M., Witrowa-Rajchert, D., & Wiktor, A. (2020). The impact of pulsed electric field pretreatment of bell pepper on the selected properties of spray dried juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 65, Article 102446. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102446>
- Sack, M., Eing, C., Berghöfer, T., Buth, L., Stängle, R., Frey, W., & Bluhm, H. (2008). Electroporation-assisted dewatering as an alternative method for drying plants. *Transactions on Plasma Science*, 36(3), 2577–2585. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2002440>
- Salehi, F. (2020). Physico-chemical properties of fruit and vegetable juices as affected by pulsed electric field: A review. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1036–1050. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1775250>
- Saletnik, B., Zaguła, G., Aneta, S., Marcin, B., Ewelina, S., & Czesław, P. (2022). Effect of magnetic and electrical fields

- on yield, shelf life and quality of fruits. *Applied Sciences*, 12(6), Article 3183. <https://doi.org/10.3390/app12063183>
- Sampedro, F., McAloon, A., Yee, W., Fan, X., Zhang, H. Q., & Geveke, D. J. (2013). Cost analysis of commercial pasteurization of orange juice by pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.10.002>
- Sánchez-Vega, R., Elez-Martínez, P., & Martín-Belloso, O. (2014). Effects of high-intensity pulsed electric fields processing parameters on the chlorophyll content and its degradation compounds in broccoli juice. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), 1137–1148. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1152-2>
- Schottroff, F., Johnson, K., Johnson, N. B., Bédard, M. F., & Jaeger, H. (2020). Challenges and limitations for the decontamination of high solids protein solutions at neutral pH using pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 268, Article 109737. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109737>
- Shorstkii, I., Sosnin, M., Smetana, S., Toepfl, S., Parniakov, O., & Wiktor, A. (2022). Correlation of the cell disintegration index with Luikov's heat and mass transfer parameters for drying of pulsed electric field (ИЭП) pretreated plant materials. *Journal of Food Engineering*, 316, Article 110822. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110822>
- Singh, M., Patra, S., & Rajesh, K. S. (2021). Common techniques and methods for screening of natural products for developing of anticancer drugs. In A. K. Srivastava, V. K. Kannaujia, R. K. Singh, & D. Singh (Eds.). *Evolutionary diversity as a source for anticancer molecules* (pp. 323–353). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821710-8.00015-1>
- Sulaimana, A. S., Chang, C.-K., Hou, C.-Y., Yudhistira, B., Punthi, F., Lung, C.-T., Cheng, K.-C., Santoso, S. P., & Hsieh, C.-W. (2021). Effect of oxidative stress on physicochemical quality of Taiwanese seagrape (*Caulerpa lentillifera*) with the application of alternating current electric field (ACEF) during post-harvest storage. *Processes*, 9(6), Article 1011. <https://doi.org/10.3390/pr9061011>
- Sun, J., Bai, W., Zhang, Y., Liao, X., & Hu, X. (2011). Effects of electrode materials on the degradation, spectral characteristics, visual colour, and antioxidant capacity of cyanidin-3-glucoside and cyanidin-3-sophoroside during pulsed electric field treatment. *Food Chemistry*, 128(3), 742–747. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.099>
- Sun, T., & Ling, F. (2021). Optimization method of microwave drying process parameters for rice. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 13(3), 10–20. <https://doi.org/10.15586/qas.v13i3.917>
- Tamer, C., Isci, A., Kutlu, N., Sakiyan, O., Sahin, S., & Sumnu, G. (2016). Effect of drying on porous characteristics of orange peel. *International Journal of Food Engineering*, 12(9), 921–928. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0075>
- Tanino, T., Hirosawa, M., Moteki, R., Matsui, M., & Ohshima, T. (2020). Engineering of pulsed electric field treatment using carbon materials as electrode and application to pasteurization of sake. *Journal of Electrostatics*, 104, Article 103424. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103424>
- Telfser, A., & Galindo, F. G. (2019). Effect of reversible permeabilization in combination with different drying methods on the structure and sensorial quality of dried basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *LWT – Food Science and Technology*, 99, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.062>
- Terefe, N. S., Buckow, R., & Versteeg, C. (2015). Quality-related enzymes in plant-based products: Effects of novel food processing technologies part 2: Pulsed electric field processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(1), 1–5. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.701253>
- Timmermans, R. A. H., Mastwijk, H. C., Berendsen, L. B. J. M., Nederhoff, A. L., Matser, A. M., Van Boekel, M. A. J. S., & Nierop Groot, M. N. (2019). Moderate intensity Pulsed Electric Fields as alternative mild preservation technology for fruit juice. *International Journal of Food Microbiology*, 298, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.02.015>
- Toepfl, S., & Knorr, D. (2006). Pulsed electric fields as a pretreatment technique in drying processes. *Stewart Postharvest Review*, 4(3), 1–6. <https://doi.org/10.2212/spr.2006.4.3>
- Toepfl, S., Siemer, C., Saldaña-Navarro, G., & Heinz, V. (2014). Overview of pulsed electric fields processing for food. In D.-W. Sun (Ed.). *Emerging technologies for food processing* (2nd ed., pp. 93–114). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-411479-1.00006-1>
- Tomasi, J. D. C., De Lima, G. G., Wendling, I., Helm, C. V., Hansel, F. A., De Godoy, R. C. B., Grunennvaldt, R. L., De Melo, T. O., Tomazzoli, M. M., & Deschamps, C. (2021). Effects of different drying methods on the chemical, nutritional and colour of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves. *International Journal of Food Engineering*, 17(7), 551–560. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0312>
- Tylewicz, U., Mannozi, C., Castagnini, J. M., Genovese, J., Romani, S., Rocculi, P., & Rosa, M. D. (2022). Application of ИЭП- and OD-assisted drying for kiwifruit waste valorisation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, Article 102952. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102952>
- Tylewicz, U., Tappi, S., Mannozi, C., Romani, S., Dellarosa, N., Laghi, L., Ragni, L., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2017). Effect of pulsed electric field (ИЭП) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. *Journal of Food Engineering*, 213, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.028>
- Vaessen, E. M. J., Timmermans, R. A. H., Tempelaars, M. H., Schutyser, M. A. I., & den Besten, H. M. W. (2019). Reversibility of membrane permeabilization upon pulsed electric field treatment in *Lactobacillus plantarum* WCFS1. *Scientific Reports*, 9(1), Article 19990. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56299-w>
- Van Wyk, S., Silva, F. V. M., & Farid, M. M. (2019). Pulsed electric field treatment of red wine: Inactivation of *Brettanomyces* and potential hazard caused by metal ion dissolution. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.11.001>

- Voda, A., Homan, N., Witek, M., Duijster, A., van Dalen, G., van der Sman, R., Nijssse, J., van Vliet, L., Van As, H., & van Duynhoven, J. (2012). The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot. *Food Research International*, 49(2), 687–693. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.08.019>
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2019). Pulsed electric field in green processing and preservation of food products. In F. Chemat, E. Vorobiev (Eds.). *Green food processing techniques* (pp. 403–430). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815353-6.00015-x>
- Waghmare, R. (2021). Refractance window drying: A cohort review on quality characteristics. *Trends in Food Science and Technology*, 110(50), 652–662. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.030>
- Wang, Q., Li, Y., Sun, D. W., & Zhu, Z. (2018). Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: Principles and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2285–2298. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1434609>
- Wiktor, A., Dadan, M., Nowacka, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). The impact of combination of pulsed electric field and ultrasound treatment on air drying kinetics and quality of carrot tissue. *LWT – Food Science and Technology*, 110, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.060>
- Wiktor, A., Gondek, E., Jakubczyk, E., Dadan, M., Nowacka, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2018). Acoustic and mechanical properties of carrot tissue treated by pulsed electric field, ultrasound and combination of both. *Journal of Food Engineering*, 238, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.001>
- Wiktor, A., Iwaniuk, M., Śledź, M., Nowacka, M., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2013). Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technology*, 31(1), 112–119. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.724128>
- Wiktor, A., Lammerskitten, A., Barba, F. J., Michalski, M., Toepfl, S., & Parniakov, O. (2021). Drying processes assisted by ИЭП for plant-based materials. In K. Knoerzer, K. Muthukumarappan (Eds.). *Innovative food processing technologies: A comprehensive review* (pp. 272–275). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815781-7.00001-9>
- Wiktor, A., Nowacka, M., Dadan, M., Rybak, K., Lojkowski, W., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). The effect of pulsed electric field on drying kinetics, color, and microstructure of carrot. *Drying Technology*, 34(11), 1286–1296. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1105813>
- Wiktor, A., Sledz, M., Nowacka, M., Rybak, K., Chudoba, T., Lojkowski, W., & Witrowa-Rajchert, D. (2015). The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.04.004>
- Wiktor, A., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). Pulsed electric fields as pretreatment for subsequent food process operations. In D. Miklavcic (Ed.). *Handbook of electroporation* (pp. 1–16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26779-1_178-1
- Won, Y. C., Min, S. C., & Lee, D. U. (2015). Accelerated drying and improved color properties of red pepper by pretreatment of pulsed electric fields. *Drying Technology*, 33(8), 926–932. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.999371>
- Wu, Y., & Zhang, D. (2019). Pulsed electric field enhanced freeze-drying of apple tissue. *Czech Journal of Food Sciences*, 37(6), 432–438. <https://doi.org/10.17221/230/2018-CJFS>
- Yamakage, K., Yamada, T., Takahashi, K., Takaki, K., Komuro, M., Sasaki, K., Aoki, H., Kamagata, J., Koide, S., & Orikasa, T. (2021). Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 68, Article 102615. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102615>
- Yu, Y., Jin, T. Z., & Xiao, G. (2017). Effects of pulsed electric fields pretreatment and drying method on drying characteristics and nutritive quality of blueberries. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), Article e13303. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13303>
- Zderic, A., & Zondervan, E. (2016). Polyphenol extraction from fresh tea leaves by pulsed electric field: A study of mechanisms. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 586–592. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.03.010>
- Zderic, A., Zondervan, E., & Meuldijk, J. (2013). Breakage of cellular tissue by pulsed electric field: Extraction of polyphenols from fresh tea leaves. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1795–1800. <https://doi.org/10.3303/CET1332300>
- Zhang, C., Yang, Y. H., Zhao, X. D., Zhang, L., Li, Q., Wu, C., Ding, X., & Qian, J. Y. (2021). Assessment of impact of pulsed electric field on functional, rheological and structural properties of vital wheat gluten. *LWT – Food Science and Technology*, 147, Article 111536. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111536>
- Zhang, S., Sun, L., Ju, H., Bao, Z., Zeng, X., & Lin, S. (2021). Research advances and application of pulsed electric field on proteins and peptides in food. *Food Research International*, 139(1), Article 109914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109914>
- Zhang, Z. H., Wang, L. H., Zeng, X. A., Han, Z., & Brennan, C. S. (2019). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 1–13. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13903>
- Zhang, Z. H., Zeng, X. A., Brennan, C. S., Brennan, M., Han, Z., & Xiong, X. Y. (2015). Effects of pulsed electric fields (ИЭП) on vitamin C and its antioxidant properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(10), 24159–24173. <https://doi.org/10.3390/ijms161024159>
- Zhang, Z., Zhang, B., Yang, R., & Zhao, W. (2020). Recent developments in the preservation of raw fresh food by pulsed electric field. *Food Reviews International*, 38(1), 247–265. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1860083>
- Zhao, W., Yang, R., & Zhang, H. Q. (2012). Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins. *Trends in Food Science and Technology*, 27(2), 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.05.007>

УДК 633.35: 547.915

Изменения жирнокислотного состава и липидного профиля зерна гороха и фасоли при проращивании

¹ Омский Государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, г. Омск, Россия

² Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Республика Башкортостан

А. Л. Вебер¹, С. А. Леонова²

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Вебер Анна Леонидовна

E-mail: a.l.veber@omgau.org

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Вебер, А. Л., & Леонова, С. А. (2023). Изменения жирнокислотного состава и липидного профиля зерна гороха и фасоли при проращивании. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 72-89. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.436>

ПОСТУПИЛА: 01.03.2023

ПРИНЯТА: 17.06.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: По современным представлениям, для сбалансированного питания здорового человека необходимо наличие в рационе не только полноценного белка, микро- и макронутриентов, но и эссенциальных жирных кислот. Зерно гороха и фасоли является доступной альтернативой животному белку, содержит минимальное количество жира, однако его биологическая ценность обусловлена высоким содержанием незаменимых полиненасыщенных жирных кислот. Для получения растительной дисперсии из зерна гороха и фасоли с целью ее дальнейшего применения в технологии продуктов сегмента «dairy alternatives» использовали процесс проращивания, который, в том числе, может изменять жирнокислотный состав и липидный профиль зерна.

Цель: Изучение влияния процесса проращивания на жирнокислотный состав и липидный профиль зерна гороха и фасоли.

Материалы и методы: Изучен жирнокислотный состав и липидный профиль зерна гороха сортов селекции Башкирского НИИ сельского хозяйства УФИЦ РАН (Чишминский 95, Чишминский 229, Памяти Хангильдина) и фасоли сортов селекции ФГБОУ ВО Омского ГАУ (Омичка и Лукерья) до и после проращивания. Липиды из зерна гороха и фасоли исследуемых сортов экстрагировали методом Фолча. Качественный и количественный жирнокислотный состав липидов зерна определяли методом газовой хроматографии, триацилглицериды идентифицировали методом MALDI-TOF, жирнокислотный состав триацилглицеридов определяли методом газовой хромато-масс-спектрометрии.

Результаты: Установлено, что содержание триацилглицеридов в зерне гороха и фасоли исследуемых сортов составляет от 53,20 до 55,74 % и от 56,56 до 57,73 % от общего количества липидов, соответственно. В триацилглицеридах всех изученных сортов идентифицированы остатки ненасыщенных жирных кислот и глицерина, за исключением гороха сорта Чишминский 95. Во всех исследуемых сортах гороха и фасоли наибольший удельный вес занимают пальмитиновая, стеариновая, линолевая, α -линоленовая и олеиновая кислоты. Доминирующей полиненасыщенной жирной кислотой для всех исследуемых сортов гороха является линолевая, для сортов фасоли α -линоленовая. Установлено, что липиды зерна гороха сорта Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка имеют наибольшую физиологическую ценность, ввиду большего содержания полиненасыщенных жирных кислот, являющихся незаменимыми для человека. Также в ходе исследования установлено, что в результате проращивания происходит качественное и количественное перераспределение жирных кислот, в том числе в триацилглицеридах зерна.

Выводы: Достигнутое в результате проращивания увеличение содержания полиненасыщенной линолевой жирной кислоты способствует достижению повышенной пищевой ценности зерна.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

проращивание, горох, фасоль, триацилглицериды, полиненасыщенные жирные кислоты, насыщенные жирные кислоты, липиды

Changes in the Fatty Acid Composition and Lipid Profile of Pea and Bean Grains during Sprouting

Anna L. Veber¹, Svetlana A. Leonova²

¹ Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Russian Federation, Omsk, Russia

² Bashkir State Agrarian University, Russian Federation, Ufa, Republic of Bashkortostan

CORRESPONDENCE:

Anna L. Veber

E-mail: a.l.veber@omgau.org

FOR CITATIONS:

Veber, A. L., & Leonova, S. A. (2023). Changes in the fatty acid composition and lipid profile of pea and bean grains during germination. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 72-89. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.436>

RECEIVED: 01.03.2023

ACCEPTED: 17.06.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: According to modern concepts, a balanced diet for a healthy person requires not only high-quality protein, micro- and macronutrients, but also essential fatty acids. The grain of peas and beans represents an affordable alternative to animal protein, contains a minimal amount of fat, however, its biological value is due to a high content of indispensable polyunsaturated fatty acids. To obtain plant dispersion from pea and bean grain for its further use in the technology of "dairy alternatives" segment products, the sprouting process was used, which, among other things, may alter the fatty acid composition and lipid profile of the grain.

Purpose: Investigate the impact of the sprouting process on the fatty acid composition and lipid profile of pea and bean grain.

Materials and Methods: The fatty acid composition and lipid profile of pea grain varieties selected by Bashkir Research Institute of Agriculture of Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Chishminsky 95, Chishminsky 229, In Memory of Khangildin) and bean varieties selected by Omsk State Agrarian University (Omichka and Lukerya) were studied before and after sprouting. Lipids from pea and bean grain of the studied varieties were extracted using the Folch method. The qualitative and quantitative fatty acid composition of grain lipids was determined by gas chromatography, triglycerides were identified by MALDI-TOF, and the fatty acid composition of triglycerides was determined by gas chromatography-mass spectrometry.

Results: It was found that the content of triglycerides in the grain of peas and beans of the studied varieties ranges from 53.20 to 55.74% and from 56.56 to 57.73% of the total amount of lipids, respectively. Residues of unsaturated fatty acids and glycerol, except for peas of the Chishminsky 95 variety, were identified in the triglycerides of all studied varieties. In all studied varieties of peas and beans, palmitic, stearic, linoleic, α -linolenic, and oleic acids have the largest specific weight. The dominant polyunsaturated fatty acid for all studied varieties of peas is linoleic, for bean varieties α -linolenic. It was found that the lipids of pea grain of the In Memory of Khangildin variety and bean of the Omichka variety have the highest physiological value, due to the higher content of polyunsaturated fatty acids, which are indispensable for humans. Also, during the study, it was found that as a result of sprouting, a qualitative and quantitative redistribution of fatty acids occurs, including in the triglycerides of the grain.

Conclusion: The increase in the content of polyunsaturated linoleic fatty acid achieved as a result of sprouting contributes to achieving increased food value of the grain.

KEYWORDS

sprouting, peas, beans, triglycerides, polyunsaturated fatty acids, saturated fatty acids, lipids

ВВЕДЕНИЕ

При избытке продуктов питания, отсутствии продовольственного голода наблюдаются нарушения структуры питания населения, которые характеризуются в том числе, дефицитом полиненасыщенных жирных кислот (Попова с соавт., 2021), о чем свидетельствуют результаты выборочного наблюдения фактического питания населения РФ, выполненного Росстатом в 2018 г. (Тутельян с соавт., 2021). Сложившаяся ситуация является следствием недостаточной информированности потребителей о пользе жира, что привело к исключению из рациона продуктов с высоким содержанием жировых компонентов, в том числе эссенциальных жирных кислот и/или к уменьшению общего количества потребляемых пищевых жиров (Фролова с соавт., 2021), при том, что жиры являются незаменимым фактором питания и обязательным компонентом пищи. Необходимо помнить, что значение имеет не только количество, но и химический состав жиров, который предопределяет их биологическую ценность и активность (Петрова с соавт., 2019).

Общеизвестно, что бобовые культуры являются источником белка (Босак & Сачивко, 2018; Veber et al., 2020) и крахмала (Колпакова с соавт., 2021), содержат антиалиментарные вещества (Вебер с соавт., 2019) и минимальное количество жира, являющегося источником жирных кислот различного строения, в том числе полиненасыщенных (эссенциальных) жирных кислот.

К эссенциальным относят линолевую, линоленовую, арахидоновую и некоторые другие полиненасыщенные жирные кислоты. Эссенциальные жирные кислоты принято подразделять на две группы: 1-я группа — семейство линолевой ω -6 кислоты (преобладают в растительных жирах) и 2-я группа — семейство α -линоленовой ω -3 кислоты (преобладают в морских продуктах) (Лебская с соавт., 2020; Томczyk, 2018; Витол с соавт., 2023). Их физиологическая роль многогранна: улучшение синтеза белка, состояния клеточных мембран, чувствительности к инсулину; защита сердца; предотвращение образования жировых бляшек в сосудах; синтез в организме ряда биологически активных веществ и т.д. (Гладышев, 2012; Воловик с соавт., 2019; Широкова с соавт., 2022).

Во многих регионах нашей страны ведутся селекционные работы по созданию высокопродуктивных, ценных по качеству зерна сортов бобовых культур (Давлетов с соавт., 2020). Только за период с 2017 по 2020 год созданы и переданы на государственное сортоиспытание 69 новых экологических сортов зернобобовых культур, в том числе 41 новый сорт гороха, 7 новых сортов фасоли обыкновенной. Впервые включены в Государственный реестр селекционных достижений РФ и предложены к возделыванию в различных регионах более 70 новых сортов, в том числе 25 сортов гороха и 9 сортов фасоли (Зотиков с соавт., 2018; Зотиков с соавт., 2020).

Несмотря на существующий генофонд зернобобового сырья, в том числе зерна фасоли и гороха, уровень осведомленности о жирнокислотном составе недостаточен. Липиды бобовых культур, в том числе гороха и фасоли, относят к малоизученной группе биологически активных веществ. По химическому строению сырой жир (свободные липиды) зерна гороха и фасоли представляет собой смесь сложных эфиров триацилглицеринов (триацилглицеридов) и сопутствующих веществ (Ogori, 2020; Cholewski et al., 2018). Они различаются по жирнокислотному составу, а также по позиционному распределению жирных кислот в триацилглицеринах (Yoshida et al., 2009), что зависит от множества факторов (Yoshida et al., 2007). К примеру, жирнокислотный состав гороха приблизительно идентичен маслу сои, при этом в горохе отмечено повышенное содержание глицеридов пальмитиновой и олеиновой кислот (Grela & Gunter, 1995). В образцах гороха сортов Daisy rogne, Asgrow seed, Frio доминирующая роль принадлежит пальмитиновой и стеариновой кислотам, в образцах гороха сорта Dans panatenuns — стеариновой и олеиновой кислотам, в образцах гороха сорта Vega — линолевой кислоте. При этом установлено, что у образца гороха сорт Dans panatenuns наименьшее содержание глицеридов линоленовой кислоты (Василенко с соавт., 2017).

Общеизвестно, что одним из самых эффективных способов изменения биологической ценности растительного сырья, включая повышение уровня усвояемости основных нутриентов и снижение или устранение антиалиментарных факторов, является процесс проращивания (Bautista-Expósito et al., 2021; Самофалова & Сафронова, 2017). На примере некоторых культур и сортов установлено качественное и количественное изменение не только

аминокислотного состава, но и увеличение активности протеаз, декстринирующей и осахаривающей способности (Kim et al., 2008). Подтверждено снижение содержания антиалиментарных веществ и увеличение биологической и пищевой ценности сырья, зафиксировано снижение липидов (Samtiya et al., 2020; Шаршунов с соавт., 2016). Однако, данные о качественных и количественных изменениях жирнокислотного состава зерна гороха и фасоли отечественной селекции весьма немногочисленны.

Цель исследования — определение липидного профиля и жирнокислотного состава зерна гороха и фасоли отечественных сортов до и после проращивания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты

Зерно гороха селекции Башкирского НИИ сельского хозяйства УФИЦ РАН (БНИИСХ, Республика Башкортостан) сортов Чишминский 95, Чишминский 229, Памяти Хангильдина, выращенное в условиях селекционного центра БашНИИСХ. Зерно фасоли селекции ФГБОУ ВО Омского ГАУ сортов Омичка и Лукерья, выращенное в условиях учебно-опытного хозяйства Омского ГАУ.

Оборудование

Газовый хромато-масс-спектрометр Agilent technology 5973N/6890N MSD/DS (США), масс-спектрометр Autoflex MALDI-TOF (Германия), газовый хроматограф Shimadzu GS -2010-Plus (Япония), роторный испаритель RV 8 V-C (IKA, Германия), лабораторная установка солеидного типа, установка «Смарт — спраутер «Росинка», изготовленная и испытанная в лабораторных условиях кафедры технического сервиса, механики и электротехники факультета технического сервиса в АПК ФГБОУ ВО ОмГАУ им. П.А. Столыпина.

Методы

Исследование жирнокислотного состава зерна гороха и фасоли исследуемых сортов осуществляли по ГОСТ 31663–2012¹; липидного профиля хромато-масс-спектрометрией — по ГОСТ Р 8.795–2012², ГОСТ 28366–89³.

Подготовка растительных образцов к анализу

К измельченным образцам добавляли 5 объемов смеси Фолча (соотношение хлороформ-метанола (2:1 по объему). Полученную смесь встряхивали в течение 10–15 минут и гомогенизировали в течение 5 мин при скорости вращения ротора 3000 об/мин. Экстракт отделяли от осадка, сливали в мерный цилиндр. Полученный осадок экстрагировали 3 раза. Далее осадок вместе с экстрактом количественно переносили в мерный цилиндр, перемешивали и центрифугировали при 3000 об/мин в течение 20 мин. Центрифугат отмывали от нелипидных примесей 0,73%-м водным раствором NaCl в объеме, составляющем 20% от объема экстракта липидов. Экстракт перемешивали и центрифугировали при 2500 об/мин в течение 15–20 мин. Для дальнейших исследований использовали хлороформный раствор липидов (нижняя фаза). Поверхность нижней фазы и внутренние стенки центрифужной пробирки ополаскивали смесью растворителей хлороформ — метанол — водный раствор NaCl (3:48:47), избегая перемешивания нижней фазы и промывной смеси. Промывную смесь сливали, процедуру промывания повторяли еще 2 раза. К хлороформному раствору липидов прибавляли по каплям метанол до образования однофазной системы, который количественно переносили в предварительно подготовленную круглодонную колбу и упаривали на роторном испарителе RV 8 V-C (IKA, Германия). Колбу с осадком липидов доводили до постоянного веса в вакуум-эксикаторе над КОН. Количество полученных липидов определяли гравиметрическим методом с точностью до 0,000001 г и рассчитывали содержание липидов в процентах с учетом взятой навески.

¹ ГОСТ 31663–2012. (2019). *Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот*. М.: Стандартинформ.

² ГОСТ 8.795–2012. (2019). *Методики идентификации химических веществ методом хромато-масс-спектрометрии. Общие требования*. М.: Стандартинформ.

³ ГОСТ 28366–89. (2010). *Реактивы. Метод тонкослойной хроматографии*. М.: Стандартинформ.

Для анализа качественного и количественного жирнокислотного состава липидов зерна получали метиловые эфиры жирных кислот и исследовали их методом газовой хроматографией. Для анализа качественного и количественного жирнокислотного состава триацилглицеридов зерна получали метиловые эфиры жирных кислот из триглицеридов и исследовали их методом газовой хромато-масс-спектрометрии. Для этого к экстракту после удаления растворителя добавляли 2,0 см³ гексана, затем раствор переносили в пробирку типа Эппендорф, добавляли 0,1 см³ раствора метилата натрия в метаноле молярной концентрации 2 моль/дм³. После интенсивного перемешивания в течение 2 минут реакционную смесь отстаивали 5 минут и верхний слой, содержащий метиловые эфиры жирных кислот, фильтровали через бумажный фильтр.

Условия анализа ГХ/МС

Анализ метиловых эфиров жирных кислот триглицеридов зерна исследуемых сортов проводили с использованием газового хромато-масс-спектрометра Agilent technology 5973N/6890N MSD/DS (США). Для разделения использовали капиллярную колонку HP-5MS 30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм. Тип ионизации — электронный удар (EI), энергия ионизации 70 эВ. Газ-носитель — гелий; скорость потока газа — 1 мл/мин; объем вводимой пробы 1 мкл. Использовали программируемый режим температур термостата — нагрев от 40 до 280 °С со скоростью 30 °С/мин. Температура испарителя 270 °С (Лютикова с соавт., 2013).

Условия анализа ГЖХ

Жирнокислотный состав липидов определяли методом газожидкостной хроматографией на хроматографе Shimadzu GS -2010-Plus (Япония) с пламенно-ионизационным детектором (FID). Длина колонки 50 м, диаметр 0,32 мм, скорость потока 80 мл/мин, температура инжектора 240 °С, температура детектора 260 °С.

Идентификация и количественное определение жирных кислот и их эфиров

Для идентификации пиков метиловых эфиров жирных кислот использовали стандарты метило-

вых эфиров (Sigma, США) и данные библиотеки масс-спектров.

Выделение триацилглицеридов и их исследование методом MALDI-TOF

Полученный сухой остаток растворяли в смеси гексан:ацетон (2 :1). Разделение липидов проводили методом тонкослойной хроматографии на пластинках с силикагелем «Силуфол». На линию старта наносили пипеткой с дозатором анализируемую смесь, затем помещали пластинку в хроматографическую камеру с системой растворителей петролейный эфир — диэтиловый эфир — ацетон (90:10:1). После достижения элюентом линии финиша пластинку вынимали и давали растворителю испариться. Для проявления пятен липидов пластинку помещали в закрытую емкость с кристаллами йода. После хроматографического разделения компоненты из участков силикагеля элюировали применяя смесь гексан-ацетон (8 : 2), фракции объемом по 1,5 мл собирали, проводили тонкослойную хроматографию и элюировали. Растворитель отгоняли под вакуумом. Массы полученных фракций определяли гравиметрическим методом.

На следующем этапе снимали масс-спектры фракций, в которых обнаруживали липиды, в диапазоне от 400 до 1200 Da, на приборе Autoflex MALDI-TOF. Для этого в пробирку помещали 10 мг вещества, которое растворяли в 1 мл смеси ацетонитрила и 0,1 % трифторуксусной кислоты, взятых в соотношениях 7:1. Содержимое встряхивали на шейкере. Полученные растворы наносили на мишень «MTP 384 target plate matt steel TF», сверху наносили каплю матрицы после высыхания. В качестве матрицы использовали α-циано-4-гидроксикоричную кислоту (Новиков с соавт., 2013). После высушивания проб мишень помещали в масс-спектрометр и регистрировали масс-спектры испытуемых образцов.

Процедура

Для проведения эксперимента использовали селекционные сорта зерна гороха и фасоли соответствующие требованиям ГОСТ 28674–2019⁴ «Горох. Технические условия» и ГОСТ 7758–2020⁵ «Фасоль

⁴ ГОСТ 28674–2019. (2019). *Горох. Технические условия*. М.: Стандартинформ.

⁵ ГОСТ 7758–2020. (2022). *Фасоль продовольственная. Технические условия*. М.: Стандартинформ.

продовольственная. Технические условия» соответственно. Биохимический состав зерна исследованных сортов за период с 2017 по 2019 год варьировал по сортам и годам исследований (Таблица 1).

Липиды из зерна гороха и фасоли исследуемых сортов экстрагировали методом Фолча. Исследование жирнокислотного состава липидов зерна гороха и фасоли исследуемых сортов осуществляли по стандартной методике. Для анализа качественного и количественного жирнокислотного состава триацилглицеридов получали метиловые эфиры жирных кислот из триглицеридов. Для этого к экстракту после удаления растворителя добавляли 2,0 см³ гексана. Затем раствор переносили в пробирку типа Эппендорф, добавляли 0,1 см³ раствора метилата натрия в метаноле молярной концентрации 2 моль/дм³. Реакционную смесь после перемешивания и отстаивания фильтровали через бумажный фильтр и исследовали методом газовой хромато-масс-спектрометрией (ГХ-МС). Для идентификации триацилглицеридов проводили разделение липидов методом тонкослойной хроматографии на пластинах с силикагелем «Силуфол». Массы полученных фракций определяли гравиметрическим методом, масс-спектры фракций, в которых обнаруживали липиды, снимали в диапазоне от 400 до 1200 Da, на приборе Autoflex MALDI-TOF. Липидный профиль и жирнокислотный состав зерна гороха и фасоли исследованных сортов определяли до и после проращивания.

Для проращивания использовали установку «Смарт — спраутер «Росинка», в основу которой заложена технология аэропоники. Установка по-

зволяет имитировать природоподобную среду для проращивания при помощи автоматических программ. Технологический алгоритм проведения эксперимента заключался в следующем. В емкость с крышкой для проращиваемого зерна на неподвижных опорах, выполненную с непроницаемыми стенками и сетчатым днищем, размещали лотки с зерном гороха и фасоли исследуемых сортов, предварительно подвергнутые замачиванию в омагниченной воде, в соответствии с установленными режимами. В установку с автоматическим регулированием влажности от 40 до 90% ультразвуковым парогенератором, который разбивает воду в мелкую пыль и смешивает её с воздухом, подаются водяные пары (аэрозоль), в результате чего происходит равномерное влагопоглощение зерном и обогащение кислородом воздуха. Для поддержания температуры и дополнительного облучения зерна используют инфракрасные излучатели, благодаря которым прогревается зерно и биостимулируется процесс проращивания (Алгазин с соавт., 2017). Процесс проращивания образцов вели до появления ростка 2–3 мм.

Для омагничивания питьевой воды централизованной системы питьевого водоснабжения была использована экспериментальная лабораторная установка соленоидного типа. Питание электромагнитного аппарата осуществлялось от сети переменного тока 50 Гц через регулятор напряжения. Максимальное значение силы тока составляло 4,5 А. Воду нагревали до температуры 40–42 °С и многократно (10 обработок) пропускали по стеклянной трубке при напряженности магнитного поля 300–400 Э (эрстед), что соответствует 15 мТ. Длина пути прохождения воды в магнитном поле — 20 см.

Таблица 1

Биохимический состав зерна исследованных сортов гороха и фасоли

Показатель	Горох сорт			Фасоль сорт	
	Чишминский 95	Чишминский 229	Памяти Хангильдина	Омичка	Лукерья
Массовая доля белка, %	22,80–23,30	22,00–23,00	23,70–24,28	23,30–24,10	19,40–22,80
Массовая доля жира, %	1,10–1,80	1,00–1,50	1,00–1,80	1,30–1,80	1,25–1,90
Массовая доля крахмала, %	36,20–38,05	36,70–38,60	35,90–39,90	42,60–43,40	44,80–45,20
Массовая доля сырой клетчатки, %	7,65–8,02	7,35–7,85	7,99–8,40	9,00–9,23	9,26–10,90
Массовая доля золы, %	3,50–3,60	3,40–3,60	3,00–3,10	3,20–3,50	3,00–3,70
Влажность, %	12,50–15,00	13,30–15,00	13,50–15,00	16,00–16,20	16,20–17,00

Анализ данных

Статистическую обработку данных проводили, используя методы математической статистики с применением программного обеспечения Microsoft Excel (версия 2019 г.). Для обработки результатов исследований вычисляли средние арифметические значения величин из трех измерений для каждого опытного образца, стандартное отклонение не превышало 3,0% при доверительной вероятности $P = 0,95$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследований в результате разделения липидов проведена идентификация триацилглицеридов. В Таблице 2 перечислены идентифицированные остатки жирных кислот и глицерина.

Общее содержание липидов в зерне гороха и фасоли исследуемых сортов варьировалось от 1,17 до 1,50% и от 1,50 до 1,60% соответственно. Наибольшее количество липидов содержалось в зерне гороха сорта Памяти Хангильдина (1,50%) и фасоли сорта Лукерья (1,60%). Содержание триацилглицеридов в зерне гороха и фасоли исследованных сортов изменялось от 53,20 до 55,74% и от 56,56 до 57,73% от суммы липидов в зерне, соответственно. Оставшееся количество липидов приходится на свободные жирные кислоты, стерины и их эфиры, полярные липиды и фосфолипиды. Полученные результаты исследований согласуются с результатами других ученых (Никифорова с соавт., 2010; Mabaleha & Yeboah, 2004), которые в своих исследованиях установили, что триацилглицериды являются преобладающей фракцией липидов нативного зерна гороха (46,16% от суммы липидов в зерне) и фасоли (56,4–61,1% от суммы липидов в зерне). В триацилглицеридах зерна гороха и фасоли всех изученных сортов идентифицированы

Таблица 2

Результаты анализа триацилглицеридов зерна гороха и фасоли исследуемых сортов

Триацилглицерид	Горох, сорт			Фасоль, сорт	
	Чишминский 95	Чишминский 229	Памяти Хангильдина	Омичка	Лукерья
Значение показателя, % от суммы липидов					
Линолеоил-олеоил-пальмитоилглицерин	–	–	–	33,05 ± 1,494	–
Три (9,12-гептадекадиеноил) глицерин	–	–	–	17,28 ± 0,352	–
Трипальмитоилглицерин	–	–	–	4,58 ± 0,794	–
Пальмитоил-дистеароилглицерин	–	12,88 ± 0,652	–	1,66 ± 0,874	–
Линолеоил-пальмитоил-стеароилглицерин	–	13,71 ± 0,716	–	–	35,30 ± 1,336
Гексадеканоил-(5,9-гептадекадиеноил)-октадеканоилглицерин	–	–	–	–	13,09 ± 0,598
Брассидиноил-пальмитоил-стеароилглицерин	–	–	–	–	9,34 ± 0,698
Дипальмитоил-стеароилглицерин	–	26,61 ± 1,814	–	–	–
Тристеароилглицерин	8,94 ± 0,949	–	–	–	–
Диизостеароил-пальмитоилглицерин	45,86 ± 1,354	–	–	–	–
Линолеоил-олеоил-пальмитоилглицерин и/или изостеароил-линолеоил-пальмитоилглицерин	–	–	53,32 ± 2,540	–	–
Линолэлаидоил-диолеоилглицерин	–	–	2,42 ± 0,612	–	–
Сумма	54,80 ± 2,820	53,20 ± 2,725	55,74 ± 2,198	56,56 ± 2,096	57,73 ± 2,554
Общее содержание липидов, %	1,42 ± 0,076	1,17 ± 0,058	1,5 ± 0,010	1,5 ± 0,100	1,6 ± 0,095

остатки ненасыщенных жирных кислот и глицерина, за исключением гороха сорт Чишминский 95.

На втором этапе исследований был установлен жирнокислотный состав липидов зерна исследуемых сортов (Таблица 4), а также жирнокислотный состав их триацилглицеридов (Таблица 3).

Согласно результатам исследований, триацилглицериды зерна гороха сорта Памяти Хангильдина, фасоли сортов Лукерья и Омичка более разнообразны по качественному жирнокислотному составу. В триацилглицериде зерна гороха сортов Чишминский 95 и Чишминский 229 содержится три кислоты, в зерне гороха сорта Памяти Хангильдина и фасоли сорта Лукерья — шесть кислот, в зерне фасоли сорта Омичка — пять кислот. Жирнокислотный состав триацилглицеридов зерна гороха сорта Чишминский 95 на 52,62% от общего количества

жирных кислот представлен насыщенными жирными кислотами. Жирнокислотный состав триацилглицеридов зерна гороха сорт Чишминский 229 в сравнении с зерном гороха сорта Памяти Хангильдина характеризуется более высоким содержанием насыщенных жирных кислот (46,46 и 21,38% от общего количества жирных кислот, соответственно) и более низким содержанием ненасыщенных жирных кислот (4,60 и 32,61% от общего количества жирных кислот, соответственно). Доминирующей жирной кислотой триацилглицеридов зерна гороха сорта Чишминский 229 является пальмитиновая кислота, доля которой составляет 24,14% от общего количества жирных кислот.

В триацилглицериде зерна гороха сорта Памяти Хангильдина в наибольшем количестве присутствуют пальмитиновая, олеиновая и линолевая жирные кислоты (14,01%; 9,54%, 15,29% от общего

Таблица 3

Жирнокислотный состав триацилглицеридов зерна гороха и фасоли исследуемых сортов

Наименование жирной кислоты	Горох сорт			Фасоль сорт	
	Чишминский 95	Чишминский 229	Памяти Хангильдина	Омичка	Лукерья
Значение показателя, % от общего количества жирных кислот					
<i>Полиненасыщенные жирные кислоты</i>					
Линолевая (C _{18:2 Δ9,12})	—	4,60 ± 0,744	15,29 ± 0,983	10,88 ± 0,324	10,85 ± 1,282
5,9-гептадекадиеновая (C _{17:2 Δ5,9})	—	—	—	—	4,17 ± 0,445
5,9-гексадекадиеновая (C _{16:2 Δ5,9})	—	—	—	—	3,14 ± 0,756
9,12-гептадекадиеновая (C _{17:2 Δ9,12})	—	—	—	16,02 ± 0,402	—
Линолэлаидиновая (C _{18:2 Δ9,12})	—	—	0,45 ± 0,332	—	—
Сумма ПНЖК	—	4,60 ± 0,744	15,74 ± 1,278	26,89 ± 0,239	18,15 ± 2,234
<i>Мононенасыщенные жирные кислоты</i>					
Эруковая (C _{22:1 Δ13})	—	—	—	—	3,54 ± 0,424
Гондоиновая (C _{20:1})	—	—	7,33 ± 0,179	—	—
Олеиновая (C _{18:1})	—	—	9,54 ± 0,399	10,88 ± 1,023	—
Сумма МНЖК	—	—	16,87 ± 0,563	10,88 ± 1,023	3,54 ± 0,424
<i>Насыщенные жирные кислоты</i>					
Стеариновая (C _{18:0})	12,92 ± 0,932	22,32 ± 1,412	—	1,56 ± 0,392	17,86 ± 0,558
Изостеариновая (C _{18:0})	26,56 ± 0,713	—	7,37 ± 0,972	—	—
Пальмитиновая (C _{16:0})	13,14 ± 1,137	24,14 ± 0,788	14,01 ± 0,268	15,36 ± 0,868	16,43 ± 0,158
Сумма НЖК	52,62 ± 2,649	46,46 ± 1,854	21,38 ± 1,198	16,92 ± 1,099	34,29 ± 0,472
Сумма жирных кислот	52,62 ± 2,649	51,06 ± 2,584	53,99 ± 0,931	54,69 ± 2,000	55,98 ± 2,037

Таблица 4

Жирнокислотный состав липидов зерна гороха и фасоли исследуемых сортов

Наименование жирной кислоты	Горох сорт			Фасоль сорт	
	Чишминский 95	Чишминский 229	Памяти Хангильдина	Омичка	Лукерья
Значение показателя, % от общего количества жирных кислот					
<i>Полиненасыщенные жирные кислоты</i>					
Линолевая (C _{18:2 cΔ 9,12})	19,01 ± 0,049	30,07 ± 0,294	31,11 ± 0,972	26,60 ± 0,715	19,68 ± 0,704
α-линоленовая (C _{18:3a cΔ 9,12,15})	8,65 ± 0,315	4,43 ± 0,518	8,65 ± 0,178	36,62 ± 0,192	31,76 ± 0,071
Сумма ПНЖК	28,00 ± 0,750	34,73 ± 1,260	39,83 ± 1,652	63,72 ± 1,288	51,58 ± 1,097
<i>Мононенасыщенные жирные кислоты</i>					
Олеиновая (C _{18:1 cΔ9})	13,21 ± 1,072	13,89 ± 0,401	25,26 ± 0,354	11,70 ± 0,285	4,85 ± 0,736
Элаидиновая (C _{18:1 tΔ9})	–	–	0,115 ± 0,062	–	–
Гондоиновая (C _{20:1})	1,01 ± 0,252	0,90 ± 0,100	7,64 ± 0,334	0,74 ± 0,004	0,44 ± 0,008
Эруковая (C _{22:1 cΔ13})	обнаружена	обнаружена	обнаружена	–	4,40 ± 0,02
Нервоновая (C _{24:1})	обнаружена	обнаружена	–	1,38 ± 0,006	–
Сумма МНЖК	14,92 ± 2,018	14,94 ± 0,774	33,43 ± 1,120	14,17 ± 0,423	9,79 ± 1,181
<i>Насыщенные жирные кислоты</i>					
Миристиновая (C _{14:0})	0,59 ± 0,068	обнаружена	0,82 ± 0,495	–	–
Пентадециловая (C _{15:0})	обнаружена	обнаружена	0,44 ± 0,106	обнаружена	обнаружена
Пальмитиновая (C _{16:0})	14,15 ± 0,073	24,45 ± 0,407	14,93 ± 0,421	17,40 ± 0,068	17,04 ± 0,198
Стеариновая (C _{18:0})	39,49 ± 0,952	23,83 ± 0,094	8,86 ± 0,059	1,93 ± 0,008	18,28 ± 0,495
Арахидиновая (C _{20:0})	0,97 ± 0,049	–	0,58 ± 0,354	обнаружено	1,69 ± 0,013
Бегеновая (C _{22:0})	обнаружена	–	обнаружена	обнаружена	0,55 ± 0,001
Лигноцериновая (C _{24:0})	обнаружена	обнаружена	0,544 ± 0,025	0,667 ± 0,003	обнаружена
Сумма НЖК	55,50 ± 1,758	48,96 ± 0,967	26,56 ± 2,134	21,41 ± 0,130	38,26 ± 1,039
Сумма ННЖК	42,92 ± 2,768	49,66 ± 2,034	73,26 ± 2,772	77,88 ± 1,711	61,37 ± 2,278
Сумма жирных кислот	98,42 ± 2,961	98,64 ± 3,001	99,82 ± 2,342	99,30 ± 1,840	99,44 ± 3,035

Примечание: Минорные жирные кислоты (C_{14:1}, C_{15:1cΔ 10}, C_{16:1}, C_{17:1}, C_{4:0}, C_{6:0}, C_{8:0}, C_{10:0}, C_{12:0}, C_{13:0}, C_{17:0}) с концентрацией менее 0,5 % от общего количества жирных кислот в этой таблице не указаны.

количества жирных кислот, соответственно). Идентифицирован также транс-изомер линолевой кислоты — линолэлаидиновая кислота в количестве 0,45 % от общего количества жирных кислот, содержание которого находится в пределах допустимых значений ТР ТС 024/2011. Присутствие изомеров линолевой кислоты в зерне бобовых культур в количестве ≤ 1 % от общего количества жирных кислот установлено ранее другими учеными (Bouchenak & Lamri-Senhadj, 2013).

Во всех исследуемых сортах фасоли установлено присутствие как насыщенных, так и ненасыщенных жирных кислот. В зерне фасоли сорта Омичка в наибольшем количестве присутствуют пальмитиновая, олеиновая, линолевая и 9,12-гептадекади-

еновая жирные кислоты (15,36 %; 10,88 %; 10,88 % и 16,02 % от общего количества жирных кислот соответственно). В зерне фасоли сорта Лукерья в наибольшем количестве присутствуют стеариновая, пальмитиновая и линолевая жирные кислоты (17,86 %; 16,43 %; 10,85 % от общего количества жирных кислот, соответственно). При этом следует отметить, что триацилглицериды всех исследуемых сортов не содержат α-линоленовую кислоту, триацилглицериды зерна гороха сорт Чишминский 229 не содержат мононенасыщенных жирных кислот, а триацилглицериды зерна гороха сорт Чишминский 95 не содержат ненасыщенных жирных кислот. Однако в результате исследования жирнокислотного состава липидов зерна (Таблица 4) установлено, что олеиновая кислота входит в число

наиболее распространенных жирных кислот. Доминирующей полиненасыщенной жирной кислотой для всех исследуемых сортов гороха является линолевая (19,01–31,11% от общего количества жирных кислот), для зерна фасоли α -линоленовая (31,76–36,62% от общего количества жирных кислот), что свидетельствует о том, что данные кислоты входят в состав других фракций липидов.

Также установлено, что суммарное содержание насыщенных жирных кислот в зерне фасоли сорта Лукерья выше, чем в зерне гороха сорта Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка в 1,4 и 1,8 раза соответственно, но ниже в 1,4 и 1,3 раза, чем в зерне гороха сортов Чишминский 95 и Чишминский 229. Суммарное содержание полиненасыщенных жирных кислот в зерне фасоли сорта Омичка выше, чем в зерне гороха сорта Чишминский 95, Чишминский 229, Памяти Хангильдина и фасоли сорта Лукерья в 2,3; 1,8; 1,6 и 1,2 раза соответственно. Суммарное содержание мононенасыщенных жирных кислот в зерне гороха сорт Памяти Хангильдина выше, чем в зерне гороха сортов Чишминский 95, Чишминский 229 и фасоли сорта Омичка в 2,2–2,3 раза и в зерне фасоли сорта Лукерья в 3,4 раза.

Полученные результаты в большинстве случаев согласуются с исследованиями других ученых, посвященными изучению жирнокислотного состава бобовых культур. К примеру, в зерне белой фасоли сорта “Piękny Jaś Karłowcy” доминирующей жирной кислотой была линоленовая кислота (39,26%), в значительном количестве присутствовали α -линоленовая (23,25%) и олеиновая (17,59%) кислоты. Наиболее распространенными насыщенными кислотами были пальмитиновая кислота (12,79%) и стеариновая кислота (3,68%). Доля остальных жирных кислот в профиле жирных кислот составляла приблизительно 0,5% и менее (Ziarno et al., 2020). При исследовании жирнокислотного состава липидов пяти сортов фасоли, выращенных в Японии, установлено, что во всех сортах из ненасыщенных жирных кислот преобладают α -линоленовая (48,5–57,8%), линолевая (16,7–25,8%) и олеиновая (7,8–13,8%) кислоты, из насыщенных — пальмитиновая кислота (8,3–13,2%) (Yoshida et al., 2005).

Однако в некоторых случаях результаты качественного и количественного жирнокислотного состава существенно различаются. Так, в результате исследования содержания жира и жирных кислот в зерне

гороха и нута, выращенных в Оренбургской области, установлено, что суммарное содержание ненасыщенных жирных кислот в липидах зерна нута больше, чем в зерне гороха в 2,58 раз, при этом доминирующей ненасыщенной жирной кислотой в зерне гороха была α -линоленовая кислота, в зерне нута преобладала линолевая кислота. Насыщенные жирные кислоты были представлены пальмитиновой и стеариновой кислотами (Кудашева с соавт., 2013). Разница в качественном и количественном жирнокислотном составе культур объяснима, прежде всего, видовыми и сортовыми особенностями, почвенно — климатическими условиями, технологией выращивания (Босак, 2018).

Несмотря на разнообразие идентифицируемых ненасыщенных жирных кислот (Таблица 3, Таблица 4) только линолевую и α -линоленовую кислоты считают основными биохимическими предшественниками физиологически значимых длинноцепочечных полиненасыщенных жирных кислот (арахидоновая, эйкозапентаеновая и докозагексаеновая кислоты). Помимо вышесказанного, у линолевой и α -линоленовой кислот, также отмечены антиоксидантные свойства; противораковый, противовоспалительный, антиостеопоротический, кардиопротекторный и нейропротекторный эффекты (D’Angelo et al., 2020; De Lorgeril, 2007; Fialkow, 2016). Все остальные идентифицируемые ненасыщенные жирные кислоты можно условно отнести к функциональным факторам питания, препятствующим риску развития различных заболеваний.

К примеру, эруковая кислота, обнаруженная в фасоли сорта Лукерья, обладает антиоксидантным и противовоспалительным действием (Altinoz et al., 2021; Kumar & Sharma, 2020), также может быть ценной при лечении рассеянного склероза, действовать как нейропротекторное, противоопухолевое и защитное средство при болезни Паркинсона, глиобластоме и нейробластоме (Altinoz & Ozpinar, 2019). Олеиновая кислота обладает рядом положительных терапевтических эффектов для сердечно-сосудистой системы, мозга, эмоционального настроения человека, является антиоксидантом (Pegoraro et al., 2020; Carrillo et al., 2012).

Обнаруженная в фасоли сорта Лукерья 5,9-гексадекадиеновая кислота обладает антимикробной активностью в отношении грамположительных бактерий *Staphylococcus aureus* и *Streptococcus faecalis*,

но неактивна в отношении грамотрицательных бактерий, таких как *Pseudomonas aeruginosa* (Carballeira et al., 2002).

Учитывая вышесказанное, липиды зерна гороха сорт Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка, в сравнении с другими исследованными сортами, обладают значительно большей физиологической ценностью, ввиду большего содержания полиненасыщенных жирных кислот (39,83 и 63,72 % от суммы всех жирных кислот, соответственно), являющихся незаменимыми для человека.

На заключительном этапе исследований в результате проращивания зерна гороха в течение 13–15 часов и фасоли в течение 17–20 часов на опытном устройстве «Смарт — спраутер «Росинка» с автоматическим регулированием влажности от 40 до 90 % при температуре (21–23) °С засвидетельствованы снижение массовой доли липидов, качественные и количественные изменения кислотных групп в триацилглицеридах (Таблицы 5, 6), а также изменение окислотном составе липидов зерна.

Таблица 5

Результаты анализа триацилглицеридов пророщенного зерна гороха сорт Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка

Триацилглицерид	Горох сорт	Фасоль сорт
	Памяти Хангильдина	Омичка
	Значение показателя, % от суммы липидов	
1,2-дидиолеоил-3-пальмитоилглицерин	47,73 ± 1,492	–
1,2-дидиолеоил-3-пальмитоилглицерин	–	21,43 ± 1,219
Линоленоил-дидиолеоилглицерин	–	14,43 ± 0,859
Дидиолеоил-линолеоилглицерин	–	14,13 ± 0,760
Сумма	47,73 ± 1,492	49,99 ± 2,708
Общее содержание липидов, %	1,26 ± 0,083	1,27 ± 0,088

Совокупный анализ результатов исследований (Таблицы 2 и 5) показывает четкие изменения в составе триацилглицеридов пророщенного зерна исследуемых культур. Количество триацилглицеридов в процессе проращивания зерна гороха и фасоли снизилось с 55,74 до 47,73 % и с 56,56 до 49,99 %

соответственно. Для всех образцов характерно содержание пальмитоина и дидиолеоила. В триацилглицеридах пророщенного зерна фасоли сорта Омичка идентифицированы линоленоины и дидиолеоилы не идентифицированные в нативном зерне. Жирнокислотный состав триглицеридов пророщенного зерна исследуемых сортов представлен в Таблице 6.

Таблица 6

Жирнокислотный состав триацилглицеридов пророщенного зерна гороха сорт Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка

Наименование жирной кислоты	Горох сорт Памяти Хангильдина	Фасоль сорт Омичка
	Значение показателя, % от общего количества жирных кислот	
	Пальмитиновая кислота (C _{16:0})	19,44 ± 0,879
Линолевая кислота (C _{18:2})	26,36 ± 0,994	26,90 ± 0,876
Линоленовая кислота (C _{18:3})	–	13,12 ± 0,621
Сумма ПНЖК	26,36 ± 0,994	40,01 ± 1,468
Сумма НЖК	19,44 ± 0,879	7,38 ± 0,312
Сумма жирных кислот	45,79 ± 1,776	47,39 ± 1,629

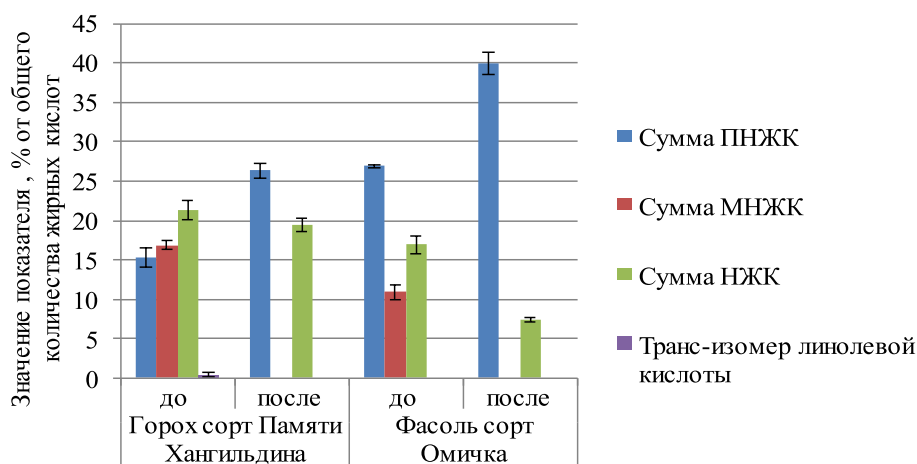
Динамика изменения жирнокислотного состава триглицеридов зерна исследуемых сортов в результате процесса проращивания представлена на Рисунке 1.

В результате исследований установлено снижение содержания насыщенных жирных кислот в триацилглицеридах пророщенного зерна гороха сорта Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка (с 21,38 до 19,44 % и с 16,92 до 7,38 % от общего количества жирных кислот, соответственно), увеличение содержания полиненасыщенных жирных кислот в зерне гороха и фасоли (с 15,29 до 26,36 % и с 26,89 до 40,01 % от общего количества жирных кислот, соответственно), отсутствие мононенасыщенных жирных кислот и транс-изомера линолевой кислоты.

Указанные изменения, в пророщенном зерне гороха и фасоли свидетельствуют о глубоких биохимических преобразованиях липидов. Метаболизм липидов в процессе проращивания зерна осуществляется различными путями при участии ферментов зерна, активность которых в процессе замачивания и про-

Рисунок 1

Изменение суммы насыщенных и ненасыщенных жирных кислот триацилглицеридов зерна исследуемых сортов в результате процесса проращивания

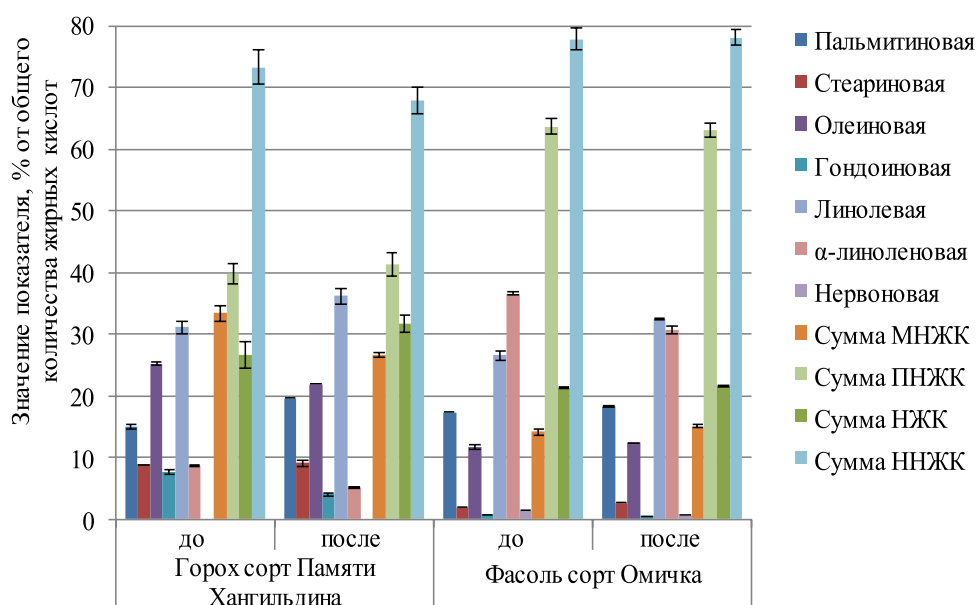


ращивания повышается. Гидролитические ферменты липазы в процессе проращивания высвобождают этерифицированные жирные кислоты из триглицеридов, изменяя соотношение насыщенных и ненасыщенных жирных кислот (Benincasa et al., 2019; Бездудная, 2005) в липидах. Свободные жирные кислоты и глицерин вовлекаются в энергетический метаболизм. Глицерин, через ряд последовательных реакций, участвует в синтезе глюкозы. Свободные

жирные кислоты, в свою очередь, включаются в ряд последовательных ферментативных реакций цикла Кноопа — Линена (β -окисление), в результате которого происходит последовательное расщепление жирных кислот до ацетил-КоА необходимого для глиоксилатного цикла. Жирнокислотный состав липидов зерна гороха сорта Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка до и после проращивания представлен на Рисунке 2.

Рисунок 2

Изменение жирнокислотного состава липидов зерна исследуемых сортов в результате процесса проращивания



Примечание: Минорные жирные кислоты ($C_{14:1}$, $C_{15:1\Delta 10}$, $C_{16:1}$, $C_{17:1}$, $C_{22:1\Delta 13}$, $C_{14:0}$, $C_{15:0}$, $C_{17:0}$, $C_{20:0}$, $C_{22:0}$, $C_{24:0}$) с концентрацией менее 0,5% от общего количества жирных кислот на этом рисунке не указаны.

Сравнительный анализ результатов исследований (Рисунок 2) позволил установить увеличение содержания НЖК с 26,56 до 31,72% соответственно и ПНЖК с 39,83 до 41,38%, снижение МНЖК с 33,43 до 26,58% в пророщенном зерне гороха; увеличение содержания НЖК с 21,41 до 21,51% и МНЖК с 14,17 до 15,09%, снижение ПНЖК с 63,72 до 63,08% в пророщенном зерне фасоли. Отмечено высокое содержание в пророщенном зерне гороха и фасоли ненасыщенных жирных кислот (67,96 и 78,18% от общего количества жирных кислот, соответственно) и низкое содержание насыщенных жирных кислот (31,72 и 21,51% от общего количества жирных кислот, соответственно).

В результате процесса проращивания зерна гороха отмечено увеличение линолевой кислоты с 31,11 до 36,16%, пальмитиновой кислоты с 14,93 до 19,69% и стеариновой кислоты с 8,86 до 9,11%, снижение α -линоленовой кислоты с 8,65 до 5,22%, олеиновой кислоты с 25,26 до 21,91% и гондоиновой кислоты с 7,64 до 4,09%. В процессе проращивания зерна фасоли отмечено увеличение линолевой с 26,60 до 32,42% и олеиновой кислоты с 11,70 до 12,45%, пальмитиновой с 17,40 до 18,27% и стеариновой с 1,93 до 2,70% кислот, снижение α -линоленовой с 36,62 до 30,66% и нервоновой с 1,38 до 0,68% кислот. Выше перечисленные жирные кислоты представлены в пророщенном зерне гороха и фасоли в наибольшем количестве. Доминирующей жирной кислотой как в пророщенном зерне гороха, так и в пророщенном зерне фасоли, является линолевая кислота содержание которой достигает 36,16 и 32,42% от общего количества жирных кислот, соответственно.

Полученные нами результаты во многом согласуются с данными других ученых; в то же время, имеются и иные сведения. Так, Абдель-Рахман и др. при изучении влияния процесса проращивания на липидный профиль бобов мунг засвидетельствовали, как и в наших исследованиях, снижение доли олеиновой кислоты с 15,78 до 14,40%, увеличение линолевой с 16,98 до 18,34%, пальмитиновой с 16,15 до 17,46% и стеариновой с 6,33 до 7,73% кислот, однако в отличие от наших исследований ученые показывают увеличение α -линоленовой кислоты с 16,98 до 18,34% (Abdel-Rahman et al., 2007).

Megat Rusydi и др. в своих исследованиях отмечают, что при проращивании зерна фасоли снижается

содержание пальмитиновой с 17,92 до 12,06%, стеариновой с 5,13 до 2,69%, олеиновой с 9,73 до 2,52%, линолевой с 29,56 до 18,93% и линоленовой с 12,75 до 8,88% кислот (Megat-Rusydi et al., 2011). Ziarno и др. отмечают незначительные изменения содержания олеиновой кислоты (с 17,59 до 18,30%), увеличение пальмитиновой (с 12,79 до 16,72%) и стеариновой (с 3,68 до 5,66%) кислот, снижение доли линолевой (с 39,26 до 33,59%) и α -линоленовой (с 23,25 до 18,97%) кислот при проращивании фасоли (Ziarno et al., 2020). Данные различия объяснимы видовой и сортовой изменчивостью культур, почвенно-климатическими условиями, параметрами проращивания и многими другими факторами.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований установлено, что содержание триацилглицеридов в зерне гороха и фасоли исследуемых сортов составляет от 53,20 до 55,74% и от 56,56 до 57,73% от общего количества липидов, соответственно. В триацилглицеридах всех изученных сортов идентифицированы остатки ненасыщенных жирных кислот и глицерина, за исключением гороха сорт Чижминский 95.

Во всех исследуемых сортах гороха и фасоли пальмитиновая, стеариновая, линолевая, α -линоленовая и олеиновая кислоты наиболее распространены. Доминирующей полиненасыщенной жирной кислотой для всех исследуемых сортов гороха является линолевая кислота (19,01–31,11% от общего количества жирных кислот, соответственно), для зерна фасоли α -линоленовая кислота (31,76–36,62% от общего количества жирных кислот, соответственно). Липиды зерна гороха сорта Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка обладают значительно большей физиологической ценностью, ввиду большего содержания полиненасыщенных жирных кислот (39,83 и 63,72% от общего содержания жирных кислот, соответственно), являющихся незаменимыми для человека.

В процессе проращивания зерна гороха сорт Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка при каталитическом действии ферментов снижается количество жира, происходит качественное и количественное перераспределение жирных кислот в триацилглицеридах зерна. При этом отмечено отсутствие мононенасыщенных жирных кислот и транс-изомера,

повышение содержания полиненасыщенных жирных кислот в 1,7 и 1,5 раза соответственно, снижение насыщенных жирных кислот в 1,1 и 2,3 раза соответственно по сравнению с триацилглицеридами нативного зерна. Содержание линолевой кислоты в липидах пророщенного зерна гороха сорт Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка по сравнению с нативным зерном увеличилось с 31,11 до 36,16% и с 26,60 до 32,42% от общего количества жирных кислот, соответственно.

Пророщенное зерно по сравнению с нативным представляет собой более ценный источник незаменимой полиненасыщенной линолевой жирной кислоты, являющейся биохимическим предшественником физиологически значимых длинноцепочечных полиненасыщенных жирных кислот (Гладышев, 2012). Арахидоновая, эйкозапентаеновая и докозагексаеновая кислоты — не только важные структурные компоненты клеточных мембран всех органов и тканей, но и биохимические предшественники синтеза эндогормонов — эйкозаноидов, регулирующие многочисленные функции, включая степень воспалительной реакции, уровень

активности клеток иммунной системы и ряд других (Берзегова, 2007).

С учетом вышесказанного, наиболее перспективным является дальнейшее использование пророщенного зерна гороха сорт Памяти Хангильдина и фасоли сорта Омичка как в качестве основного сырья в технологии продуктов сегмента «dairy alternatives», так и в качестве функционального ингредиента продуктов питания.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Вебер Анна Леонидовна: концептуализация, методология, администрирование данных, создание черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование, визуализация, руководство исследованием.

Леонова Светлана Александровна: верификация данных, формальный анализ, проведение исследования, ресурсы, создание рукописи и её редактирование.

ЛИТЕРАТУРА

- Алгазин, Д. Н., Воробьёв, Д. А., Забудский, А. И., Данникер, А. А. & Фалькович, Л.Л. (2017). Смарт спраутер «Росинка». *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*, (1), 18.
- Бездудная, Е. Ф. (2005). Динамика липидов в семенах и проростках сои при проращивании. *Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Биология*, (1–2), 22–27.
- Берзегова, А. А. (2007). Значение липидов для организма человека. *Новые технологии*, (4), 40–42.
- Босак, В. Н., & Сачивко, Т. В. (2018). Особенности аминокислотного состава и биологическая ценность белка бобовых овощных культур. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*, (1), 37–40.
- Василенко, А. А., Тымчук, С. М., Поздняков, В. В., Супрун, О. Г., Анциферова, О. В., & Безуглый И. М. (2017). Содержание и жирнокислотный состав масла в семенах крахмалмодифицирующих мутантов гороха. *Зернобобовые и крупяные культуры*, (3), 33–39.
- Вебер, А. Л., Леонова, С. А., & Давлетов Ф. А. (2019). Фитохимический потенциал и ингибиторная активность новых сортов зернобобовых культур. *Техника и технология пищевых производств*, 49(2), 281–288. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-281-288>
- Витол, И. С., Мелешкина, Е. П., & Панкратов, Г. Н. (2023). Оструби из композитной зерновой смеси как объект глубокой переработки. Углеводно-амилазные и липидные комплексы. *Пищевые системы*, 6(1), 22–28. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-22-28>
- Воловик, В. Т., Леонидова, Т. В., Коровина, Л. М., Блохина, Н. А., & Касарина, Н. П. (2019). Сравнение жирнокислотного состава различных пищевых масел. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, (5), 147–152. <http://doi.org/10.17513/mjpf.12754>
- Гладышев, М. И. (2012). Незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты и их пищевые источники для человека. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*, (4), 352–386.
- Давлетов, Ф. А., Гайнулина, К. П., & Магафурова, Ф. Ф. (2020). Сравнительное изучение хозяйственно-биологических признаков у сортов гороха, созданных в республике Башкортостан за последние 30 лет. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, (4), 72–77. <http://doi.org/10.37670/2073-0853-2020-84-4-72-77>
- Зотиков, В. И., Полухин, А. А., Грядунова, Н. В., Сидоренко, В. С., & Хмызова, Н. Г. (2020). Развитие производства зернобобовых и крупяных культур в России на основе использования селекционных достижений. *Зернобобовые и крупяные культуры*, (4), 5–17. <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2020-11198>
- Зотиков, В. И., Сидоренко, В. С., & Грядунова, Н. В. (2018). Развитие производства зернобобовых культур в Российской

- Федерации. *Зернобобовые и крупяные культуры*, (2), 4–10. <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2018-10008>
- Колпакова, В. В., Куликов, Д. С., Уланова, Р. В., & Чумикина, Л. В. (2021). Пищевые и кормовые белковые препараты из гороха и нута: производство, свойства, применение. *Техника и технология пищевых производств*, 51(2), 333–348. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-333-348>.
- Кудашева, А. В., Галиев, Б. Х., Ширнина, Н. М., & Родионова, Г. Б. (2013). Региональные особенности жирокислотного состава зерна на примере Оренбургской области. *Животноводство и кормопроизводство*, 79, 104–109.
- Лебская, Т. К., Баль-Прилипко, Л. В., Менчинская, А. А., & Лебский, С. О. (2020). Липидный профиль черноморской травяной креветки *Palaemon adspersus* Rathke, 1837. *Вопросы питания*, 89(1), 96–100. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10011>
- Лютикова, М. Н., Туров, Ю. П., & Ботиров, Э. Х. (2013). Применение хромато-масс-спектрометрии для определения свободных и этерифицированных жирных кислот при их совместном присутствии в растительном сырье. *Тонкие химические технологии*, 8(2), 52–57.
- Никифорова, Т. А., Севериненко, С. М., Куликов, Д. А., & Пономарев, С. Г. (2010). Потенциальные возможности побочных продуктов крупяных производств. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 5 (111), 141–144.
- Новиков, О. О., Писарев, Д. И., & Ванхин, О. А. (2013). Использование метода MALDI/TOF/MS для исследования компонентов жирных масел растительного происхождения. *Актуальные проблемы медицины*, (24–1), 110–114.
- Петрова, С. Н., Ещенко, А. Р., & Минеева, Е. М. (2019). О жировой составляющей питания дошкольников. *Техника и технология пищевых производств*, 49(4), 621–628. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-621-628>
- Попова, А. Ю., Тутельян, В. А., & Никитюк, Д. Б. (2021). О новых нормах физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. *Вопросы питания*, 90(4), 6–19. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-4-6-19>
- Самофалова, Л. А., & Сафронова, О. В. (2017). Методологические подходы к проращиванию семян сельскохозяйственных культур, тестирование успеха прорастания. *Зернобобовые и крупяные культуры*, (3), 68–74.
- Тутельян, В. А., Нечаев, А. П., & Балыхин, М. Г. (2021). *Пищевые ингредиенты в продуктах питания: От науки к технологиям: Монография*. М.: Московский государственный университет пищевых производств
- Фролова, Ю. В., Кочеткова, А. А., Соболев, Р. В., Воробьева, В. М., & Коденцова, В. М. (2021). Олеогели как перспективные пищевые ингредиенты липидной природы. *Вопросы питания*, 90(4), 64–73. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-4-64-73>
- Шаршунов, В. А., Урбанчик, Е. Н., Шалюта, А. Е., & Галдова, М. Н. (2016). Получение биологически активного зернового продукта на основе смесей пророщенного зерна пшеницы и овса голозерного. *Вестник национальной академии наук Беларуси*, (4), 118–125.
- Ширшова, Т. И., Бешлей, И. В., & Уфимцев, К. Г. (2022). Нейтральные липиды и высшие жирные кислоты в некоторых представителях рода *Allium* L. флоры Республики Коми. *Химия растительного сырья*, (3), 219–227. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220310599>
- Abdel-Rahman, E. A., El-Fishawy, F. A., El-Geddawy, M. A., Kurz, T., El-Rify, M. N. (2007). The changes in the lipid composition of mung bean seeds as affected by processing methods. *International Journal of Food Engineering*, 3(5), Article 6. <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1186>
- Altinoz, M. A., & Ozpinar, A. (2019). PPAR- δ and erucic acid in multiple sclerosis and Alzheimer's Disease. Likely benefits in terms of immunity and metabolism. *International Immunopharmacology*, 69, 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2019.01.057>
- Altinoz, M. A., Elmaci, İ., Hacimuftuoglu, A., Ozpinar, A., Hacker, E., & Ozpinar, A. (2021). PPAR δ and its ligand erucic acid may act anti-tumoral, neuroprotective, and myelin protective in neuroblastoma, glioblastoma, and Parkinson's disease. *Molecular Aspects of Medicine*, 78, Article 100871. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2020.100871>
- Bautista-Expósito, S., Vandenberg, A., Peñas, E., Frias, J., & Martínez-Villaluenga, C. (2021). Lentil and fava bean with contrasting germination kinetics: a focus on digestion of proteins and bioactivity of resistant peptides. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 754287. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.754287>
- Bouchenak, M., & Lamri-Senhadji, M. (2013). Nutritional quality of legumes, and their role in cardiometabolic risk prevention: A review. *Journal of Medicinal Food*, 16(3), 185–198. <https://doi.org/10.1089/jmf.2011.0238>
- Byrdwell, W. C., & Goldschmidt, R. J. (2022). Fatty acids of ten commonly consumed pulses. *Molecules*, 27, Article 7260. <https://doi.org/10.3390/molecules27217260>
- Carballeira, N. M., Betancourt, J. E., Orellano, E. A., & González, F. A. (2002). Total synthesis and biological evaluation of (5Z,9Z)-5,9-hexadecadienoic acid, an inhibitor of human topoisomerase I. *Journal of Natural Products*, 65(11), 1715–1718. <https://doi.org/10.1021/np0202576>
- Carrillo, C., Cavia, M. del M., & Alonso-Torre, S. R. (2012). Antitumor effect of oleic acid; mechanisms of action: A review. *Nutricion hospitalaria*, 27(6), 1860–1865. <https://doi.org/10.3305/nh.2012.27.6.6010>
- Cholewski, M., Tomczykowa, M., & Tomczyk, M. (2018). A comprehensive review of chemistry, sources and bioavailability of omega-3 fatty acids. *Nutrients*, 10(11), Article 1662. <https://doi.org/10.3390/nu10111662>
- D'Angelo, S., Motti, M. L., & Meccariello, R. (2020). ω -3 and ω -6 polyunsaturated fatty acids, obesity and cancer. *Nutrients*, 12(9), Article 2751. <https://doi.org/10.3390/nu12092751>
- De Lorgeril M. (2007). Essential polyunsaturated fatty acids, inflammation, atherosclerosis and cardiovascular diseases. *Sub-cellular biochemistry*, 42, 283–297. https://doi.org/10.1007/1-4020-5688-5_13
- Farag, M. A., & Gad, M. Z. (2022). Omega-9 fatty acids: Potential roles in inflammation and cancer management. *Journal of Genetic Engineering & Biotechnology*, 20(1), Article 48. <https://doi.org/10.1186/s43141-022-00329-0>

- Fialkow, J. (2016). Omega-3 fatty acid formulations in cardiovascular disease: dietary supplements are not substitutes for prescription products. *American Journal of Cardiovascular Drugs: Drugs, Devices, and other Interventions*, 16(4), 229–239. <https://doi.org/10.1007/s40256-016-0170-7>
- Grela, E. R., & Gunter, K. D. (1995). Fatty acid composition and tocopherol content of some legume seeds. *Animal Feed Science and Technology*, 52, 325–331. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)00733-P](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)00733-P)
- Kim, S. J., Zaidul, I. S., Suzuki, T., Mukasa, Y., Hashimoto, N., Takigawa, S., Noda, T., Matsuura-Endo, C., & Yamauchi, H. (2008). Comparison of phenolic compositions between common and tartary buckwheat (*Fagopyrum*) sprouts. *Food Chemistry*, 110(4), 814–820. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.050>
- Kumar, J. B. S., & Sharma, B. (2022). A review on neuropharmacological role of erucic acid: An omega-9 fatty acid from edible oils. *Nutritional Neuroscience*, 25(5), 1041–1055. <https://doi.org/10.1080/1028415X.2020.1831262>
- Megat-Rusydi, M. R., Noraliza, C. W., Azrina, A., & Zulkhairi, A. (2011). Nutritional changes in germinated legumes and rice varieties. *International Food Research Journal*, 18(2), 705–713.
- Ogori, A. F. (2020). Source, extraction and constituents of fats and oils. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 6, Article 60. <https://doi.org/10.24966/FSN-1076/100060>
- Pegoraro, N. S., Camponogara, C., Gehrcke, M., Giuliani, L. M., da Silva, D. T., Maurer, L. H., Dias, P., Emanuelli, T., Cruz, L., & Oliveira, S. M. (2020). Oleic acid-containing semisolid dosage forms exhibit in vivo anti-inflammatory effect via glucocorticoid receptor in a UVB radiation-induced skin inflammation model. *Inflammopharmacology*, 28(3), 773–786. <https://doi.org/10.1007/s10787-019-00675-5>
- Samtiya, M., Aluko, R.E., & Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: An overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, Article 6. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5>
- Tomczyk, M. A. (2018). Comprehensive review of chemistry, sources and bioavailability of omega-3 fatty acids. *Nutrients*, 10, Article 1662. <https://doi.org/10.3390/nu10111662>
- Veber, A. L., Leonova, S. A., Simakova, I. V., & Esmurzaeva, Zh. B. (2020). The development of a beverage with a dispersion structure from pea grains of domestic selection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 624, Article 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012127>
- Yoshida, H., Saiki, M., Yoshida, N., Tomiyama, Y., & Mizushina, Y. (2009). Fatty acid distribution in triacylglycerols and phospholipids of broad beans (*Vicia faba*). *Food Chemistry*, 112(4), 924–928. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.003>
- Yoshida, H., Tomiyama, Y., Tanaka, M., & Mizushina, Y. (2007). Distribution of fatty acids in triacylglycerols and phospholipids from peas (*Pisum sativum* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87, 2709–2714. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3035>
- Yoshida, H., Tomiyama, Y., Kita, S., & Mizushina, Y. (2005). Lipid classes, fatty acid composition and triacylglycerol molecular species of kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Lipid Science and Technology*, 107(5), 307–315. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200401078>
- Ziarno, M., Brys, J., Parzyszek, M., & Veber, A. (2020). Effect of lactic acid bacteria on the lipid profile of bean-based plant substitute of fermented milk. *Microorganisms*, 8(9), Article 1348. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091348>

REFERENCES

- Algazin, D. N., Vorob'ev, D. A., Zabudskii, A. I., Danniker, A. A., & Fal'kovich, L.L. (2017). Smart sprauter “Rosinka” [Smart sprouter “Dewdrop”]. *Elektronnyi nauchno-metodicheskii zhurnal Omskogo GAU [Electronic Scientific and Methodological Journal of the Omsk State University]*, (1), 18.
- Berezogova, A. A. (2007). Znachenie lipidov dlya organizma cheloveka [The importance of lipids for the human body]. *Novye tekhnologii [New Technologies]*, (4), 40–42.
- Bezduknaya, E. F. (2005). Dinamika lipidov v semenakh i prorstkakh soi pri pro-rastanii [Dynamics of lipids in soybean seeds and seedlings during germination]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo universiteta imeni V.N Karazina. Biologiya*, (1–2), 22–27.
- Bosak, V.N., & Sachivko, T.V. (2018). Osobennosti aminokislотного состава i biologicheskaya tsennost' belka bobovykh ovoshchnykh kul'tur [Features of the amino acid composition and biological value of the protein of bo-bo vegetable crops]. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*, (1), 37–40.
- Davletov, F. A., Gainullina, K. P., & Magafurova, F. F. (2020). Sravnitel'noe izuchenie khozyaistvenno-biologicheskikh priznakov u sortov gorokha, sozdannykh v respublike Bashkortostan za poslednie 30 let [Comparative study of economic and biological characteristics of pea varieties created in the Republic of Bashkortostan over the past 30 years]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]*, (4), 72–77. <http://doi.org/10.37670/2073-0853-2020-84-4-72-77>
- Frolova, Yu. V., Kochetkova, A. A., Sobolev, R. V., Vorob'eva, V. M., & Kodentsova, V. M. (2021). Oleogeli kak perspektivnye pishchevye ingredienty lipidnoi prirody [Oleogels as promising food ingredients of lipid nature]. *Voprosy pitaniya [Nutrition Issues]*, 90(4), 64–73. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-4-64-73>
- Gladyshev, M. I. (2012). Nezamenimye polinenasyshchennyye zhirnyye kisloty i ikh pishchevye istochniki dlya cheloveka [Essential polyunsaturated fatty acids and their food sources for humans]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya [Journal of the Siberian Federal University. Biology]*, (4), 352–386.
- Kolpakova, V. V., Kulikov, D. S., Ulanova, R. V., & Chumikina, L. V. (2021). Pishche-vye i kormovyye belkovyye preparaty iz gorokha i nuta: proizvodstvo, svoystva, primenenie [Food and feed

- protein preparations from peas and chickpeas: production, properties, application]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Equipment and Technology of Food Production]*, 51(2), 333–348. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-333-348>.
- Kudasheva, A. V., Galiev, B. Kh., Shirmina, N. M., & Rodionova, G. B. (2013). Regio-nal'nye osobennosti zhirkislotnogo sostava zerna na primere Orenburg-skoi oblasti [Regional features of the fatty acid composition of grain on the example of the Orenburg region]. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo [Animal Husbandry and Feed Production]*, 79, 104–109.
- Lebskaya, T. K., Bal'-Prilipko, L. V., Menchinskaya, A. A., & Lebskii, S. O. (2020). Lipidnyi profil' chernomorskoi travyanoi krevetki Palaemon adspersus Rathke, 1837 [Lipid profile of the Black Sea grass shrimp Palaemon adspersus Rathke, 1837]. *Voprosy pitaniya [Nutrition Issues]*, 89(1), 96–100. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10011>
- Lyutikova, M. N., Turov, Yu. P., & Botirov, E. Kh. (2013). Primenenie khromato-mass-spektrometrii dlya opredeleniya svobodnykh i eterifitsirovannykh zhirnykh kislot pri ikh sovместnom prisutstvii v rastitel'nom syr'e [The use of chromatography-mass spectrometry for the determination of free and esterified fatty acids in their combined presence in growing raw materials]. *Tonkie khimicheskie tekhnologii [Fine Chemical Technologies]*, 8(2), 52–57.
- Nikiforova, T. A., Severinenko, S. M., Kulikov, D. A., & Ponomarev, S. G. (2010). Potencial'nye vozmozhnosti pobochnykh produktov krupyanykh proizvodstv [Potential opportunities of by-products from cereal production]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 5(111), 141–144.
- Novikov, O. O., Pisarev, D. I., & Vankhin, O. A. (2013). Ispol'zovanie metoda MALDI/TOF/MS dlya issledovaniya komponentov zhirnykh masel rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Using the MALDI/TOF/MS method to study the components of fatty oils of vegetable origin]. *Aktual'nye problemy meditsiny [Actual Problems of Medicine]*, (24–1), 110–114.
- Petrova, S. N., Eshchenko, A. R., & Mineeva, E. M. (2019). O zhirovoi sostavlyayushchei pitaniya doshkol'nikov [About the fat component of the nutrition of preschoolers]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Equipment and Technology of Food Production]*, 49(4), 621–628. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-621-628>
- Popova, A. Yu., Tutel'yan, V. A., & Nikityuk, D. B. (2021). O novykh normakh fizio-logicheskikh potrebnosti v energii i pishchevykh veshchestvakh dlya razlichnykh grupp naseleniya Rossiiskoi Federatsii [About new norms of physiological needs for energy and food items for various groups of the population of the Russian Federation]. *Voprosy pitaniya [Nutrition Issues]*, 90(4), 6–19. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-4-6-19>
- Samofalova, L. A., & Safronova, O. V. (2017). Metodologicheskie podkhody k prorashchivaniyu semyan sel'skokhozyaistvennykh kul'tur, testirovanie uspekha prorstaniya [Methodological approaches to germination of seeds of agricultural crops, testing of germination success]. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury [Legumes and Cereals]*, (3), 68–74.
- Sharshunov, V. A., Urbanchik, E. N., Shalyuta, A. E., & Galdova, M. N. (2016). Poluchenie biologicheskii aktivnogo zernovogo produkta na osnove smesei proroshchennogo zerna pshenitsy i ovsа golozer'nogo [Obtaining a biologically active grain product based on mixtures of sprouted wheat and naked oats]. *Vestnik natsional'noi akademii nauk Belarusi [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus]*, (4), 118–125.
- Shirshova, T. I., Beshlei, I. V., & Ufimtsev, K. G. (2022). Neitral'nye lipidy i vysshie zhirnye kisloty v nekotorykh predstavitel'yakh roda Allium L. flory Respubliki Komi [Neutral lipids and higher fatty acids in some representatives of the genus Allium L. flora of the Komi Republic]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of Plant Raw Materials]*, (3), 219–227. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220310599>
- Tutel'yan, V. A., Nechaev, A. P., & Balykhin, M. G. (2021). *Pishchevye ingredienty v produktakh pitaniya: Ot nauki k tekhnologiyam: Monografiya [Food ingredients in food: From Science to technology: A monograph]*. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitet pishchevykh proizvodstv
- Vasilenko, A. A., Tymchuk, S. M., Pozdnyakov, V. V., Suprun, O. G., Antsiferova, O. V., & Bezuglyi I. M. (2017). Soderzhanie i zhirkislotnyi sostav masla v semenakh krakhmal-modifitsiruyushchikh mutantov gorokha [The content and fatty acid composition of oil in the seeds of starch-modifying mutants of peas]. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury [Legumes and Cereals]*, (3), 33–39.
- Veber, A. L., Leonova, S. A., & Davletov F. A. (2019). Fitokhimicheskii potentsial i ingibitornaya aktivnost' novykh sortov zernobobovykh kul'tur [Phytochemical potential and inhibitory activity of new varieties of leguminous crops]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Equipment and Technology of Food Production]*, 49(2), 281–288. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-281-288>
- Vitol, I. S., Meleshkina, E. P., & Pankratov, G. N. (2023). Otrubi iz kompozitnoi zernovoi smesi kak ob'ekt glubokoi pererabotki. Uglevodno-amilaznye i lipidnye komplekсы [Bran from a composite grain mixture as an object of deep processing. Carbohydrate-amylase and lipid complexes]. *Pishchevye sistemy [Food Systems]*, 6(1), 22–28. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-22-28>
- Volovik, V. T., Leonidova, T. V., Korovina, L. M., Blokhina, N. A., & Kasarina, N. P. (2019). Sravnenie zhirkislotnogo sostava razlichnykh pishchevykh masel [Comparison of fatty acid composition of various edible oils. International]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy [Journal of Applied and Fundamental Research]*, (5), 147–152. <http://doi.org/10.17513/mjpf.12754>
- Zotikov, V. I., Polukhin, A. A., Gryadunova, N. V., Sidorenko, V. S., & Khmyzova, N. G. (2020). Razvitie proizvodstva zernobobovykh i krupyanykh kul'tur v Rossii na osnove ispol'zovaniya selektsionnykh dostizhenii [The development of the production of legumes and cereals in Russia based on the use of breeding achievements]. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury [Legumes and Cereals]*, (4), 5–17. <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2020-11198>
- Zotikov, V. I., Sidorenko, V. S., & Gryadunova, N. V. (2018). Razvitie proizvodstva zernobobovykh kul'tur v Rossiiskoi Federatsii [Development of the production of leguminous crops in the Russian Federation]. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury [Legumes and Cereals]*, (2), 4–10. <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2018-10008>

- Abdel-Rahman, E. A., El-Fishawy, F. A., El-Geddawy, M. A., Kurz, T., El-Rify, M. N. (2007). The changes in the lipid composition of mung bean seeds as affected by processing methods. *International Journal of Food Engineering*, 3(5), Article 6. <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1186>
- Altinoz, M. A., & Ozpinar, A. (2019). PPAR-6 and erucic acid in multiple sclerosis and Alzheimer's Disease. Likely benefits in terms of immunity and metabolism. *International Immunopharmacology*, 69, 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2019.01.057>
- Altinoz, M. A., Elmaci, İ., Hacimuftuoglu, A., Ozpinar, A., Hacker, E., & Ozpinar, A. (2021). PPAR-6 and its ligand erucic acid may act anti-tumoral, neuroprotective, and myelin protective in neuroblastoma, glioblastoma, and Parkinson's disease. *Molecular Aspects of Medicine*, 78, Article 100871. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2020.100871>
- Bautista-Expósito, S., Vandenberg, A., Peñas, E., Frias, J., & Martínez-Villaluenga, C. (2021). Lentil and fava bean with contrasting germination kinetics: a focus on digestion of proteins and bioactivity of resistant peptides. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 754287. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.754287>
- Bouchenak, M., & Lamri-Senhadj, M. (2013). Nutritional quality of legumes, and their role in cardiometabolic risk prevention: A review. *Journal of Medicinal Food*, 16(3), 185–198. <https://doi.org/10.1089/jmf.2011.0238>
- Byrdwell, W. C., & Goldschmidt, R. J. (2022). Fatty acids of ten commonly consumed pulses. *Molecules*, 27, Article 7260. <https://doi.org/10.3390/molecules27217260>
- Carballeira, N. M., Betancourt, J. E., Orellano, E. A., & González, F. A. (2002). Total synthesis and biological evaluation of (5Z,9Z)-5,9-hexadecadienoic acid, an inhibitor of human topoisomerase I. *Journal of Natural Products*, 65(11), 1715–1718. <https://doi.org/10.1021/np0202576>
- Carrillo, C., Cavia, M. del M., & Alonso-Torre, S. R. (2012). Antitumor effect of oleic acid; mechanisms of action: A review. *Nutricion hospitalaria*, 27(6), 1860–1865. <https://doi.org/10.3305/nh.2012.27.6.6010>
- Cholewski, M., Tomczykowa, M., & Tomczyk, M. (2018). A comprehensive review of chemistry, sources and bioavailability of omega-3 fatty acids. *Nutrients*, 10(11), Article 1662. <https://doi.org/10.3390/nu10111662>
- D'Angelo, S., Motti, M. L., & Meccariello, R. (2020). ω -3 and ω -6 polyunsaturated fatty acids, obesity and cancer. *Nutrients*, 12(9), Article 2751. <https://doi.org/10.3390/nu12092751>
- De Lorgeril M. (2007). Essential polyunsaturated fatty acids, inflammation, atherosclerosis and cardiovascular diseases. *Sub-cellular biochemistry*, 42, 283–297. https://doi.org/10.1007/1-4020-5688-5_13
- Farag, M. A., & Gad, M. Z. (2022). Omega-9 fatty acids: Potential roles in inflammation and cancer management. *Journal of Genetic Engineering & Biotechnology*, 20(1), Article 48. <https://doi.org/10.1186/s43141-022-00329-0>
- Fialkow, J. (2016). Omega-3 fatty acid formulations in cardiovascular disease: dietary supplements are not substitutes for prescription products. *American Journal of Cardiovascular Drugs: Drugs, Devices, and other Interventions*, 16(4), 229–239. <https://doi.org/10.1007/s40256-016-0170-7>
- Grela, E. R., & Gunter, K. D. (1995). Fatty acid composition and tocopherol content of some legume seeds. *Animal Feed Science and Technology*, 52, 325–331. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)00733-P](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)00733-P)
- Kim, S. J., Zaidul, I. S., Suzuki, T., Mukasa, Y., Hashimoto, N., Takigawa, S., Noda, T., Matsuura-Endo, C., & Yamauchi, H. (2008). Comparison of phenolic compositions between common and tartary buckwheat (*Fagopyrum*) sprouts. *Food Chemistry*, 110(4), 814–820. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.050>
- Kumar, J. B. S., & Sharma, B. (2022). A review on neuropharmacological role of erucic acid: An omega-9 fatty acid from edible oils. *Nutritional Neuroscience*, 25(5), 1041–1055. <https://doi.org/10.1080/1028415X.2020.1831262>
- Megat-Rusydi, M. R., Noraliza, C. W., Azrina, A., & Zulkhairi, A. (2011). Nutritional changes in germinated legumes and rice varieties. *International Food Research Journal*, 18(2), 705–713.
- Ogori, A. F. (2020) Source, extraction and constituents of fats and oils. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 6, Article 60. <https://doi.org/10.24966/FSN-1076/100060>
- Pegoraro, N. S., Camponogara, C., Gehrcke, M., Giuliani, L. M., da Silva, D. T., Maurer, L. H., Dias, P., Emanuelli, T., Cruz, L., & Oliveira, S. M. (2020). Oleic acid-containing semisolid dosage forms exhibit in vivo anti-inflammatory effect via glucocorticoid receptor in a UVB radiation-induced skin inflammation model. *Inflammopharmacology*, 28(3), 775–786. <https://doi.org/10.1007/s10787-019-00675-5>
- Santiya, M., Aluko, R.E., & Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: An overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, Article 6. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5>
- Tomczyk, M. A (2018) Comprehensive review of chemistry, sources and bioavailability of omega-3 fatty acids. *Nutrients*, 10, Article 1662. <https://doi.org/10.3390/nu10111662>
- Veber, A. L., Leonova, S. A., Simakova, I. V., & Esmurzaeva, Zh. B. (2020). The development of a beverage with a dispersion structure from pea grains of domestic selection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 624, Article 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012127>
- Yoshida, H., Saiki, M., Yoshida, N., Tomiyama, Y., & Mizushina, Y. (2009). Fatty acid distribution in triacylglycerols and phospholipids of broad beans (*Vicia faba*). *Food Chemistry*, 112(4), 924–928. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.003>
- Yoshida, H., Tomiyama, Y., Tanaka, M., & Mizushina, Y. (2007). Distribution of fatty acids in triacylglycerols and phospholipids from peas (*Pisum sativum* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87, 2709–2714. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3035>
- Yoshida, H., Tomiyama, Y., Kita, S., & Mizushina, Y. (2005). Lipid classes, fatty acid composition and triacylglycerol molecular species of kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Lipid Science and Technology*, 107(5), 307–315. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200401078>
- Ziarno, M., Brys, J., Parzyszek, M., & Veber, A. (2020). Effect of lactic acid bacteria on the lipid profile of bean-based plant substitute of fermented milk. *Microorganisms*, 8(9), Article 1348. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091348>

УДК 535.372:637.073

Сравнительная оценка спектральных люминесцентных характеристик молока и молочных продуктов

ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Беляков Михаил Владимирович
E-mail: bmw20100@mail.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Беляков, М.В., & Никитин, Е.А. (2023). Сравнительная оценка спектральных люминесцентных характеристик молока и молочных продуктов, *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 90-102. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.412>

ПОСТУПИЛА: 04.05.2023

ПРИНЯТА: 12.06.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



М. В. Беляков, Е. А. Никитин

АННОТАЦИЯ

Введение: Разработка аналитических методов контроля молока и молочных продуктов имеет важное значение для их хранения и переработки. Спектральный фотолюминесцентный метод контроля отличается высокой чувствительностью и селективностью, не требует химикатов в качестве расходного материала.

Цель: Исследование спектральных характеристик фотолюминесценции молока и молочных продуктов для последующего создания методик их контроля.

Материалы и методы: Измеряли спектральные люминесцентные характеристики и рассчитывали параметры молока, сметаны, творога и сливочного масла (Агрофирма «Катынь», Смоленская область) в диапазоне 200-600нм по ранее разработанной методике с использованием дифракционного спектрофлуориметра «Флюорат-02-Панорама».

Результаты: Диапазон наибольшего возбуждения исследованных продуктов составил 220–340 нм. Основные максимумы возбуждения 231, 262, 271, 288, 308 и 322 нм. Для кисломолочных продуктов добавляется пик на 250 нм. Спектры фотолюминесценции и интегральные параметры молока при скисании практически не меняются. При этом для коротковолнового возбуждения (262 нм) как спектральные характеристики, так и интегральные потоки в два раза больше, чем для длинноволнового (442нм). Сравнивая потоки фотолюминесценции сметаны и молока видно, что при коротковолновом возбуждении для сметаны они примерно в два раза ниже, а при длинноволновом – примерно одинаковы, что согласуется со спектрами возбуждения. Для творога при всех использованных длинах волн возбуждения спектры получились качественно одинаковыми, но по интегральному потоку наилучшим является возбуждение 288нм. Предположительно, люминесценция больше при повышенном содержании белков и пониженном содержании жиров, что подтверждается исследованием фотолюминесценции сливочного масла.

Выводы: Для возбуждения молока и кисломолочных продуктов наиболее целесообразным является использование длин волн возбуждения 262 нм (молоко), 271 нм (сметана) и 288 нм (творог). Для сливочного масла следует выбирать более длинноволновое возбуждение – 308нм. При этом фотолюминесцентное излучение следует измерять в диапазонах 290-400нм для молока, сметаны и творога, а для масла – в диапазоне 340–450 нм. Полученные результаты могут быть применены для создания методик экспрессного контроля переработки и хранения молока и молочных продуктов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

молоко, творог, сметана, масло, спектр возбуждения, спектр фотолюминесценции, поток фотолюминесценции

Comparative Evaluation of Spectral Luminescent Characteristics of Milk and Dairy Products

FGBNU Federal Scientific
Agroengineering Center VIM, Moscow,
Russia

Mikhail V. Belyakov, Evgeny A. Nikitin

CORRESPONDENCE:

Mikhail V. Belyakov

Email: bmw20100@mail.ru

FOR CITATIONS:

Belyakov, M.V., & Nikitin, E.A. (2023). Comparative evaluation of spectral luminescent characteristics of milk and dairy products. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 90-102. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.412>

RECEIVED: 04.05.2023

ACCEPTED: 12.06.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Background: The development of analytical methods for the control of milk and dairy products is important for their storage and processing. The spectral photoluminescent control method is characterized by high sensitivity and selectivity, does not require chemicals as an expendable material.

Purpose: Investigation of spectral characteristics of photoluminescence of milk and dairy products for the subsequent creation of methods for their control.

Materials and Methods: Spectral luminescent characteristics were measured and parameters of milk, sour cream, cottage cheese and butter were calculated (Agrofirma "Katyn", Smolensk region) in the range of 200–600 nm according to a previously developed technique using a diffraction spectrofluorimeter "Fluorat-02-Panorama".

Results: The range of the greatest excitation of the studied products was 220–340 nm. The main excitation maxima are 231, 262, 271, 288, 308 and 322 nm. For fermented milk products, a peak of 250 nm is added. Photoluminescence spectra and integral parameters of milk practically do not change during souring. At the same time, for short-wave excitation (262 nm), both spectral characteristics and integral fluxes are twice as large as for long-wave excitation (442 nm). Comparing the photoluminescence fluxes of sour cream and milk, it can be seen that with short-wave excitation for sour cream, they are about two times lower, and with long-wave they are about the same, which is consistent with the excitation spectra. For cottage cheese, with all the excitation wavelengths used, the spectra turned out to be qualitatively the same, but according to the integral flow, the excitation of 288 nm is the best. Presumably, the luminescence is greater with an increased protein content and a reduced fat content, which is confirmed by the study of the photoluminescence of butter.

Conclusion: To excite milk and fermented milk products, it is most appropriate to use excitation wavelengths of 262 nm (milk), 271 nm (sour cream) and 288 nm (cottage cheese). For butter, you should choose a longer wavelength excitation – 308 nm. At the same time, photoluminescent radiation should be measured in the ranges of 290–400 nm for milk, sour cream and cottage cheese, and for butter – in the range of 340–450 nm. The results obtained can be applied to create express control methods for processing and storing milk and dairy products.

KEYWORDS

milk, cottage cheese, sour cream, butter, excitation spectrum, photoluminescence spectrum, photoluminescence flux

ВВЕДЕНИЕ

Такие пищевые продукты как молоко и его производные, играют важную роль в здоровом питании человека. Разработка аналитических методов, позволяющих быстро определять состав и качество обработки, проверять подлинность таких продуктов, имеет первостепенное значение. Традиционно для идентификации и анализа, методов производства, происхождения и обработки молока и молочных продуктов часто использовались химические, хроматографические (Рязанцева и др., 2022; Du et al., 2020; Zheng et al., 2022; Roy et al., 2022), молекулярные (Biçer & Sönmez, 2022) и другие методы (Oh et al., 2022; An et al., 2022; Ashoorirad et al., 2021; Мельденберг и др., 2020). Хотя эти общепринятые методы точны и надежны, они разрушительны, отнимают значительное время, не всегда дешевы и экологически безопасны и могут использоваться только в лабораторных условиях. Наоборот, в последние годы появились альтернативные методы, основанные на спектроскопии, которые стали инструментами для преодоления большинства ограничений, связанных с традиционными измерениями.

К таким спектральным методам относится, например, ядерно-магнитный резонанс, основанный на измерении профиля метаболитов. В исследовании (Li et al., 2017) он применялся для дифференциации типов молока и выявления его фальсификации. Этим же методом анализировали сицилийские сыры (Piacenza et al., 2022).

Метод отражательной ближней инфракрасной спектроскопии позволяет анализировать качество сухого молока (Khan et al., 2021), контролировать качество обработки молока (Vasafi et al., 2021), обнаруживать его фальсификации (Hosseini et al., 2021; Ghasemi et al., 2021; Ehsani et al., 2022) и географическое происхождение (Zhang et al., 2022), определять содержание белка (Wang et al., 2019; Panikuttira et al., 2020) и оценивать протеолиз (Ranvir et al., 2020). Также данный метод позволяет различать видовое происхождение и рецептуру сыров (Tataroulouzi et al., 2020; Tataroulouzi & Theocharis, 2021). С помощью инфракрасной спектроскопии средневолнового диапазона также определяли географическое происхождение молока (El Orche et al., 2021), его фальсификацию (Spina et al., 2022) и анализ казеина при коагуляции (Boukria et al., 2022).

Классическая абсорбционная спектроскопия видимого и инфракрасного диапазона (Stefanakis et al., 2022) применяется для исследования коагуляции цельного непастеризованного молока (Акулинин с соавт., 2016), измерения антиоксидантной активности при термообработке (Нилова и Камбулова, 2019) и обнаружения фальсификации меламинам (Liang et al., 2021).

Рамановская спектроскопия может быть успешно использована для различения образцов молока в соответствии с термической обработкой (сырое/пастеризованное) и их видов. Спектры комбинационного рассеяния дают ценную информацию, особенно для различения образцов молока по их происхождению (Yazgan et al., 2020; Batesttin et al., 2022). Кроме того, спектроскопия комбинационного рассеяния используется для контроля переработки молока (Vasafi et al., 2022) и поиска меламиновой фальсификации белка (Stevens et al., 2022; Hu & Lu, 2016). Рамановская спектроскопия с пространственным смещением позволяет быстро и просто получать спектры упакованных сыров без вскрытия упаковки (Arroyo-Cerezo et al., 2023) и их идентификации (Ostovar et al., 2021).

Гиперспектральная визуализация применялась для выявления одиночных и смешанных штаммов патогенов пищевого происхождения в цельном молоке и молочных продуктах: твороге и сырах чеддер (Unger et al., 2022). Изучена возможность применения методов сканирующей электронной микроскопии для идентификации подлинности сухого цельного и обезжиренного молока (Буданина и др., 2017).

В последнее время спектральные люминесцентные методы стали мощными аналитическими инструментами для разработки различных датчиков. В исследовании (Singh et al., 2022) разработан двухдлинноволновый люминесцентный датчик меламина. В работе (Panikuttira et al., 2020) был исследован прототип датчика для мониторинга сычужно-индуцированной коагуляции обезжиренного молока при различных концентрациях белка.

Вместе с тем, крайне мало информации о разработке и применении спектральных люминесцентных методов и современных приборов контроля таких молочных продуктов как сметана, сливочное масло, а также исследования процессов скисания моло-

ка с помощью фотолюминесценции. Данный метод отличается более простой аппаратной реализацией в отличие от ядерно-магнитного резонанса и комбинационного рассеяния, более распространенной и менее дорогостоящей элементной базой, в отличие от инфракрасных методов и не требует построения изображений в отличие от визуализирующих методов.

Целью данной работы является исследование спектральных характеристик фотолюминесценции молока и молочных продуктов для последующего создания методик их контроля. Задачами являются измерение спектральных характеристик возбуждения и испускания люминесценции для определения рабочих диапазонов спектров. Также произведен расчет интегральных параметров спектров для сопоставления люминесцентных свойств молока и молочных продуктов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Для измерений было взято питьевое пастеризованное молоко агрофирмы «Катынь» (Смоленская область) с массовой долей жира 3,2%. В процессе трехдневного скисания молоко хранилось в темном помещении при комнатной температуре 20 °С. Были использованы молочные продукты того же производителя: сметана жирностью 20%, творог жирностью 9% и сливочное масло жирностью 82,5%.

Оборудование

Измерения спектров возбуждения и люминесценции проводили на дифракционном спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (производство фирмы «Люмэкс», Россия).

Инструменты

Все спектры были скорректированы на инструментальные искажения возбуждения с помощью встроенного в спектрофлуориметрический комплекс программного пакета «PanoramaPro». В нем были

проведены усреднения спектров и расчет их интегральных параметров.

Методы

Производили измерения спектральных характеристик возбуждения (поглощения) $\eta_e(\lambda)$ в диапазоне от 200–600 нм по методике, аналогичной (Dorokhov et al., 2023). Для измерения спектра люминесценции $\varphi_l(\lambda)$ монохроматор возбуждения устанавливали на ту же длину волны, на которой наблюдается максимум спектра возбуждения при синхронном сканировании. Монохроматор регистрации люминесценции сканирует более длинноволновую область.

Анализ данных

По полученным спектральным характеристикам определяли интегральную поглощательную способность η по формуле:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_e(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$\eta_e(\lambda)$ — спектральная характеристика возбуждения; λ_1, λ_2 — границы спектрального диапазона возбуждения.

Интегральные параметры спектров $\varphi_l(\lambda)$, являющиеся потоками фотолюминесценции φ , определяли по формуле:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_l(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

$\varphi_l(\lambda)$ — спектральная характеристика фотолюминесценции; λ_1, λ_2 — границы спектрального диапазона фотолюминесценции.

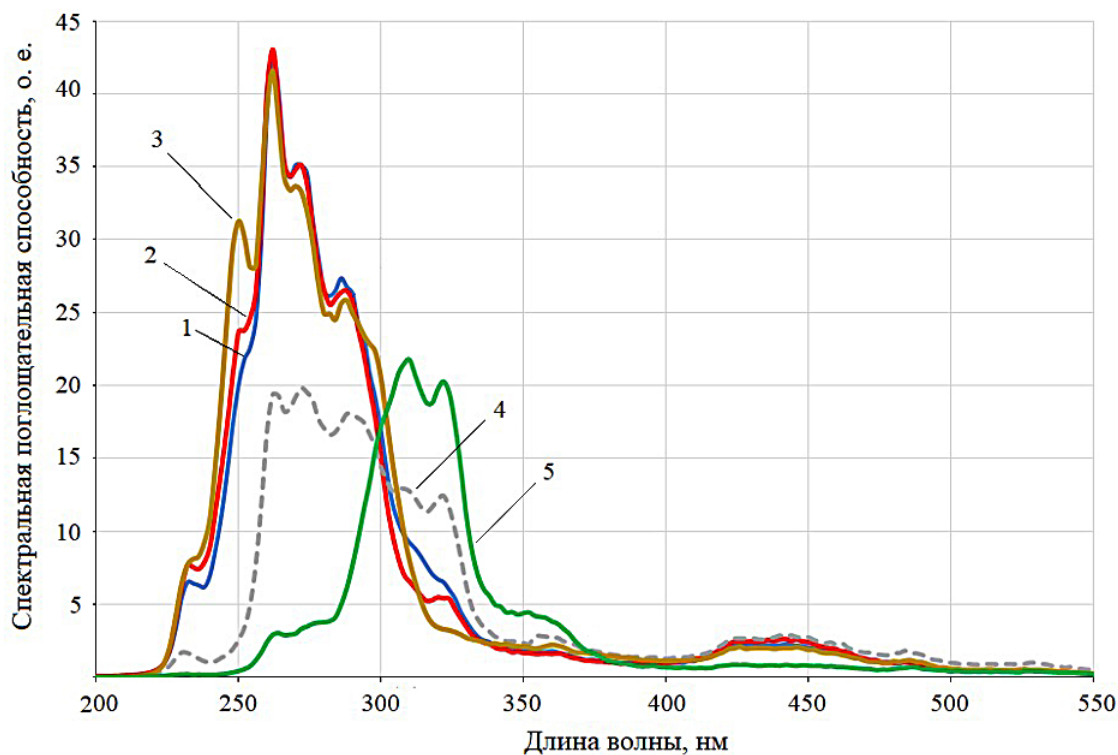
РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектры возбуждения молока и молочных продуктов представлены на Рисунке 1.

Основной диапазон возбуждения для исследованного молока и молочных продуктов составляет 220–340 нм, в диапазоне 410–500 нм возбуждение существенно ниже. Основные максимумы (пики) возбуждения 231, 262, 271, 288, 308 и 322 нм. В про-

Рисунок 1

Спектры возбуждения молока и молочных продуктов



Примечание: 1 – молоко пастеризованное, 2 – молоко скисшее, 3 – творог, 4 – сметана, 5 – масло

цессе скисания у молока появляется незначительный пик на 250 нм, который заметно увеличивается у творога. Для сметаны и масла этого пика нет.

Рассчитанные по формуле (1) интегральные поглощательные способности η в различных спектральных диапазонах представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Интегральные поглощательные способности молока и молочных продуктов в различных спектральных диапазонах

Диапазон, нм	Молоко свежее	Молоко пастеризованное	Сметана	Творог	Масло
220–236	57	66	18	70	3
236–256	289	340	47	433	8
256–268	433	441	198	435	30
268–282	443	439	260	420	49
282–304	489	466	362	504	240
304–316	113	82	149	103	247
316–338	106	90	184	67	310
348–380	51	47	79	65	107
400–476	127	143	170	126	58
476–500	18	19	35	23	14
200–500	2162	2168	1551	2288	1122

Спектры фотолюминесценции молока представлены на Рисунке 2.

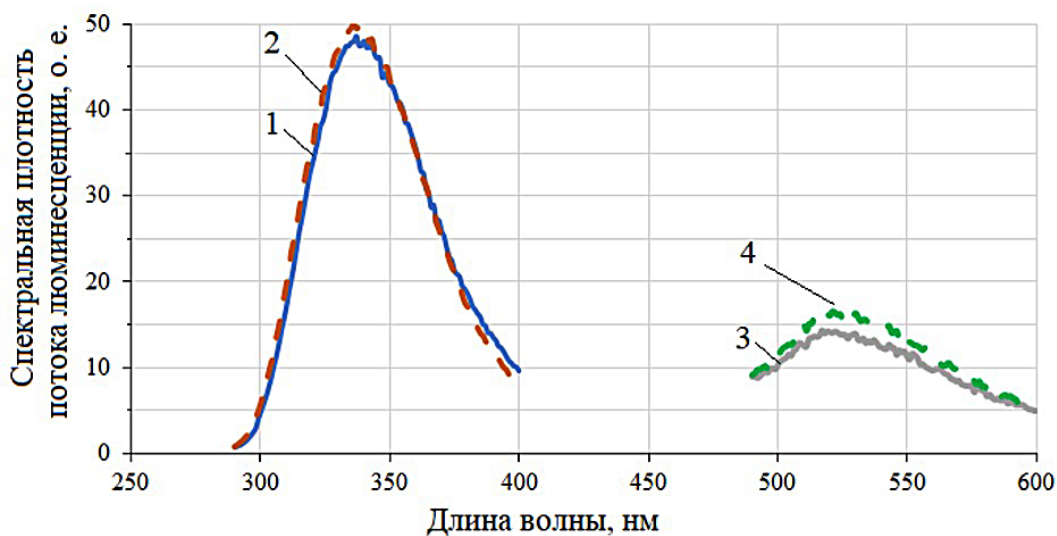
Спектры фотолюминесценции творога представлены на Рисунке 4.

Спектры фотолюминесценции сметаны представлены на Рисунке 3.

Спектры фотолюминесценции масла представлены на Рисунке 5.

Рисунок 2

Спектры фотолюминесценции молока



Примечание: исходного (1 и 3) и скисшего (2 и 4) при возбуждении излучением длины волны 262 нм (1 и 2) и 442 нм (3 и 4)

Рисунок 3

Спектры фотолюминесценции сметаны при возбуждении излучением длины волны $\lambda_{в} = 262$ нм (1), $\lambda_{в} = 271$ нм (2), $\lambda_{в} = 321$ нм (3) и $\lambda_{в} = 442$ нм (4)

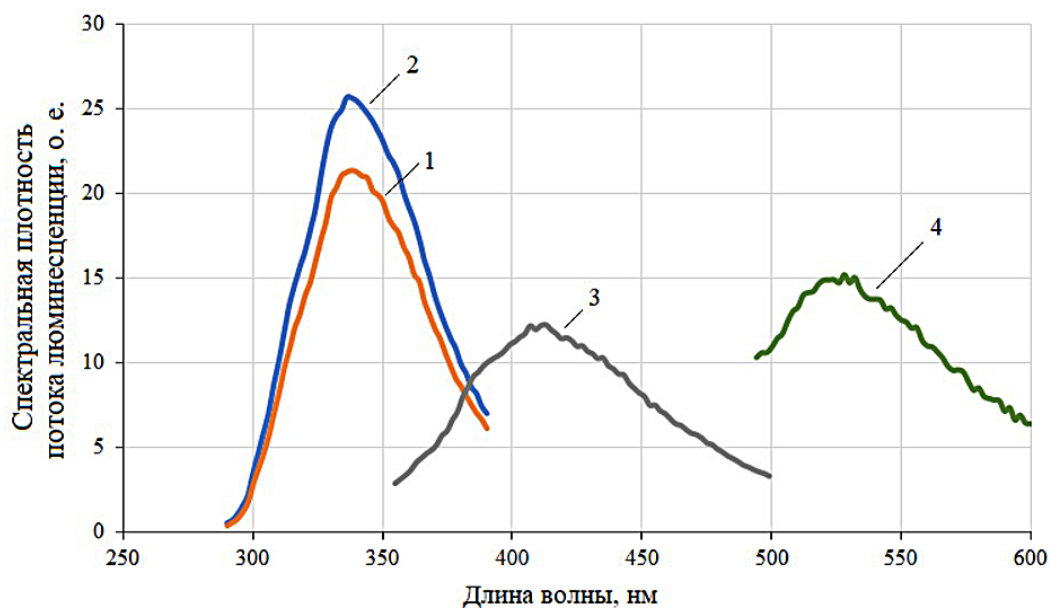


Рисунок 4

Спектры фотолюминесценции творога при возбуждении излучением длины волны $\lambda_{\text{в}} = 250$ нм (1), $\lambda_{\text{в}} = 262$ нм (2), $\lambda_{\text{в}} = 271$ нм (3) и $\lambda_{\text{в}} = 288$ нм (4)

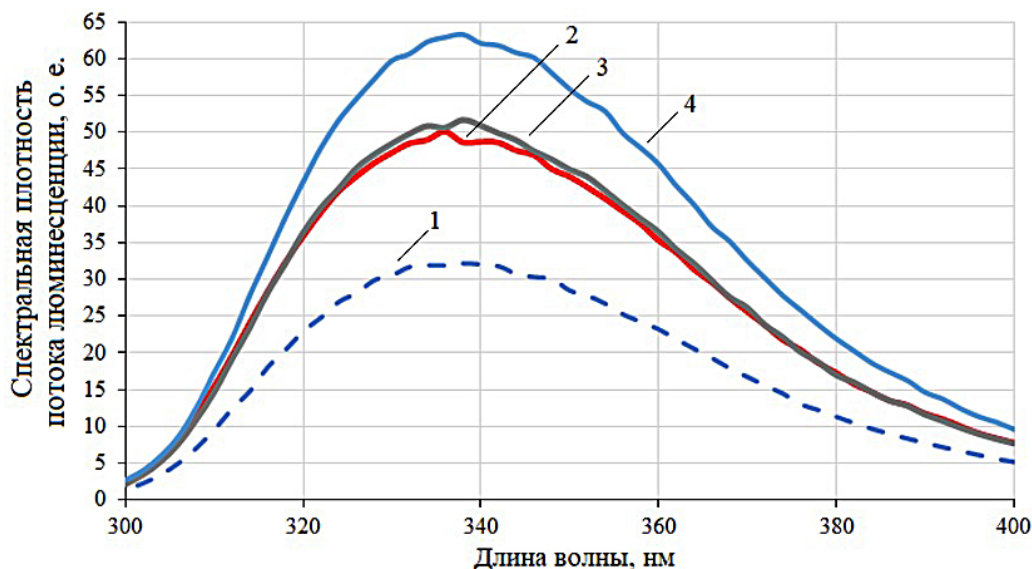
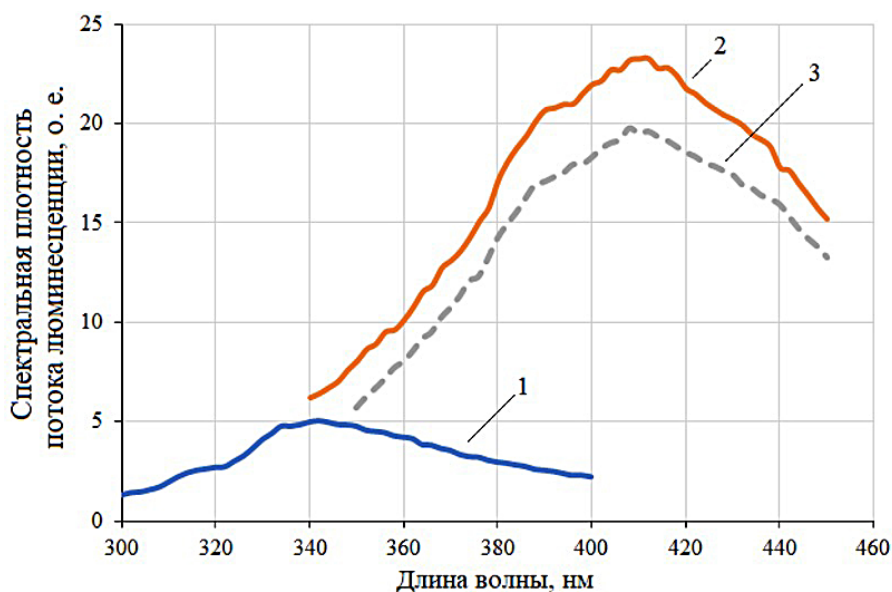


Рисунок 5

Спектры фотолюминесценции масла при возбуждении излучением длины волны $\lambda_{\text{в}} = 278$ нм (1), $\lambda_{\text{в}} = 308$ нм (2), $\lambda_{\text{в}} = 320$ нм (3)



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для молока при скисании характеристика $\eta_s(\lambda)$ меняется мало, но до 255 нм спектр скисшего молока немного превосходит спектр исходного, с 255 до 280 нм спектры практически не отличаются, а после 280 нм исходное молоко немного превосходит по поглощательной способности скисшее, что подтверждает ранее полученные результаты

(Беляков и др., 2022). Спектр возбуждения творога отличается от спектра возбуждения молока только наличием ярко выраженного максимума на 250 нм и отсутствием пика на 322 нм. Величина максимума $\eta_s(\lambda)$ для молока и творога (на 262 нм) составляет около 41–43 о. е.

Спектр возбуждения сметаны существенно отличается от спектров молока и творога как качественно, так и количественно, его «центр тяжести» смещен вправо. Два его основных максимума 262 и 271 нм не отличаются по величине (около 20 о. е.).

Для масла наибольшие пики на 308 нм (около 22 о. е. по величине) и на 322 нм (около 20 о. е.). Характеристика возбуждения для масла заметно смещена вправо. В длинноволновой области (410–500 нм) масло не поглощает излучение в отличие от остальных продуктов, имеющих небольшое поглощение (до 2–3 о. е.).

Интегральные потоки фотолюминесценции, рассчитанные по формуле (2), для свежего и скисшего молока практически не отличаются: для возбуждения излучением 262 нм они составляют 2912 о. е. и 2951 о. е. соответственно, а для возбуждения излучением 442 нм — 1129 о. е. и 1289 о. е.

Спектры фотолюминесценции сметаны при возбуждении излучением 262 и 271 нм качественно схожи (Рисунок 3), но интегральный поток при $\lambda_b = 271$ нм составляет 1496 о. е., что на 19% превышает поток при более коротковолновом возбуждении, т. е. именно 271 нм необходимо использовать для диагностики сметаны фотолюминесцентным методом. Для возбуждения излучением 321 нм и 442 нм потоки фотолюминесценции ниже: 1116 о. е. и 1254 о. е. соответственно. Сравнивая потоки фотолюминесценции сметаны и молока видно, что при коротковолновом возбуждении (262 и 271 нм) для сметаны они примерно в два раза ниже, а при длинноволновом (442 нм) — примерно одинаковы. Это согласуется с данными по возбуждению (Рисунок 1).

Для творога при всех использованных длинах волн возбуждения спектры получились качественно одинаковыми (Рисунок 4), но по интегральному потоку наилучшим является возбуждение 288 нм ($\Phi_{288} = 3604$ о. е.), хотя наибольший пик возбуждения (Рисунок 1) приходится на 262 нм. По величине максимума фотолюминесценция творога превосходит аналогичные показатели молока и других исследованных молочных продуктов, что может быть вызвано соотношением содержания белков и жиров. Предположительно, люминесценция больше при повышенном содержании белков и пониженном содержании жиров. Это также подтверждается исследованием фотолюминес-

ценции сливочного масла: при $\lambda_b = 278$ нм поток очень мал — $\Phi_{278} = 334$ о. е., а при длинноволновом возбуждении $\lambda_b = 308$ нм и 320 нм потоки 1777 и 1495 о. е. соответственно.

Pandey & Joshi (202) исследовавшие порчу и фальсификацию молока мочевиной в режиме реального времени зафиксировали, что обнаруженная люминесценция в диапазоне 520–540 нм принадлежит рибофлавины, при этом длина волны возбуждающего излучения составляет примерно 444 нм. Установленное нами изменение потока фотолюминесценции при $\lambda_e = 442$ нм для молочных продуктов можно объяснить тушением фотолюминесценции при скисании. Механизм тушения в основном объясняется передачей энергии резонанса флуоресценции и конкуренцией поглощения (Fan et al., 2022). Предположительно, для молочных продуктов с повышенным содержанием жиров (сметана, масло) сравнительно низкие потоки фотолюминесценции вызваны тушением люминесценции за счёт изменения концентрации молочного жира. Наиболее информативным диапазоном фотолюминесценции является 290–450 нм. В более длинноволновом диапазоне 490–600 нм различие как спектров, так и интегральных потоков практически не заметно.

Возможное ограничение результатов данного исследования может быть вызвано использованием определенных технологических операций при переработке, что накладывает отпечаток на физико-химические показатели и свойства готового продукта.

ВЫВОДЫ

Спектральная фотолюминесцентная диагностика молока и молочных продуктов (в том числе контроля массовых долей жиров и белков) имеет большой потенциал развития ввиду бесконтактности, высокой чувствительности и селективности, а также экологической безопасности и относительной дешевизне.

Для возбуждения молока и кисломолочных продуктов (творога, сметаны) наиболее целесообразным является использование длин волн возбуждения 262 нм (молоко), 271 нм (сметана) и 288 нм (творог). Для сливочного масла следует выбирать более

длинноволновое возбуждение — 308 нм. При этом фотолюминесцентное излучение следует измерять в диапазонах 290–400 нм для молока, сметаны и творога, а для масла — в диапазоне 340–450 нм.

Полученные результаты могут быть применены для создания базовой методики экспрессного контроля переработки и хранения молока с адаптивными методиками для отдельных видов молочных продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

- Акулинин, И.В., Осинцев, А.М., & Брагинский В.И. (2016). Разработка комбинированного оптического метода для исследования коагуляции молока. *Техника и технология пищевых производств*, 41(2), 164–169.
- Беляков, М. В., Самарин, Г. Н., Кудрявцев, А. А., & Ефременков, И. Ю. (2022). Изменение спектральных фотолюминесцентных свойств молока при скисании. *Инженерные технологии и системы*, 32(3), 460–475. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.460-475>
- Буданина, Л.Н., Верещагин, А.Л., & Бычин, Н.В. (2017). Исследование подлинности сухого молока методами термического анализа и электронной микроскопии. *Техника и технология пищевых производств*, 44(1), 93–99.
- Мельденберг, Д.Н., Полякова, О.С., Семёнова, Е.С., & Юрова, Е.А. (2020). Разработка комплексной оценки белкового состава молока сырья различных сельскохозяйственных животных для выработки продуктов функциональной направленности. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 3, 118–133. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.352>
- Нилова, Л.П., & Камбулова, Е.В. (2019). Влияние термообработки на химический состав и свойства сгущенного молока с сахаром. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*, 7(2), 54–61. <https://doi.org/10.14529/food190206>
- Рязанцева, К.А., Шерстнева, Н.Е., & Жижин, Н.А. (2022). Улучшение структурных свойств кисломолочного продукта внесением модифицированных сывороточных белков. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 2, 52–66. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.342>
- An, C., Yang, K., Zhu, J., Guo, W., Lu, C. & Zhu, X. (2022). Qualitative identification of mature milk adulteration in bovine colostrum using noise-reduced dielectric spectra and linear model. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102, 7313–7322. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12097>
- Arroyo-Cerezo, A., Jiménez-Carvelo, A. M., González-Casado, A., Ruisánchez, I., & Cuadros-Rodríguez, L. (2023). The potential of the spatially offset Raman spectroscopy (SORS) for implementing rapid and non-invasive in-situ authentication methods of plastic-packaged commodity foods — Application to sliced cheeses. *Food Control*, 146, 109522. [10.1016/j.foodcont.2022.109522](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109522)
- Ashoorirad, M., Baghbani, R., & Ghalamboran, M.R. (2021). Bioimpedance sensor to detect water content in milk based on van Der Pauw method. *IET Nanobiotechnology*, 15(7), 611–618. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12056>
- Batestin, C., Ângelo, F.F., Rocha, R.A., Anjos, V., & Bell, M.J.V. (2022). High resolution raman spectroscopy of raw and UHT bovine and Goat milk, Measurement. *Food*, 6, 100029. [10.1016/j.meafoo.2022.100029](https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100029)
- Biçer, Y. & Sönmez, G. (2022). Detecting cow milk in sheep yoghurt by TaqMan real-time PCR. *International Journal of Dairy Technology*, 75, 803–808. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12892>
- Boukria, O., Wang, J., Safarov, J., Gharsallaoui, A., Leriche, F., El Hadrami, E. M., & Ait-Kaddour, A. (2022). Delineation of molecular structure modification during coagulation of mixed camel and cow milk by mid-infrared spectroscopy and parallel factor analysis. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46, e15839. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15839>
- Dorokhov, A., Samarina, G.N., Kudryavtsev, A., Efremenkova, I., Ershova, I. & Belyakov, M. (2023). Control of milk acidity by photoluminescence. *International Journal of Food Science Technology*, 58, 222–227. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16195>
- Du, L., Lu, W., Zhang, Y., Gao, B., & Yu, L. (2020). Detection of milk powder in liquid whole milk using hydrolyzed peptide and intact protein mass spectral fingerprints coupled with data fusion technologies. *Food Science & Nutrition*, 8, 1471–1479. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1430>
- Ehsani, S., Dastgerdy, E.M., Yazdanpanah, H., & Parastar, H. (2022). Ensemble classification and regression techniques combined with portable near infrared spectroscopy for facile and rapid detection of water adulteration in bovine raw milk. *Journal of Chemometrics*, 37(1), e3395. <https://doi.org/10.1002/cem.3395>
- El Orche, A., Mamad, A., Elhamdaoui O., Cheikh A., El Karbane M., & Bouatia M. (2021). Comparison of machine learning classification methods for determining the geographical origin of raw milk using vibrational

ВКЛАД АВТОРОВ:

Беляков Михаил Владимирович: концептуализация, разработка методологии исследования, научное руководство исследованием, проведение исследования, подготовка черновика рукописи, рецензирование и редактирование рукописи.

Никитин Евгений Александрович: валидация данных, подготовка черновика рукописи, курирование данных, работа с программным обеспечением.

- spectroscopy. *Journal of Spectroscopy*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2021/5845422>
- Fan, L., Li J., Sun, C., Zhang, J., Zhao, Y., Li, W., & Chang, Z. (2022). An ultra-sensitive fluorescent sensor based on Zn-MOF for selective detection of riboflavin in food. *Journal of Solid State Chemistry*, 316, 123616. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123616>.
- Ghasemi, J. B., Hosseini, E., Daraei, B., Asadi, G., & Adib, N. (2021). Near-infrared spectroscopy and machine learning-based classification and calibration methods in detection and measurement of anionic surfactant in milk. *Journal of Food Composition and Analysis*, 104, 104170. [10.1016/j.jfca.2021.104170](https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104170)
- Hosseini, E., Ghasemi, J.B., Daraei, B., Asadi, G. & Adib, N. (2021). Application of genetic algorithm and multivariate methods for the detection and measurement of milk-surfactant adulteration by attenuated total reflection and near-infrared spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101, 2696–2703. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10894>
- Hu, Y. & Lu, X. (2016). Rapid detection of melamine in tap water and milk using conjugated “One-Step” molecularly imprinted polymers-surface enhanced raman spectroscopic sensor. *Journal of Food Science*, 81, N1272-N1280. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13283>
- Khan, A., Munir, M.T., Yu, W. & Young, B.R. (2021). Near-infrared spectroscopy and data analysis for predicting milk powder quality attributes. *International Journal of Dairy Technology*, 74, 235–245. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12734>
- Li, Q., Yu, Z., Zhu, D., Meng, X., Pang, X., Liu, Y., Frew, R., Chen, H. & Chen, G. (2017). The application of NMR-based milk metabolite analysis in milk authenticity identification. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 2875–2882. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8118>
- Liang, W, Zhu, Z, Yang, B, Zhu, X, & Guo, W. (2021). Detecting melamine-adulterated raw milk by using near-infrared transmission spectroscopy. *Journal of Food Process Engineering*, 44, e13685. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13685>
- Oh, H.E., Eathorne, S. & Jones, M.A. (2022). Use of biosensor technology in analysing milk and dairy components: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 75, 738–748. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12900>
- Ostovar pour, S., Afshari, R., Landry, J., Pillidge, C., Gill, H., & Blanch, E. (2021). Spatially offset Raman spectroscopy: A convenient and rapid tool to distinguish cheese made with milks from different animal species. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(10), 1705. <https://doi.org/10.1002/jrs.6179>
- Pandey, G., Joshi, A. (2021). Riboflavin as an internal marker for spoilage and adulteration detection in milk. *Food Chemistry*, 357, 129742. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129742>.
- Panikuttira, B., Payne, F.A., O’Shea, N., Tobin, J.T., O’Callaghan, D.J. & O’Donnell, C.P. (2020). Investigation of an in-line prototype fluorescence and infrared backscatter sensor to monitor rennet-induced coagulation of skim milk at different protein concentrations. *International Journal of Food Science & Technology*, 55, 175–182. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14267>
- Piacenza, E., Chillura Martino, D. F., Cinquanta, L., Conte, P., & Lo Meo, P. (2022). Differentiation among dairy products by combination of fast field cycling NMR relaxometry data and chemometrics. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 60(3), 369. <https://doi.org/10.1002/mrc.5226>
- Ranvir, S., Sharma, R., Gandhi, K., Upadhyay, N. & Mann, B. (2020). Assessment of proteolysis in ultra-high temperature milk using attenuated total reflectance–Fourier transform infrared spectroscopy. *International Journal of Dairy Technology*, 73, 366–375. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12683>
- Roy, M., Doddappa, M., Yadav, B.K., Jaganmohan, R., Sinija, V.R., Manickam, L. & Sarvanan, S. (2022). Detection of soybean oil adulteration in cow ghee (clarified milk fat): an ultrafast study using flash gas chromatography electronic nose coupled with multivariate chemometrics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102, 4097–4108. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11759>
- Singh, V. R., Pandey, S. P., & Singh P. K. (2022). A unique supramolecular assembly between sulfated cyclodextrin, silver and melamine: Towards a fluorescence based dual wavelength detection approach for melamine, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 428, 113862. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.113862>
- Spina, A. A., Ceniti, C., Piras, C., Tilocca, B., Britti, D., & Morittu, V. M. (2022). Mid-infrared (MIR) spectroscopy for the detection of cow’s milk in buffalo milk. *Journal of Animal Science and Technology*, 64(3), 531–538. <https://doi.org/10.5187/jast.2022.e22>
- Stefanakis, M., Bassler, M. C., Böltzig, T., Ostertag, E., Allnoch, D., Zuber, R., Brecht, M., & Rebner, K. (2022). Improved process control by using the effective scattering coefficients to determine the fat content in homogenized cow-based milk with multivariate data modeling. *ACS Food Science & Technology*, 2(3), 548–557. <https://doi.org/10.1021/acfoodscitech.1c00435>
- Stevens, F., Beghuin, D., Delgrange, M., Arnould, Q., Baeten, V., & Fernández Pierna, J. A. (2022). Raman Fourier transform imaging: Application to melamine and melamine-milk powder mixtures analysis. *Journal of Raman Spectroscopy*, 53(11), 1947. <https://doi.org/10.1002/jrs.6415>
- Tarapoulouzi, M., Kokkinofa, R., & Theocharis, C.R. (2020). Chemometric analysis combined with FTIR spectroscopy of milk and Halloumi cheese samples according to species’ origin. *Food Science & Nutrition*, 8, 3262–3273. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1603>
- Tarapoulouzi M., Theocharis C. R. (2021). Discrimination of Cheddar, Kefalotyri, and Halloumi cheese samples by the chemometric analysis of Fourier transform infrared spectroscopy and proton nuclear magnetic resonance spectra. *Journal of Food Process Engineering*, 45, 7. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13933>
- Unger, P., Sekhon, A. S., Chen, X., & Michael, M. (2022). Developing an affordable hyperspectral imaging system for rapid identification of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in dairy products. *Food Science & Nutrition*, 10, 1175–1183. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2749>
- Vasafi P. S., Paquet-Durand O., Brettschneider K., Hinrichs J., & Hitzmann B. (2021). Anomaly detection during milk

- processing by autoencoder neural network based on near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 299, 110510. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110510>
- Vasafi, P. S. & Hitzmann, B. (2022). Comparison of various classification techniques for supervision of milk processing. *Engineering in Life Sciences*, 22, 279–287. <https://doi.org/10.1002/elsc.202100098>
- Wang, Y., Guo, W., Zhu, X. & Liu, Q. (2019). Effect of homogenisation on detection of milk protein content based on NIR diffuse reflectance spectroscopy. *International Journal of Food Science & Technology*, 54, 387–395. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13948>
- Yazgan, N.N., Genis, H.E., Bulat, T., Topcu, A., Durna, S., Yetisemiyen, A. & Boyaci, I.H. (2020). Discrimination of milk species using Raman spectroscopy coupled with partial least squares discriminant analysis in raw and pasteurized milk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100, 4756–4765. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10534>
- Zhang, T., Wu, X., Wu, B., Dai, C., & Fu, H. (2022). Rapid authentication of the geographical origin of milk using portable near-infrared spectrometer and fuzzy uncorrelated discriminant transformation. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14040. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14040>
- Zheng, B, Yu, Y, Wang, M, Wang, J, & Xu, H. (2022). Qualitative-quantitative analysis of multi-mycotoxin in milk using the high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry coupled with the quick, easy, cheap, effective, rugged and safe method. *Journal of Separation Science*, 45, 432–440. <https://doi.org/10.1002/jssc.202100641>

REFERENCES

- Akulinin, I.V., Osincev, A.M., & Braginskij V.I. (2016). Razrabotka kombinirovannogo opticheskogo metoda dlja issledovaniya koaguljacii moloka [Development of a combined optical method for the study of milk coagulation]. *Tehnika i tehnologija pishhevih proizvodstv [Equipment and technology of food production]*, 41(2), 164–169.
- Belyakov, M. V., Samarin, G. N., Kudrjavcev, A. A., & Efremkov, I. Ju. (2022). Izmenenie spektral'nyh fotoluminescentnyh svojstv moloka pri skisanii [Change of spectral photoluminescent properties of milk during souring]. *Inzhenernye tehnologii i sistemy [Engineering technologies and systems]*, 32(3), 460–475. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.460-475>
- Budanina, L.N., Vereshhagin, A.L., & Bychin, N.V. (2017). Issledovanie podlinnosti suhogo moloka metodami termicheskogo analiza i jelektronnoj mikroskopii [Investigation of the authenticity of milk powder by thermal analysis and electron microscopy]. *Tehnika i tehnologija pishhevih proizvodstv [Equipment and technology of food production]*, 44(1), 93–99.
- Mel'denberg, D.N., Poljakova, O.S., Semjonova, E.S., & Jurova, E.A. (2020). Razrabotka kompleksnoj ochenki belkovogo sostava moloka syr'ja razlichnyh sel'skohozjajstvennyh zhivotnyh dlja vyrabotki produktov funkcional'noj napravlenosti [Development of a comprehensive assessment of the protein composition of milk raw materials of various farm animals for the production of functional products]. *Hranenie i pererabotka sel'hozsy'r'ja [Storage and processing of agricultural raw materials]*, 3, 118–133. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.352>
- Nilova, L.P., & Kambulova, E.V. (2019). Vlijanie termoobrabotki na himicheskij sostav i svojstva sgushhennogo moloka s saharom [The effect of heat treatment on the chemical composition and properties of condensed milk with sugar]. *Vestnik JuUrGU. Serija «Pishheve i biotehnologii» [Bulletin of SUSU. Series “Food and biotechnology”]*, 7(2), 54–61. <https://doi.org/10.14529/food190206>
- Rjazanceva, K.A., Sherstneva, N.E., & Zhizhin, N.A. (2022). Uluchshenie strukturnyh svojstv kislomolochnogo produkta vneseniem modifitsirovannyh syvorotochnyh belkov [Improvement of the structural properties of the fermented milk product by introducing modified whey proteins]. *Hranenie i pererabotka sel'hozsy'r'ja [Storage and processing of agricultural raw materials]*, 2, 52–66. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.342>
- An, C., Yang, K., Zhu, J., Guo, W., Lu, C. & Zhu, X. (2022). Qualitative identification of mature milk adulteration in bovine colostrum using noise-reduced dielectric spectra and linear model. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102, 7313–7322. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12097>
- Arroyo-Cerezo, A., Jiménez-Carvelo, A. M., González-Casado, A., Ruisánchez, I., & Cuadros-Rodríguez, L. (2023). The potential of the spatially offset Raman spectroscopy (SORS) for implementing rapid and non-invasive in-situ authentication methods of plastic-packaged commodity foods – Application to sliced cheeses. *Food Control*, 146, 109522. [10.1016/j.foodcont.2022.109522](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109522)
- Ashoorirad, M., Baghbani, R., & Ghalamboran, M.R. (2021). Bioimpedance sensor to detect water content in milk based on van Der Pauw method. *IET Nanobiotechnology*, 15(7), 611–618. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12056>
- Batestin, C., Ângelo, F.F., Rocha, R.A., Anjos, V., & Bell, M.J.V. (2022). High resolution raman spectroscopy of raw and UHT bovine and Goat milk, Measurement. *Food*, 6, 100029. [10.1016/j.meafoo.2022.100029](https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100029)
- Biçer, Y. & Sönmez, G. (2022). Detecting cow milk in sheep yoghurt by TaqMan real-time PCR. *International Journal of Dairy Technology*, 75, 803–808. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12892>
- Boukria, O., Wang, J., Safarov, J., Gharsallaoui, A., Leriche, F., El Hadrami, E. M., & Ait-Kaddour, A. (2022). Delineation of molecular structure modification during coagulation of mixed camel and cow milk by mid-infrared spectroscopy and parallel factor analysis. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46, e15839. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15839>
- Dorokhov, A., Samarin, G.N., Kudryavtsev, A., Efremkov, I., Ershova, I. & Belyakov, M. (2023). Control of milk acidity

- by photoluminescence. *International Journal of Food Science Technology*, 58, 222–227. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16195>
- Du, L., Lu, W., Zhang, Y., Gao, B., & Yu, L. (2020). Detection of milk powder in liquid whole milk using hydrolyzed peptide and intact protein mass spectral fingerprints coupled with data fusion technologies. *Food Science & Nutrition*, 8, 1471–1479. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1430>
- Ehsani, S., Dastgerdy, E.M., Yazdanpanah, H., & Parastar, H. (2022). Ensemble classification and regression techniques combined with portable near infrared spectroscopy for facile and rapid detection of water adulteration in bovine raw milk. *Journal of Chemometrics.*, 37(1), e3395. <https://doi.org/10.1002/cem.3395>
- El Orche, A., Mamad, A., Elhamdaoui O., Cheikh A., El Karbane M., & Bouatia M. (2021). Comparison of machine learning classification methods for determining the geographical origin of raw milk using vibrational spectroscopy. *Journal of Spectroscopy*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2021/5845422>
- Fan, L., Li J., Sun, C., Zhang, J., Zhao, Y., Li, W., & Chang, Z. (2022). An ultra-sensitive fluorescent sensor based on Zn-MOF for selective detection of riboflavin in food. *Journal of Solid State Chemistry*, 316, 123616, <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123616>.
- Ghasemi, J. B., Hosseini, E., Daraei, B., Asadi, G., & Adib, N. (2021). Near-infrared spectroscopy and machine learning-based classification and calibration methods in detection and measurement of anionic surfactant in milk. *Journal of Food Composition and Analysis*, 104, 104170. [10.1016/j.jfca.2021.104170](https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104170)
- Hosseini, E., Ghasemi, J.B., Daraei, B., Asadi, G. & Adib, N. (2021). Application of genetic algorithm and multivariate methods for the detection and measurement of milk-surfactant adulteration by attenuated total reflection and near-infrared spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101, 2696–2703. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10894>
- Hu, Y. & Lu, X. (2016). Rapid detection of melamine in tap water and milk using conjugated “One-Step” molecularly imprinted polymers-surface enhanced raman spectroscopic sensor. *Journal of Food Science*, 81, N1272-N1280. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13283>
- Khan, A., Munir, M.T., Yu, W. & Young, B.R. (2021). Near-infrared spectroscopy and data analysis for predicting milk powder quality attributes. *International Journal of Dairy Technology*, 74, 235–245. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12734>
- Li, Q., Yu, Z., Zhu, D., Meng, X., Pang, X., Liu, Y., Frew, R., Chen, H. & Chen, G. (2017). The application of NMR-based milk metabolite analysis in milk authenticity identification. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 2875–2882. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8118>
- Liang, W, Zhu, Z, Yang, B, Zhu, X, & Guo, W. (2021). Detecting melamine-adulterated raw milk by using near-infrared transmission spectroscopy. *Journal of Food Process Engineering*, 44, e13685. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13685>
- Oh, H.E., Eathorne, S. & Jones, M.A. (2022). Use of biosensor technology in analysing milk and dairy components: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 75, 738–748. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12900>
- Ostovar pour, S., Afshari, R., Landry, J., Pillidge, C., Gill, H., & Blanch, E. (2021). Spatially offset Raman spectroscopy: A convenient and rapid tool to distinguish cheese made with milks from different animal species. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(10), 1705. <https://doi.org/10.1002/jrs.6179>
- Pandey, G., Joshi, A. (2021). Riboflavin as an internal marker for spoilage and adulteration detection in milk. *Food Chemistry*, 357, 129742. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129742>.
- Panikuttira, B., Payne, F.A., O’Shea, N., Tobin, J.T., O’Callaghan, D.J. & O’Donnell, C.P. (2020). Investigation of an in-line prototype fluorescence and infrared backscatter sensor to monitor rennet-induced coagulation of skim milk at different protein concentrations. *International Journal of Food Science & Technology*, 55, 175–182. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14267>
- Piacenza, E., Chillura Martino, D. F., Cinquanta, L., Conte, P., & Lo Meo, P. (2022). Differentiation among dairy products by combination of fast field cycling NMR relaxometry data and chemometrics. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 60(3), 369. <https://doi.org/10.1002/mrc.5226>
- Ranvir, S., Sharma, R., Gandhi, K., Upadhyay, N. & Mann, B. (2020). Assessment of proteolysis in ultra-high temperature milk using attenuated total reflectance–Fourier transform infrared spectroscopy. *International Journal of Dairy Technology*, 73, 366–375. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12683>
- Roy, M., Doddappa, M., Yadav, B.K., Jaganmohan, R., Sinija, V.R., Manickam, L. & Sarvanan, S. (2022). Detection of soybean oil adulteration in cow ghee (clarified milk fat): an ultrafast study using flash gas chromatography electronic nose coupled with multivariate chemometrics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102, 4097–4108. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11759>
- Singh, V. R., Pandey, S. P., & Singh P. K. (2022). A unique supramolecular assembly between sulfated cyclodextrin, silver and melamine: Towards a fluorescence based dual wavelength detection approach for melamine, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 428, 113862. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.113862>
- Spina, A. A., Ceniti, C., Piras, C., Tilocca, B., Britti, D., & Morittu, V. M. (2022). Mid-infrared (MIR) spectroscopy for the detection of cow’s milk in buffalo milk. *Journal of Animal Science and Technology*, 64(3), 531–538. <https://doi.org/10.5187/jast.2022.e22>
- Stefanakis, M., Bassler, M. C., Böltzig, T., Ostertag, E., Allnoch, D., Zuber, R., Brecht, M., & Rebner, K. (2022). Improved process control by using the effective scattering coefficients to determine the fat content in homogenized cow-based milk with multivariate data modeling. *ACS Food Science & Technology*, 2(3), 548–557. <https://doi.org/10.1021/acscfoodscitech.1c00435>
- Stevens, F., Beghuin, D., Delgrange, M., Arnould, Q., Baeten, V., & Fernández Pierna, J. A. (2022). Raman Fourier transform imaging: Application to melamine and melamine-milk powder mixtures analysis. *Journal of Raman Spectroscopy*, 53(11), 1947. <https://doi.org/10.1002/jrs.6415>

- Tarapoulouzi, M., Kokkinofa, R., & Theocharis, C.R. (2020). Chemometric analysis combined with FTIR spectroscopy of milk and Halloumi cheese samples according to species' origin. *Food Science & Nutrition*, 8, 3262– 3273. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1603>
- Tarapoulouzi M., Theocharis C. R. (2021). Discrimination of Cheddar, Kefalotyri, and Halloumi cheese samples by the chemometric analysis of Fourier transform infrared spectroscopy and proton nuclear magnetic resonance spectra. *Journal of Food Process Engineering*, 45, 7. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13933>
- Unger, P., Sekhon, A. S., Chen, X., & Michael, M. (2022). Developing an affordable hyperspectral imaging system for rapid identification of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in dairy products. *Food Science & Nutrition*, 10, 1175– 1183. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2749>
- Vasafi P. S., Paquet-Durand O., Brettschneider K., Hinrichs J., & Hitzmann B. (2021). Anomaly detection during milk processing by autoencoder neural network based on near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 299, 110510. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110510>
- Vasafi, P. S. & Hitzmann, B. (2022). Comparison of various classification techniques for supervision of milk processing. *Engineering in Life Sciences*, 22, 279– 287. <https://doi.org/10.1002/elsc.202100098>
- Wang, Y., Guo, W., Zhu, X. & Liu, Q. (2019). Effect of homogenisation on detection of milk protein content based on NIR diffuse reflectance spectroscopy. *International Journal of Food Science & Technology*, 54, 387–395. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13948>
- Yazgan, N.N., Genis, H.E., Bulat, T., Topcu, A., Durna, S., Yetisemiyen, A. & Boyaci, I.H. (2020). Discrimination of milk species using Raman spectroscopy coupled with partial least squares discriminant analysis in raw and pasteurized milk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100, 4756–4765. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10534>
- Zhang, T., Wu, X., Wu, B., Dai, C., & Fu, H. (2022). Rapid authentication of the geographical origin of milk using portable near-infrared spectrometer and fuzzy uncorrelated discriminant transformation. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14040. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14040>
- Zheng, B, Yu, Y, Wang, M, Wang, J, & Xu, H. (2022). Qualitative-quantitative analysis of multi-mycotoxin in milk using the high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry coupled with the quick, easy, cheap, effective, rugged and safe method. *Journal of Separation Science*, 45, 432– 440. <https://doi.org/10.1002/jssc.202100641>

УДК 664.14:664.34

Процесс кристаллизации эквивалентов масла какао: механизм, факторы и новые аспекты

Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности – филиал ФГБУН «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, г. Москва, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Мазукабзова Элла Витальевна
E-mail: ryabkovaella@mail.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мазукабзова, Э.В., & Руденко, О.С. (2023). Процесс кристаллизации эквивалентов масла какао: механизм, факторы и новые аспекты. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 103-117. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.443>

ПОСТУПИЛА: 07.06.2023

ПРИНЯТА: 17.07.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



Э. В. Мазукабзова, О. С. Руденко

АННОТАЦИЯ

Введение: Глазированная кондитерская продукция традиционно пользуется высоким спросом у потребителей. Производство шоколадной глазури в России в 2022 году увеличилось на 8,6%. Масло какао является дорогостоящим сырьем. Использование эквивалентов масла какао (ЭМК) позволяет обеспечить стабильное производство шоколадных глазури. ЭМК в основном аналогичны по триацилглицеридному составу (ТАГ) с маслом какао, но часто не идентичны. Характеристики кристаллизации масла какао и ЭМК, такие как температура и продолжительность, во многом определяют процесс структурообразования глазури.

Цель исследования: Изучить влияние жирнокислотного и триглицеридного состава ЭМК на их процесс кристаллизации. Объектами исследования являлись образцы масла какао и ЭМК различных производителей.

Материалы и методы: Характеристику кристаллизации жиров определяли калориметрическим методом, триглицеридный и жирнокислотный состав исследовали методом газожидкостной хроматографии.

Результаты: Сравнение результатов измерения температуры кристаллизации, полученных на приборе Дженсена и на приборе «MultiTherm», показало необходимость введения коэффициентов корреляции. Установлена взаимосвязь между содержанием триглицеридов POS и POP и температурой застывания жиров. Наблюдалась корреляция времени кристаллизации и содержания суммы триглицеридов SOS и POP, с увеличением которой в образцах ЭМК продолжительность кристаллизации сокращалась.

Выводы: Предложено для более полной оценки процесса кристаллизации жиров наряду с температурой застывания T_{max} , учитывать и температуру начала кристаллизации T_{min} , продолжительность достижения температурных минимума и максимума τ_{min} и τ_{max} .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

эквиваленты масла какао, кристаллизация жиров, полиморфизм, температура застывания, кривая охлаждения, жирнокислотный состав, триацилглицеридный состав

The Crystallization Process of Cocoa Butter Equivalents: Mechanism, Factors and New Aspects

Ella V. Mazukabzova, Oksana S. Rudenko

All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry – branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center of Food Systems named after V.M. Gorbатов" RAS, Moscow, Russia

CORRESPONDENCE:

Ella V. Mazukabzova

E-mail: ryabkovaella@mail.ru

FOR CITATIONS:

Mazukabzova, E.V., & Rudenko, O.S. (2023). The crystallization process of cocoa butter equivalents: Mechanism, factors and new aspects. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 103-117 <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.443>

RECEIVED: 07.06.2023

ACCEPTED: 17.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Background: Glazed confectionery products are traditionally in high demand among consumers. Production of chocolate icing in Russia in 2022 increased by 8.6%. Cocoa butter is a costly raw material. The use of cocoa butter equivalents (CBE) enables the stable production of chocolate glazes. CBE are mostly similar in triacylglyceride composition (TGS) to cocoa butter, but often not identical. The crystallization characteristics of cocoa butter and CBE, such as temperature and duration, largely determine the structuring process of the glaze.

Purpose: To study the influence of the fatty acid and triglyceride composition of CBE on their crystallization process. Purpose of the study: to investigate the influence of fatty acid and triglyceride composition of CBE on their crystallization process. The objects of the study were samples of cocoa butter and CBE from different manufacturers.

Materials and Methods: Characteristics of fat crystallization were determined by colorimetric method, triglyceride and fatty acid composition were studied by gas-liquid chromatography.

Results: A comparison of the results of crystallization temperature measurements obtained on the Jensen device and on the MultiTherm device showed the necessity of introducing correlation coefficients. The relationship between the content of triglycerides POS and POP and the solidification temperature of fats was established. We observed a correlation of crystallization time and the content of the sum of triglycerides SOS and POP, with the increase of which the duration of crystallization decreased in CBE samples.

Conclusion: For a more complete assessment of the process of crystallization of fats, along with the solidification temperature T_{\max} it was proposed to take into account the temperature of the beginning of crystallization T_{\min} , the duration of reaching the temperature minimum and maximum τ_{\min} and τ_{\max} .

KEYWORDS

cocoa butter equivalents, fat crystallization, polymorphism, solidification temperature, cooling curve, fatty acid composition, triacylglyceride composition

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно высоким спросом у потребителей пользуется глазированная кондитерская продукция. Ассортимент глазированных изделий включает конфеты, составляющие 43% от общего количества, пастилу, зефир, сбивные конфеты — 31%, мучные кондитерские изделия — 19%, хлебобулочную и молочную продукцию — 5%, орехи и сухофрукты — 2%^{1,2}. Согласно данным Росстата производство шоколадной глазури в 2022 году увеличилось на 8,6%³. Глазурь представляет собой дисперсию твердых частиц сахара и какао продуктов в матрице кристаллизованного жира (Ewens et al., 2021). Жировая фаза шоколадной глазури согласно ГОСТ Р 53897–2010⁴ может быть представлена маслом какао, эквивалентами масла какао (ЭМК) и улучшителями масла какао SOS-типа.

Масло какао является дорогостоящим сырьем, цены на которое постоянно растут⁵. В связи с тем, что плоды какао растут в узкой климатической зоне, их доступность и цена во многом зависят от урожайности, стабильности поставок и геополитической ситуации в регионах их произрастания (Линовская & Мазукабзова, 2017; Castro-Alayo et al., 2023; Velásquez-Reyes et al., 2023). Использование ЭМК, имеющих близкий к маслу какао жирнокислотный состав, позволяет обеспечить стабильное производство шоколадных глазурей.

Производство эквивалентов и заменителей масла какао в 2022 году в России по оценкам ID-Marketing⁶ выросло на 8,5%, до 63,6 тыс. тонн, при этом импорт эквивалентов масла какао в Россию вырос на 75,5%. Основной объем эквивалентов и заменителей масла какао в стране производится в Белгородской области. Разработка новых видов эквивалентов масла какао остается актуальной задачей.

Разрабатываемые ЭМК должны быть полностью совместимы по физическим и сенсорным свойствам с маслом какао (Aumprai et al., 2022; Lipp et al., 2001;

Jin et al, 2019). ЭМК в основном аналогичны по триацилглицеридному составу (ТАГ) с маслом какао, но часто не идентичны (Castro-Alayo et al., 2023). ЭМК получают смешиванием экзотических масел и их фракций, таких как эллипе, борнео, пальмового, сал, ши, кокум, из ядер манго. Для того чтобы получить ЭМК с триглицеридным составом, близким к маслу какао, для модификации смеси тропических масел иногда используют sn-1,3-специфическую липазу. В исследовании (Bahari & Akoh, 2018) ЭМК из масла иллипе и средней фракции пальмы был синтезирован путем ферментативной реакции переэтерификации с использованием иммобилизованного Lipozyme® RM IM, что позволило получить переэтерифицированный продукт с очень похожим на масло какао триглицеридным профилем. Поскольку триглицеридный профиль ЭМК может не быть идентичен с маслом какао, важно учитывать его влияние на физические свойства глазури.

Кристаллизация жиров — это ключевой процесс, который влияет на структуру и свойства продуктов на жировой основе: шоколада, маргарина, спредов, жиров для хлебобулочных и кондитерских изделий, молочных продуктов и шортенингов общего назначения (Devos et al., 2020; Pirouzian et al., 2020). Особенности кристаллизации жиров зависят от композиции триглицеридов. Известно, что масло какао и его эквиваленты в основном состоят из композиций симметричных триглицеридов, тип которых определяет свойства жира — поведение при кристаллизации и твердость (Кондратьев, 2015; Aumprai et al., 2022).

Характеристики кристаллизации масла какао и эквивалентов масла какао, такие как температура и продолжительность, будут во многом определять процесс структурообразования глазури, что подтверждено в ряде исследований (Линовская & Мазукабзова, 2017; Мазукабзова & Зайцева, 2022; Chen et al., 2021; Ewens et al., 2021; Liu et al., 2022).

¹ Рынок шоколада и шоколадных изделий в России 2016–2022 гг. Цифры, тенденции, прогноз. <https://tk-solutions.ru/russia-rynokshokolada-i-saxaristykh-izdelij>

² Промышленное производство в России: Статистический сборник. (2021). М.: Росстат.

³ Федеральная служба государственной статистики. https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial

⁴ ГОСТ Р 53897–2010. (2013). Глазурь. Общие технические условия. М.: Стандартинформ.

⁵ Cocoa Market Review. (2019). <https://www.icco.org/wp-content/uploads/ICCO-Monthly-Cocoa-Market-Review-December-2019.pdf>

⁶ Российский рынок маргарина и специальных жиров по итогам 2019–2022 гг. <https://foodmarket.spb.ru/archive/2023/222751/222757/>

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Различия между жирами по длине цепи, степени ненасыщенности и упорядоченности триглицеридов обуславливают разницу в физико-химических свойствах этих жиров и, в частности, в характеристиках процесса кристаллизации (Yao et al., 2020a; Yao et al., 2020b; Chen et al., 2022).

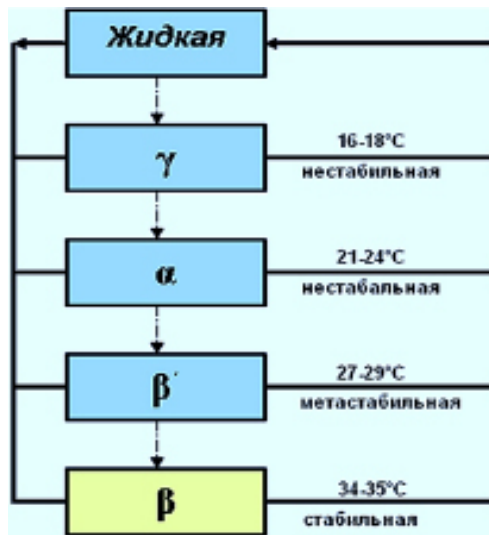
Кристаллизация жиров определяет комплекс показателей качества готовых изделий (Рисунок 1).

Полиморфизм — это способность молекулы жира кристаллизоваться в различных кристаллических формах с разной «упаковкой» кристаллов. Полиморфизм присущ большинству жиров, однако высокополиморфными являются соединения с высоким содержанием мононенасыщенных триглицеридов симметричной структуры (типа SaUnSa, где Sa — насыщенная жирная кислота, Un — ненасыщенная жирная кислота). Такая степень полиморфизма присуща не только маслу какао, но и другим жирам с высоким содержанием SaUnSa — эквивалентам масла какао (Sato, 2001; Yao et al., 2020a).

Жиры проявляют так называемый монотропный полиморфизм, при котором сначала образуются менее стабильные полиморфы, а потом они переходят в более стабильные состояния. Для масла какао

Рисунок 2

Схема перехода полиморфных форм кристаллов масла какао и эквивалентов масла какао



и эквивалентов масла какао свойственно превращение полиморфных форм по схеме $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$ (Рисунок 2).

Наименьшую температуру плавления имеет γ -форма. Эту форму можно получить при резком охлаждении до 18 °С. Масло какао, находясь в γ -модификации, обладает наименьшей плотностью и хрупкостью, β -форма наиболее устойчива (высокостабильна) и поэтому без расплавления в другие формы не переходит. Переход в эту модификацию

Рисунок 1

Показатели качества готового продукта, на которые оказывает влияние кристаллизация жиров



наблюдается при 30 °С (Castro-Alayo et al., 2022; Bresson et al., 2011).

У нестабильных полиморфов α молекулы триглицеридов располагаются в относительно простой кристаллической решетке. В такой кристаллической структуре молекулы не прилегают плотно друг к другу. И наоборот, в наиболее стабильном полиморфе β молекулы триглицеридов расположены максимально плотно в самом низком энергетическом состоянии (Declerck et al., 2021). Такое различие полиморфов в «упаковке» означает наличие у них разных физических свойств. Различия в «упаковке» обуславливают разницу в величине скрытой теплоты, высвобождаемой при кристаллизации, причем у наиболее стабильного β -полиморфа эта скрытая теплота больше.

Многочисленные исследования полиморфных форм кристаллов масла какао методами рентгенографии и электронной микроскопии установили, что в наиболее стабильной β -конфигурации молекулы триглицеридов упакованы в двойные или тройные цепи, расстояния в которых между концевыми метильными группами жирных кислот примерно равны длине двух или трех жирных кислот. Характерный изгиб, обусловленный наличием двойной связи в олеиновой кислоте, приводит к тому, что для плотной упаковки кристаллов ненасыщенные кислоты в кристаллической структуре должны прилегать друг к другу, образуя цепь, наподобие ряда ложек, либо, как предполагают авторы (Peschar et al., 2004), они примыкают друг к другу концевыми группами, связанными двойной связью с концевой метиловой группой.

Таким образом, на скорость полиморфных превращений влияют разные факторы: условия проведения (температура, перемешивание) и состав конкретного жира (триглицеридный профиль, состав минорных липидов, присутствие эмульгаторов и т.д.).

Температура застывания жира — это важнейший технологический фактор. Так, температура застывания жировой фазы глазури или шоколадной массы оказывает влияние на параметры темперирования, глазирования, и как следствие, дальнейшего хранения готовых глазированных изделий и шоколада. В настоящее время существует несколько методов определения температуры застывания жира, основанные на определении температуры жира, соответствующей максимальному выделению скрытой теплоты кристаллизации при определенных условиях охлаждения и при введении затравочных кристаллов:

- (1) на приборе Жукова по ГОСТ 32189–2013⁷;
- (2) на приборе Дженсена по Британскому стандарту BS 684-1.13⁸;
- (3) на приборе Дженсена по ГОСТ Р 54652–2011⁹;
- (4) на приборе «MultiTherm» по МВИ 065-00334675-18¹⁰.

Наиболее распространенный — метод определения температуры застывания по Дженсену. При этом метод определения в соответствии с ГОСТ Р 54652–2011 имеет некоторые отличия от метода определения по Британскому стандарту BS 684-1.13, но оба метода основаны на том, что анализ проводится оператором вручную. Поэтому конечный результат измерений существенно зависит от человеческого фактора. Исходя из этого, существуют постоянные дискуссии среди специалистов отрасли вокруг данных, полученных этими методами.

Цель исследования: изучить влияние жирнокислотного и триглицеридного составов эквивалентов масла какао на их процесс кристаллизации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили во ВНИИКП — филиале ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

⁷ ГОСТ 32189–2013. (2014). *Маргарины, жиры для кулинарии, кондитерской, хлебопекарной и промышленности. Правила приемки и методы контроля*. М.: Стандартинформ.

⁸ BS 684–1.13. (2021). *Методы анализа жиров и жирных масел. Физические методы*. Британский институт стандартов (BSI).

⁹ ГОСТ Р 54652–2011. (2013). *Эквиваленты масла какао, улучшители масла какао SOS-типа, заменители масла какао POP-типа. Метод определения температуры застывания*. М.: Стандартинформ.

¹⁰ МВИ 065–00334675–18. (2018). *Методика определения характеристики кристаллизации продуктов переработки какао-бобов (какао тертое и масло какао) на приборе «MultiTherm»*. М.: ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова.

Материалы

Объектами исследования являлись образцы масла какао и эквивалентов масла какао различных производителей.

Методы

Характеристику кристаллизации жиров определяли по ГОСТ Р 54652–2011 «Эквиваленты масла какао, улучшители масла какао SOS-типа, заменители масла какао POP-типа. Метод определения температуры застывания» на приборе Дженсена и по МВИ 065–00334675–18 «Методика определения характеристики кристаллизации продуктов переработки какао-бобов (какао тертое и масло какао) на приборе «MultiTherm» на приборе «MultiTherm».

Исследования триглицеридного состава представленных образцов жира проведено в соответствии с ГОСТ Р ИСО 23275–1–2013 «Жиры и масла животные и растительные. Эквиваленты масла какао в масле какао и шоколаде. Часть 1. Определение наличия эквивалентов масла какао»¹¹ на газовом хроматографе GC-2010 AF с температурно-программируемым инжектором «SHIMADZU».

Исследование жирнокислотного состава проведено по ГОСТ Р 54686–2011 «Изделия кондитерские. Метод определения массовой доли насыщенных жирных кислот»¹² на газовом хроматографе GC-2010 AF с температурно-программируемым инжектором «SHIMADZU».

Процедура

Далее проведены экспериментальные исследования жирнокислотного и триглицеридного состава образцов масла какао и эквивалентов масла какао, предоставленных производителями масложировой промышленности. Сравнительные исследования по определению температуры застывания этих образцов были проведены на приборах Дженсена и MultiTherm.

Для описания процесса кристаллизации были построены зависимости температуры от времени. Проанализированы время кристаллизации и температура застывания жиров и содержание триглицеридов и их суммы. Установлены параметры кристаллизации эквивалентов масла какао.

Анализ данных

Информационной базой исследования были статистические и аналитические материалы^{13,14}. Обработку результатов исследований производили методом однофакторного дисперсионного анализа. Статистический анализ проводили путем корреляции количественных признаков с вычислением коэффициента корреляции знаков по Фехнеру (K).

$$K = (C - H) / (C + H),$$

где C — число случаев совпадения знаков отклонений вариант от средней факторного и результативного признаков; H — число случаев несовпадения знаков.

Статистический анализ данных проведен с помощью Excel 2013.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проанализированы справочные и литературные данные из различных источников (Gresti et al., 1993; Lipp & Anklam, 1998; Sato, 2001) содержащие информацию о триглицеридном составе жиров, используемых в кондитерской отрасли. Результаты аналитических исследований обобщены и представлены в Таблице 1.

Различия триглицеридного состава жиров обусловлены территорией и условиями произрастания масличных культур и может составлять по отдельным триглицеридам от 0,6% (ООА масло какао) до 13% (LaMP кокосовое масло). При этом по некоторым жирам выявлено отсутствие справочных данных по триглицеридному составу.

¹¹ ГОСТ Р ИСО 23275–1–2013. (2013). *Жиры и масла животные и растительные. Эквиваленты масла какао в масле какао и шоколаде. Определение наличия эквивалентов масла какао*. М.: Стандартинформ.

¹² ГОСТ Р 54686–2011. (2011). *Изделия кондитерские. Метод определения массовой доли насыщенных жирных кислот*. М.: Стандартинформ.

¹³ International Cocoa Organization. <https://www.icco.org/icco-documentation/>

¹⁴ U.S. Department of Agriculture. <https://fdc.nal.usda.gov/index.html>

Положение насыщенных (Sa) и ненасыщенных (Un) жирных кислот в триацилглицеридах (ТАГ) обуславливает различие физических свойств жиров. Обобщены результаты аналитических исследований по содержанию жирных кислот в зависимости от степени их насыщенности в некоторых натуральных жирах, используемых в кондитерском производстве (Afoakwa, 2010). Расположение жирных кислот в молекуле триацилглицерида не учитывали (Таблица 2).

Для пальмового масла и масла какао характерна высокая концентрация триацилглицеридов при только одной ненасыщенной жирной кислоте, тогда как арахисовое характеризуется высоким содержанием триацилглицеридов с двумя и даже тремя ненасыщенными жирными кислотами.

Триглицеридный состав масла какао формирует уникальные физические и органолептические свойства шоколадных изделий. Некоторые различия триглицеридного состава масла какао обусловлены территорией произрастания и сортом какао-бобов. Наряду с маслом какао в производстве шоколадных изделий используют эквиваленты масла какао.

Проведены исследования жирнокислотного состава образца масла какао и 3-х образцов эквивалентов масла какао (Таблица 3).

Состав всех изученных образцов определялся в основном тремя жирными кислотами: пальмитиновой, стеариновой и олеиновой. Установлено, что характерной особенностью жирнокислотного

Таблица 1

Аналитический результат исследований по триглицеридному составу жиров

Масло какао		Пальмовое масло		Пальмоядровое масло		Кокосовое масло		Арахисовое масло		Молочный жир	
ТАГ	Содержание, %	ТАГ	Содержание, %	ТАГ	Содержание, %	ТАГ	Содержание, %	ТАГ	Содержание, %	ТАГ	Содержание, моль %
POS	34,6÷38,3	POP	24,1	LaLaLa, LaCaM	27	LaLaM, LaMLa	11÷15	LOO, OLO	19,4	BPO	4,2
SOS	23,7÷28,4	POO	18,9	LaLaM	25	LaMP	3÷13	OLL	18,3	BPP	3,2
POP	13,8÷16,4	PLP	7,8	LaLa P, LaMM	15	LaLaLa	5÷12	POL	12,9	BMP	3,1
SOO+ PPP	3,7÷8,4	POS	7,0	MMM	9	CyLaLa	2÷8	OOO	11,8	MPO	2,8
POO	2,2÷5,5	OOL, OLO, PPL	5,7	CaLaLa	6	CyLaM	5,5÷10	POO	6,7	POO	2,5
PSL	2,8÷3,6	MLO, PLO, SLO	5,4	LaPS, MPP, MMS	3	CaLaM	7,5÷9	PLP	5,3	BPS	2,5
SOA	1,6÷2,5	MOL, POL, SOL	4,8	MOP	3	LaLaP, LaPLa	4 ÷7,5	PLL	5,1	PPO	2,3
SSL	1,5÷2,1	PPP	4,3	PPO	1	CyLaO	2,5 ÷5,5	SOL	3,9	PSO	2,2
PPL	1,5÷1,9	PPO	3,6	POS	1	CaLaP	1,5÷ 5	PPL	2,9	CPO	2,0
OOA	1,0÷1,6	SOS	3,4	SOS	1	CaLaO	1,5÷4	POP	2,3	BMO	1,8

Примечание: В – масляная (C_{4:0}), Су – каприловая (C_{8:0}), Са – каприновая (C_{10:0}), La – лауриновая (C_{12:0}), М – миристиновая (C_{14:0}), Р – пальмитиновая (C_{16:0}), S – стеариновая (C_{18:0}), О – олеиновая (C_{18:1}), L – линолевая (C_{18:2}), А – арахидоновая (C_{20:4}).

Таблица 2

Аналитический результат исследований по содержанию триацилглицеридов в некоторых натуральных жирах в зависимости от степени насыщенности (вне зависимости от расположения в триацилглицериде)

ТАГ	Масло какао	Пальмовое масло	Кокосовое масло	Арахисовое масло
SaSaSa	2,5÷3	8	81	0
SaUnSa	72÷85	50	12	1
UnSaUn	13÷20	36	7	49÷60
UnUnUn	1	6	0	40÷51

состава эквивалентов масла какао являлась массовой доля пальмитиновой кислоты более 30 %.

Провели исследования триглицеридного состава масла какао и эквивалентов масла какао, которые выявили их различия (Рисунок 3).

В триглицеридном составе масла какао преобладали POS, а в эквивалентах масла какао симметричные триглицериды SOS и POP.

Далее исследовали влияние состава жиров на процесс их кристаллизации. Были проведены сравнительные исследования по определению температуры застывания образцов масла какао и эквивалентов масла какао на приборах Дженсена и «MultiTherm» (Рисунок 4).

Значения температуры застывания образца масла какао на приборе Дженсена составляет 30,2 °С, а на приборе «MultiTherm» $T = 21,5$ °С, образцов эквивалентов масла какао температура застывания

Таблица 3

Жирнокислотный состав масла какао и эквивалентов масла какао

Наименование жирной кислоты	Обозначение	Жирнокислотный состав, % от суммы жирных кислот			
		Масло какао	Эквиваленты масла какао		
			1	2	3
Миристиновая	14:0	0,2 ± 0,01	0,8 ± 0,04	0,3 ± 0,02	0,6 ± 0,03
Пальмитиновая	16:0	27,1 ± 1,4	35,3 ± 1,8	32,7 ± 1,6	34,3 ± 1,7
Стеариновая	18:0	33,2 ± 1,8	25,7 ± 1,3	29,1 ± 1,5	29,3 ± 1,5
Олеиновая	18:1	35,0 ± 1,6	33,8 ± 1,7	35,0 ± 1,8	32,3 ± 1,6
Линолевая	18:2	2,9 ± 0,2	1,9 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,5 ± 0,1
Арахидиновая	20:0	1,0 ± 0,05	0,6 ± 0,03	0,7 ± 0,04	0,8 ± 0,04

Рисунок 3
Триглицеридный состав жиров

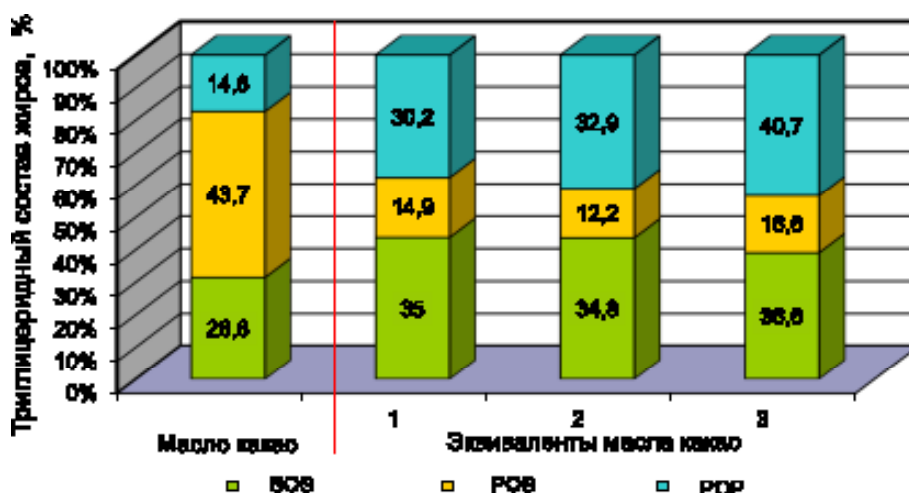
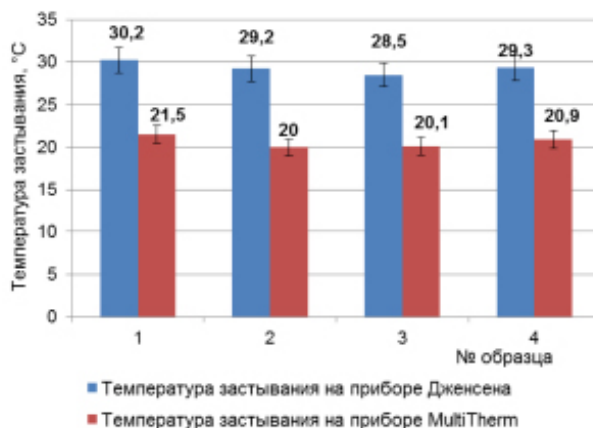


Рисунок 4

Сравнение температуры застывания масла какао (1) и эквивалентов масла какао (2–4) на приборах Дженсена и «MultiTherm»

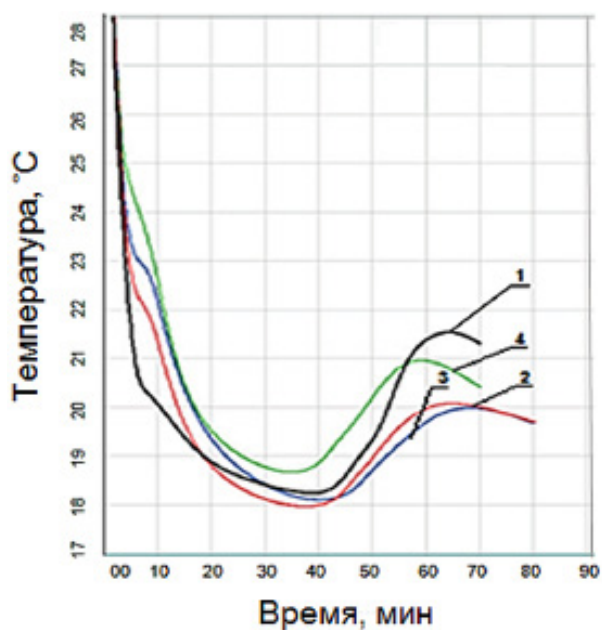


находилась в интервале (28,5÷29,3) °C на приборе Дженсена и (20,0÷20,9) °C на приборе «MultiTherm».

Наиболее полно описать процесс кристаллизации позволяет построение зависимости температуры от времени. Исследовали процесс кристаллизации масла какао и эквивалентов масла какао на приборе «MultiTherm» (Рисунок 5).

Рисунок 5

Кривые кристаллизации масла какао и эквивалентов масла какао



Примечание: 1 – масло какао; 2 – ЭМК №1; 3 – ЭМК № 2; 4 – ЭМК № 3

Изучение полученных кривых кристаллизации позволило установить, что характер кристаллизации эквивалентов масла какао отличается от кристаллизации контрольного образца масла какао. Определили параметры кристаллизации исследуемых жиров: для масла какао температура застывания T_{\max} составила 21,5 °C, продолжительность кристаллизации τ_{\max} – 64,3 мин, а для образцов ЭМК температура застывания и продолжительность кристаллизации находились в диапазонах (20,0÷20,9) °C и (59,1÷65,8) мин соответственно. Процесс охлаждения в образце масла какао протекает при более высоких температурах и за меньший промежуток времени.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основным фактором, обуславливающим необходимое качество шоколадных полуфабрикатов, является создание особо благоприятных условий для полной и интенсивной кристаллизации жировой фазы. Все жиры имеют определенную температуру кристаллизации при охлаждении, с переходом из жидкого состояния в твердое. Эта температура определяется входящими в состав данного жира триацилглицеридами, их физическими свойствами, которые в свою очередь определяются составом жирных кислот и их распределением по отдельным позициям в молекулах триацилглицерида.

Результаты исследования подтвердили, что преобладающие в масле какао триацилглицериды являются мононенасыщенными, причем в центральной позиции молекулы находится олеиновая кислота, а стеариновая и пальмитиновая кислоты располагаются на двух внешних атомах углерода. Эти мононенасыщенные триглицериды в масле какао составляют примерно 70–85% общего состава (Gresti et al., 1993; Lipp & Anklam, 1998; Sato, 2001).

Масло какао является дорогостоящим сырьем, поскольку деревья *Theobroma cacao* произрастают в узкой климатической зоне. От урожайности, стабильности поставок, геополитической ситуации в регионах их произрастания зависят доступность и цена продуктов переработки какао (Линовская & Мазукабзова, 2017; Castro-Alayo et al., 2023; Velázquez-Reyes et al., 2023). С экономической точки зрения эквиваленты масла какао зачастую не уступают маслу какао, при этом позволяют

нивелировать вышеперечисленные возможные трудности и обеспечить устойчивое производство кондитерских изделий. Известно, что масло какао и его эквиваленты в основном состоят из композиций симметричных триглицеридов, от типа которых зависят поведение жиров при кристаллизации и их твёрдость (Кондратьев, 2015; Aumprai et al., 2022).

Характеристики кристаллизации масла какао и эквивалентов масла какао, такие как температура и продолжительность кристаллизации, будут во многом определять кинетику процесса структурообразования глазури, что подтверждено в ряде исследований (Линовская и соавт., 2019; Мазукабзова & Зайцева, 2022; Chen et al., 2021; Ewens et al., 2021; Liu et al., 2022). В настоящей работе продемонстрировано, что результаты измерения температуры кристаллизации, полученные на приборе Дженсена и на приборе «MultiTherm», значительно отличаются друг от друга. Преимуществом работы на приборе «MultiTherm» является автоматизация процесса измерения, но результаты измерений температуры застывания жиров несопоставимы с данными, полученными в соответствии с общепринятым и законодательно закреплённым методом на приборе Дженсена, и требуют введения коэффициентов корреляции. Дальнейшим направлением исследований планируется расчет коэффициентов корреляции.

Изучение параметров кристаллизации жиров на приборе «MultiTherm» позволило установить,

что масло какао и ЭМК отличаются друг от друга. Температура застывания ЭМК меньше, а время кристаллизации больше по сравнению с маслом какао, что в дальнейшем потребует подбора параметров темперирования шоколадных глазурей, выработанных на данных жирах.

Эквиваленты масла какао, имея сходный жирнокислотный состав, значительно отличаются по триглицеридному составу, что согласуется с результатами, сделанными в исследованиях (Castro-Alayo et al., 2023; Chen et al., 2022; Lipp & Anklam, 1998; Yao et al., 2020b). Это оказывает влияние на их процесс кристаллизации. Наблюдалась корреляция времени кристаллизации и содержания суммы триглицеридов SOS и POP (Рисунки 6, 7).

С увеличением суммы триглицеридов SOS и POP в образцах ЭМК продолжительность кристаллизации сокращалась. Образец ЭМК № 3 кристаллизовался за 59,1 мин при содержании SOS и POP триглицеридов 77,3%, образцы ЭМК № 1 и 2 имели сходное время кристаллизации 64,8 и 65,8 мин соответственно при содержании SOS и POP 65,2 и 67,7% соответственно.

Установлена взаимосвязь между содержанием триглицеридов POS и POP и температурой застывания жиров. Так, например у ЭМК №1 и 2 температура застывания составляла (20,0–20,1) °С при содержании POS и POP 45,1%. Температура застывания ЭМК № 3, при содержании POS и POP 57,3%, была близка к температуре застывания 21,5 °С масла ка-

Рисунок 6
Содержание триглицеридов в образцах масла какао и ЭМК

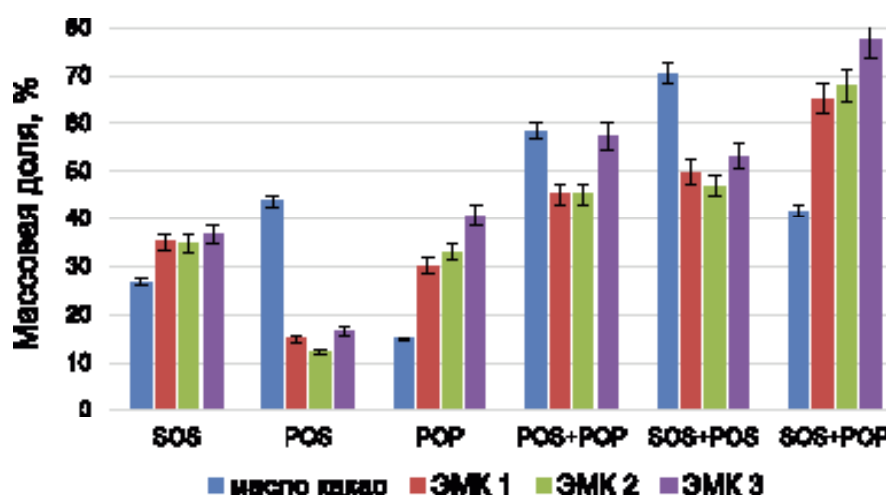
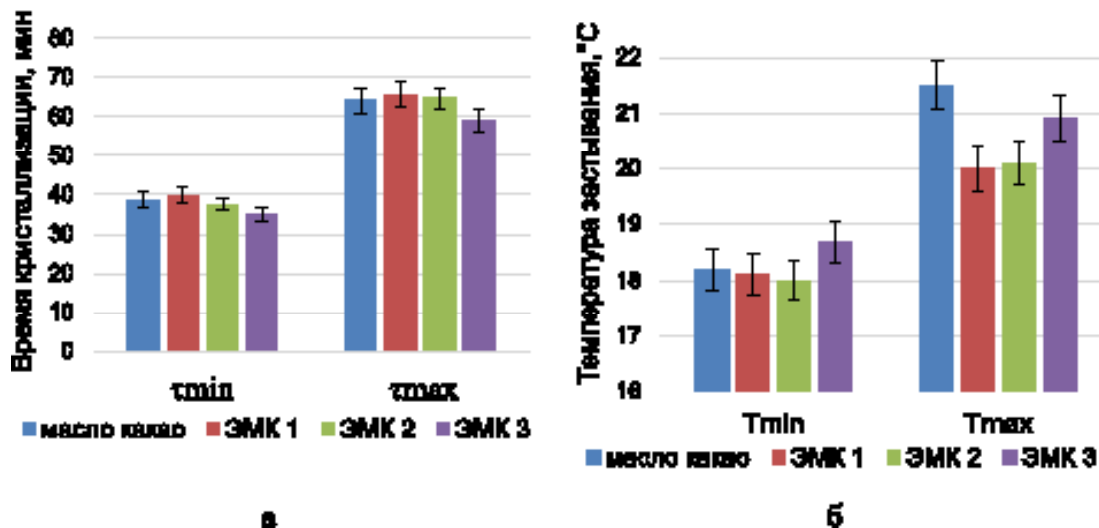


Рисунок 7

Параметры кристаллизации образцов масла какао и ЭМК



Примечание: а – время кристаллизации; б – температура кристаллизации

као, содержащего 58,5% POS и POP триглицеридов, и составляла 20,9°C. Возможно, это связано с конфигурацией упаковки молекул. Так, авторы Peschar et al., 2004 полагают, что ненасыщенные олеиновые кислоты, имеющие угол из-за наличия двойной связи и находящиеся в центральном положении триглицерида, примыкают друг к другу концевыми группами (связанные двойной связью с концевой метиловой группой) в кристаллической структуре. За счет этого обеспечивается более плотная упаковка триглицеридов и большая термодинамическая стабильность масла какао. Основываясь на результатах вышеуказанного исследования, авторы считают правдоподобным объяснением влияние различной длины жирных кислот (пальмитиновой и стеариновой), находящихся в 1 и 3 позициях молекулы триглицерида, на плотность упаковки кристаллической решетки (Рисунок 8).

По своим характеристикам кристаллизации ЭМК должны быть наиболее приближены к маслу какао. Для более полной характеристики процесса кристаллизации целесообразно учитывать не только температуру застывания и продолжительность кристаллизации, но и температуру и время начала кристаллизации. Например, температура застывания ЭМК № 3 была наиболее близка к температуре застывания масла какао, при этом имелись различия в их температурах начала застывания:

18,7°C и 18,2°C соответственно. В то же время у ЭМК № 1 и 2 температура начала застывания практически совпадала с температурой застывания масла какао – (18,0±18,2) °C, но процесс кристаллизации у них заканчивался при более низких температурах.

Наиболее полно описать процесс кристаллизации позволяет построение зависимости температуры от времени (Рисунок 9). Процесс кристаллизации включает в себя три основные стадии: переохлаждение до достижения температуры зарождения центров кристаллизации T_n при времени τ_n , нуклеация (образование зародышей кристаллов) до достижения температурного минимума T_{min} при времени τ_{min} , стадия активного роста кристаллов до достижения температурного максимума T_{max} при времени τ_{max} .

Рисунок 8

Схематическое представление упаковки кристаллов триглицеридов

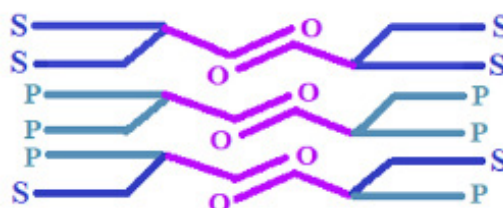
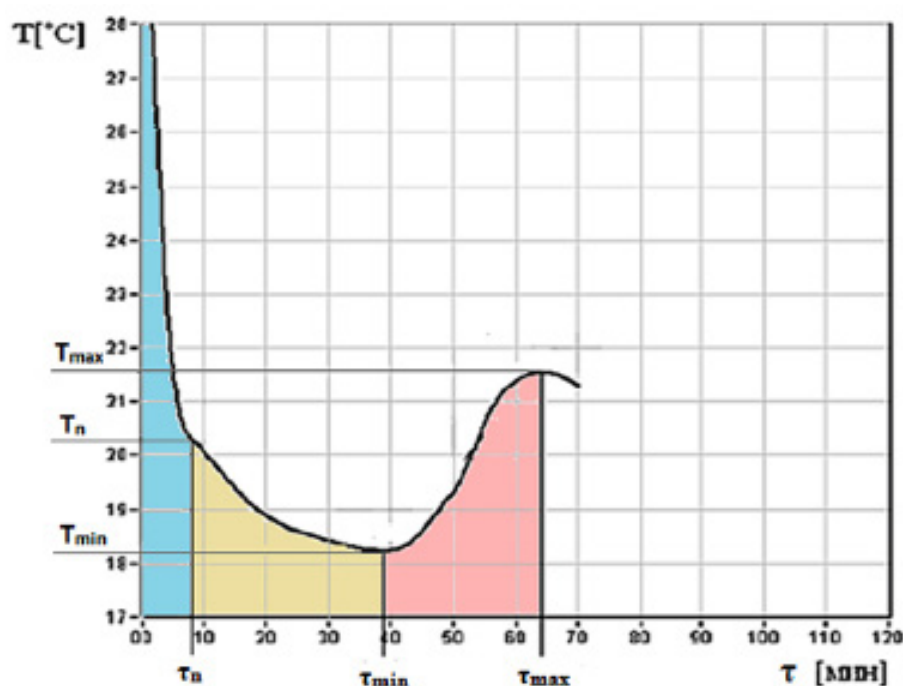


Рисунок 9

Общий вид кривой застывания жира



Авторы предлагают для более информативной оценки процесса кристаллизации жиров наряду с температурой застывания T_{max} , определяемой как температурный максимум на кривой охлаждения, учитывать и температуру начала кристаллизации T_{min} , определяемую как температурный минимум. А также учитывать продолжительность достижения температурных минимума и максимума τ_{min} и τ_{max} . Оценка выше указанных параметров кристаллизации каждой партии жиров эквивалентов масла какао в лабораторных условиях предприятия позволит управлять технологическими режимами глазирования кондитерских изделий глазурями на основе этих жиров.

ВЫВОДЫ

Уникальный триацилглицеридный состав масла какао формирует всеми любимые физические и органолептические свойства шоколадных изделий. Наряду с маслом какао в производстве кондитерских изделий используют эквиваленты масла какао, имеющие близкий к маслу какао жирнокислотный состав, что позволяет обеспечить стабильное производство шоколадных глазурей.

Основным фактором, обуславливающим необходимое качество шоколадных полуфабрикатов, является создание особо благоприятных условий для полной и интенсивной кристаллизации жировой фазы. Процесс структурообразования глазури во многом определяют характеристики кристаллизации масла какао и эквивалентов масла какао, такие как температура и продолжительность.

Сравнение результатов измерения температуры кристаллизации, полученные в соответствии с общепринятым и законодательно закрепленным методом на приборе Дженсена и на приборе «MultiTherm», преимуществом которого является автоматизация процесса измерения, показало значительные отличия и необходимость введения коэффициентов корреляции. Для того, чтобы исключить влияние человеческого фактора и для повышения объективности результатов, целесообразна разработка методов с использованием автоматизации процесса измерения с установленными критериями оценки процесса кристаллизации.

Изучение параметров кристаллизации жиров позволило установить, что масло какао и ЭМК отличаются друг от друга по своим свойствам, поскольку

они, имея сходный жирнокислотный состав, отличаются по триглицеридному составу. Наблюдалась корреляция времени кристаллизации и содержания суммы триглицеридов SOS и POP, с увеличением которой в образцах ЭМК продолжительность кристаллизации сокращалась. Возможно, это связано с конфигурацией упаковки молекул, поскольку разная длина пальмитиновой и стеариновой жирных кислот, находящихся в 1 и 3 позициях молекулы триглицерида, будет оказывать влияние на плотность упаковки кристаллической решетки, что является темой дальнейших исследований.

Предложено для более полной оценки процесса кристаллизации жиров наряду с температурой застывания T_{\max} , учитывать и температуру начала

кристаллизации T_{\min} , продолжительность достижения температурных минимума и максимума τ_{\min} и τ_{\max} .

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Мазукабзова Элла Витальевна: методология, руководство и проведение исследования, верификация данных, создание рукописи и её редактирование, формальный анализ, визуализация.

Руденко Оксана Сергеевна: концептуализация, методология, проведение исследования; создание рукописи и её редактирование, визуализация.

ЛИТЕРАТУРА

- Кондратьев, Н. Б. (2015). *Оценка качества кондитерских изделий. Повышение сохранности кондитерских изделий*. М.: Перо.
- Линовская, Н. В., & Мазукабзова, Э. В. (2017). Комплексная оценка показателей качества какао-бобов. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*, (6), 90–93. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-213-218>
- Линовская, Н. В., Мазукабзова, Э. В., & Руденко, О. С. (2019). Научно обоснованные критерии производства шоколадных полуфабрикатов с использованием фруктово-овощных порошков. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(3), 151–157. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-3-151-157>
- Мазукабзова, Э. В., & Зайцева, Л. В. (2022). Органолептические, реологические и кристаллизационные свойства кондитерской глазури с порошком из свеклы. *Пищевые системы*, 5(2), 132–138. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-132-138>
- Afoakwa, E. O. (2010). *Chocolate science and technology*. Wiley-Blackwell: West-Sussex, UK. <https://doi.org/10.1002/9781444319880>
- Aumpai, K., Tan, C. P., Huang, Q., & Sonwai, S. (2022). Production of cocoa butter equivalent from blending of illipé butter and palm mid-fraction. *Food Chemistry*, 384, Article 132535. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132535>
- Bahari, A., & Akoh, C. C. (2018). Texture, rheology and fat bloom study of 'chocolates' made from cocoa butter equivalent synthesized from illipe butter and palm mid-fraction. *LWT — Food Science and Technology*, 97, 349–354. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.013>
- Bresson, S., Rousseau, D., Ghosh, S., Marssi, M. E., & Faivre, V. (2011). Raman spectroscopy of the polymorphic forms and liquid state of cocoa butter. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(8), 992–1004. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100088>
- Castro-Alayo, E. M., Balcázar-Zumaeta, C. R., Torrejón-Valqui, L., Medina-Mendoza, M., Cayo-Colca, I. S., & Cárdenas-Toro, F. P. (2023). Effect of tempering and cocoa butter equivalents on crystallization kinetics, polymorphism, melting, and physical properties of dark chocolates. *LWT — Food Science and Technology*, 173, Article 114402. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114402>
- Castro-Alayo, E. M., Torrejón-Valqui, L., Medina-Mendoza, M., Cayo-Colca, I. S., & Cardenas-Toro, F. P. (2022). Kinetics crystallization and polymorphism of cocoa butter throughout the spontaneous fermentation process. *Foods*, 11(12), Article 1769. <https://doi.org/10.3390/foods11121769>
- Chen, J., Ghazani, S. M., Stobbs, J. A., & Marangoni, A. G. (2021). Tempering of cocoa butter and chocolate using minor lipidic components. *Nature Communications*, 12(1), 5018. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25206-1>
- Chen, Y., Wang, W., Zhang, W., Tan, C.-P., Lan, D., & Wang, Y. (2022). Characteristics and feasibility of olive oil-based diacylglycerol plastic fat for use in compound chocolate. *Food Chemistry*, 391, Article 133254. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133254>
- Declerck, A., Nelis, V., Danthine, S., Dewettinck, K., & van der Meeren, P. (2021). Characterisation of fat crystal polymorphism in cocoa butter by time-domain NMR and DSC deconvolution. *Foods*, 10(3), Article 520. <https://doi.org/10.3390/foods10030520>
- Devos, N., Reyman, D., & Sanchez-Cortes, S. (2020). Chocolate composition and its crystallization process: A multidisciplinary analysis. *Food Chemistry*, 342, Article 128301. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128301>
- Ewens, H., Metilli, L., & Simone, E. (2021). Analysis of the effect of recent reformulation strategies on the crystallization behaviour of cocoa butter and the structural properties of

- chocolate. *Current Research in Food Science*, 4, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.02.009>
- Gresti, J., Bugaut, M., Maniongui, C., & Bezard, J. (1993). Composition of molecular species of triacylglycerols in bovine milk fat. *Journal of Dairy Science*, 76(7), 1850–1869. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77518-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77518-9)
- Jin, J., Jin, Q., Wang, X., & Akoh, C. C. (2019). Improving heat and fat bloom stabilities of “dark chocolates” by addition of mango kernel fat-based chocolate fats. *Journal of Food Engineering*, 246, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.027>
- Lipp, M., & Anklam, E. (1998). Review of cocoa butter and alternative fats for use in chocolate – Part A. Compositional data. *Food Chemistry*, 62(1), 73–97. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(97\)00160-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(97)00160-X)
- Lipp, M., Simoneau, C., Ulberth, F., Anklam, E., Crews, C., Brereton, P., Greyt, W., Schwack, W., & Wiedmaier, C. (2001). Composition of genuine cocoa butter and cocoa butter equivalents. *Journal of Food Composition and Analysis*, 14(4), 399–408. <https://doi.org/10.1006/jfca.2000.0984>
- Liu, W., Yao, Y., & Li, C. (2022). Effect of tempered procedures on the crystallization behavior of different positions of cocoa butter products. *Food Chemistry*, 370, Article 131002. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131002>
- Peschar, R., Pop, M., De Ridder, D. J. A., Mechelen, J. B., Driessen, R. A. J., & Schenk, H. (2004). Crystal structures of 1,3-distearoyl-2-oleoylglycerol and cocoa butter in the $\beta(V)$ phase reveal the driving force behind the occurrence of fat bloom on chocolate. *Journal of Physical Chemistry*, 108(40), 15450–15453. <https://doi.org/10.1021/jp046723c>
- Pirouzian, H. R., Konar, N., Palabiyik, I., Oba, S., & Toker, O. S. (2020). Precrystallization process in chocolate: Mechanism, importance and novel aspects. *Food Chemistry*, 321, Article 126718. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126718>
- Sato, K. (2001). Crystallization behaviour of fats and lipids – A review. *Chemical Engineering Science*, 56(7), 2255–2265. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00458-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00458-9)
- Velásquez-Reyes, D., Rodríguez-Campos, J., Avendaño-Arrazate, C., Gschaedler, A., Alcázar-Valle, M., & Lugo-Cervantes, E. (2023). Forastero and criollo cocoa beans, differences on the profile of volatile and non-volatile compounds in the process from fermentation to liquor. *Heliyon*, 9(4), Article e15129. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15129>
- Yao, Y., Liu, W., Zhang, D., Li, R., Zhou, H., Li, C., & Wang, S. (2020a). Dynamic changes in the triacylglycerol composition and crystallization behavior of cocoa butter. *LWT – Food Science and Technology*, 129, Article 109490. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109490>
- Yao, Y., Liu, W., Zhang, D., Li, R., Zhou, H., Li, C., & Wang, S. (2020b). Dynamic changes in the triacylglycerol composition and crystallization behavior of cocoa butter. *LWT – Food Science and Technology*, 129, Article 109490. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109490>
- Yoshikawa, S., Watanabe, S., Yamamoto, Y., & Kaneko, F. (2020). Binary phase behavior of 1,3-Distearoyl-2-oleoyl-snglycerol (SOS) and trilaurin (LLL). *Molecules*, 25(22), Article 5313. <https://doi.org/10.3390/molecules25225313>

REFERENCES

- Kondrat'ev, N. B. (2015). *Otsenka kachestva konditerskikh izdelii. Povyshenie sokhrannosti konditerskikh izdelii [Evaluation of the quality of confectionery products. Improving the safety of confectionery products]*. Moscow: Pero.
- Linovskaya, N. V., & Mazukabzova, E. V. (2017). Kompleksnaya otsenka pokazatelei kachestva kakao-bobov [Comprehensive assessment of cocoa bean quality indicators]. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov [Technology and Commodity Science of Innovative Food Products]*, (6), 90–93.
- Linovskaya, N. V., Mazukabzova, E. V., & Rudenko, O. S. (2019). Nauchno obosnovannye kriterii proizvodstva shokoladnykh polufabrikatov s ispol'zovaniem fruktovo-ovoshchnykh poroshkov [Scientifically based criteria for the production of chocolate semi-finished products using fruit and vegetable powders]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies]*, 81(3), 151–157. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-3-151-157>
- Mazukabzova, E. V., & Zaitseva, L. V. (2022). Organolepticheskie, reologicheskie i kristallizatsionnye svoistva konditerskoi glazuri s poroshkom iz svekly [Organoleptic, rheological and crystallization properties of confectionery glaze with beet powder]. *Pishchevye sistemy [Food Systems]*, 5(2), 132–138. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-132-138>
- Afoakwa, E. O. (2010). *Chocolate science and technology*. Wiley-Blackwell: West-Sussex, UK. <https://doi.org/10.1002/9781444319880>
- Aumpai, K., Tan, C. P., Huang, Q., & Sonwai, S. (2022). Production of cocoa butter equivalent from blending of illipé butter and palm mid-fraction. *Food Chemistry*, 384, Article 132535. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132535>
- Bahari, A., & Akoh, C. C. (2018). Texture, rheology and fat bloom study of ‘chocolates’ made from cocoa butter equivalent synthesized from illipe butter and palm mid-fraction. *LWT – Food Science and Technology*, 97, 349–354. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.013>
- Bresson, S., Rousseau, D., Ghosh, S., Marssi, M. E., & Faivre, V. (2011). Raman spectroscopy of the polymorphic forms and liquid state of cocoa butter. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(8), 992–1004. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100088>
- Castro-Alayo, E. M., Balcázar-Zumaeta, C. R., Torrejón-Valqui, L., Medina-Mendoza, M., Cayo-Colca, I. S., & Cárdenas-Toro, F. P. (2023). Effect of tempering and cocoa butter equivalents on crystallization kinetics, polymorphism,

- melting, and physical properties of dark chocolates. *LWT – Food Science and Technology*, 173, Article 114402. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114402>
- Castro-Alayo, E. M., Torrejon-Valqui, L., Medina-Mendoza, M., Cayo-Colca, I. S., & Cardenas-Toro, F. P. (2022). Kinetics crystallization and polymorphism of cocoa butter throughout the spontaneous fermentation process. *Foods*, 11(12), Article 1769. <https://doi.org/10.3390/foods11121769>
- Chen, J., Ghazani, S. M., Stobbs, J. A., & Marangoni, A. G. (2021). Tempering of cocoa butter and chocolate using minor lipidic components. *Nature Communications*, 12(1), 5018. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25206-1>
- Chen, Y., Wang, W., Zhang, W., Tan, C.-P., Lan, D., & Wang, Y. (2022). Characteristics and feasibility of olive oil-based diacylglycerol plastic fat for use in compound chocolate. *Food Chemistry*, 391, Article 133254. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133254>
- Declerck, A., Nelis, V., Danthine, S., Dewettinck, K., & van der Meeren, P. (2021). Characterisation of fat crystal polymorphism in cocoa butter by time-domain NMR and DSC deconvolution. *Foods*, 10(3), Article 520. <https://doi.org/10.3390/foods10030520>
- Devos, N., Reyman, D., & Sanchez-Cortes, S. (2020). Chocolate composition and its crystallization process: A multidisciplinary analysis. *Food Chemistry*, 342, Article 128301. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128301>
- Ewens, H., Metilli, L. & Simone, E. (2021). Analysis of the effect of recent reformulation strategies on the crystallization behaviour of cocoa butter and the structural properties of chocolate. *Current Research in Food Science*, 4, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.02.009>
- Gresti, J., Bugaut, M., Maniongui, C., & Bezard, J. (1993). Composition of molecular species of triacylglycerols in bovine milk fat. *Journal of Dairy Science*, 76(7), 1850–1869. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77518-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77518-9)
- Jin, J., Jin, Q., Wang, X., & Akoh, C. C. (2019). Improving heat and fat bloom stabilities of “dark chocolates” by addition of mango kernel fat-based chocolate fats. *Journal of Food Engineering*, 246, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.027>
- Lipp, M., & Anklam, E. (1998). Review of cocoa butter and alternative fats for use in chocolate – Part A. Compositional data. *Food Chemistry*, 62(1), 73–97. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(97\)00160-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(97)00160-X)
- Lipp, M., Simoneau, C., Ulberth, F., Anklam, E., Crews, C., Brereton, P., Greyt, W., Schwack, W., & Wiedmaier, C. (2001). Composition of genuine cocoa butter and cocoa butter equivalents. *Journal of Food Composition and Analysis*, 14(4), 399–408. <https://doi.org/10.1006/jfca.2000.0984>
- Liu, W., Yao, Y., & Li, C. (2022). Effect of tempered procedures on the crystallization behavior of different positions of cocoa butter products. *Food Chemistry*, 370, Article 131002. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131002>
- Peschar, R., Pop, M., De Ridder, D. J. A., Mechelen, J. B., Driessen, R. A. J., & Schenk, H. (2004). Crystal structures of 1,3-distearoyl-2-oleoylglycerol and cocoa butter in the $\beta(V)$ phase reveal the driving force behind the occurrence of fat bloom on chocolate. *Journal of Physical Chemistry*, 108(40), 15450–15453. <https://doi.org/10.1021/jp046723c>
- Pirouzian, H. R., Konar, N., Palabiyik, I., Oba, S., & Toker, O. S. (2020). Precrystallization process in chocolate: Mechanism, importance and novel aspects. *Food Chemistry*, 321, Article 126718. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126718>
- Sato, K. (2001). Crystallization behaviour of fats and lipids – A review. *Chemical Engineering Science*, 56(7), 2255–2265. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00458-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00458-9)
- Velásquez-Reyes, D., Rodríguez-Campos, J., Avendaño-Arrazate, C., Gschaedler, A., Alcázar-Valle, M., & Lugo-Cervantes, E. (2023). Forastero and criollo cocoa beans, differences on the profile of volatile and non-volatile compounds in the process from fermentation to liquor. *Heliyon*, 9(4), Article e15129. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15129>
- Yao, Y., Liu, W., Zhang, D., Li, R., Zhou, H., Li, C., & Wang, S. (2020a). Dynamic changes in the triacylglycerol composition and crystallization behavior of cocoa butter. *LWT – Food Science and Technology*, 129, Article 109490. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109490>
- Yao, Y., Liu, W., Zhang, D., Li, R., Zhou, H., Li, C., & Wang, S. (2020b). Dynamic changes in the triacylglycerol composition and crystallization behavior of cocoa butter. *LWT – Food Science and Technology*, 129, Article 109490. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109490>
- Yoshikawa, S., Watanabe, S., Yamamoto, Y., & Kaneko, F. (2020). Binary phase behavior of 1,3-Distearoyl-2-oleoyl-snglycerol (SOS) and trilaurin (LLL). *Molecules*, 25(22), Article 5313. <https://doi.org/10.3390/molecules25225313>

УДК 577.151.45:57.037+664.868

Определение целесообразности предварительной декатионизации растительного сырья для ферментативной фрагментации протопектинового комплекса

В. В. Кондратенко¹, Т. Ю. Кондратенко²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, г. Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования – филиал ФГБНУ «Всероссийский научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, Москва, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Кондратенко Владимир Владимирович
E-mail: v_kondratenko@vniimi.org

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:
данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Кондратенко, В. В., & Кондратенко, Т. Ю. (2023). Определение целесообразности предварительной декатионизации растительного сырья для ферментативной фрагментации протопектинового комплекса. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 118-131. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.426>

ПОСТУПИЛА: 15.02.2023

ПРИНЯТА: 17.07.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

АННОТАЦИЯ

Введение: Использование ферментных препаратов для обработки растительного сырья налагает некоторые ограничения, определяемые структурой молекул ферментов и свойствами среды. Одним из основных лимитирующих факторов является возможное присутствие в среде ингибитора, подавляющего каталитическую активность. Потенциальным ингибитором могут являться катионы поливалентных металлов, поэтому определение целесообразности декатионизации среды перед ферментативной обработкой является актуальным.

Цель исследования является разработка подхода к определению целесообразности предварительной декатионизации сырья перед ферментативным процессом.

Материалы и методы: В качестве субстрата использовали негранулированный сухой немелассированный свекловичный жом. Ферментативную обработку проводили гомоферментным препаратом рамногалактуронан лиазного действия в концентрации 0,00, 0,05, 0,1, 0,2, 0,4 и 0,8 % от массы сухого субстрата. Предварительную обработку набухшего сырья проводили 0,00, 0,20, 0,50 и 0,91 ед. от 2,87 % водного раствора комплексона (ЭДТА). Фактором отклика была удельная электрическая проводимость. Ферментативный процесс проводили при температуре 45 °С течение 8 часов. Аппроксимацией экспериментальных данных для каждого варианта исследований получали математическое описание динамик ферментативного процесса.

Результаты: По характеру зависимости обратных кинетических показателей было установлено, что в пределах каждой концентрации ферментного препарата значение асимптотического темпа процесса $V_{\max} = \text{const}$, а константа Михаэлиса K_m непрерывно увеличивается. Для комплексной оценки исследуемых динамик была разработана система критериев, включающая критерий изменчивости константы Михаэлиса $Q(K_m)$, дискретный критерий оптимальности Z , комплексный критерий оптимальности декатионизации F и критерий оценки Q , сопровождаемые 4 постулируемыми условиями оптимизации.

Выводы: В результате разработанная система критериев позволяет решать сразу три задачи – определение целесообразности предварительной декатионизации, оптимальные концентрации комплексона и гомоферментного препарата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ферментативная активность, фрагментация, протопектиновый комплекс, ингибирование, декатионизация, растительное сырьё



Determination of the Feasibility of Preliminary Decationization of Plant Raw Materials for Enzymatic Fragmentation of the Protopectin Complex

¹ Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

² Russian Research Institute of Canning Technology – branch of Gorbatov Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Vladimir V. Kondratenko¹, Tatyana Yu. Kondratenko²

ABSTRACT

Background: The use of enzyme preparations for processing plant raw materials imposes some restrictions determined by the structure of enzyme molecules and the properties of the medium. One of the main limiting factors is the possible presence of an inhibitor in the medium that suppresses catalytic activity. Polyvalent metal cations can be a potential inhibitor, therefore, determining the expediency of decationization of the medium before enzymatic treatment is relevant.

Purpose: The aim of the work is to develop an approach to determining the feasibility of preliminary decationization of raw materials before the enzymatic process.

Materials and Methods: Non-granulated dry non-massaged beet pulp was used as a substrate. Enzymatic treatment was carried out with a homoenzyme preparation of rhamnolacturonan lyase action at a concentration of 0.00, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 and 0.8 % by weight of the dry substrate. The pretreatment of the swollen raw materials was carried out by 0.00, 0.20, 0.50 and 0.91 units of 2.87 % aqueous solution of complexon. The response factor was electrical conductivity. The enzymatic process was carried out at a temperature of 45 °C for 8 hours. By approximating the experimental data for each research variant, a mathematical description of the dynamics of the enzymatic process was obtained.

Results: By the nature of the dependence of the inverse kinetic parameters, it was found that within each concentration of the enzyme preparation, the value of the asymptotic rate of the process $V_{\max} = \text{const}$, and the Michaelis constant K_m continuously increases. For a comprehensive assessment of the studied dynamics, a system of criteria was developed, including the criterion of variability of the Michaelis constant $Q(K_m)$, the discrete optimality criterion Z , the complex optimality criterion of decationization F and the evaluation criterion Q , accompanied by 4 postulated optimization conditions.

Conclusion: As a result, the developed system of criteria makes it possible to solve three tasks at once – determining the feasibility of pre-decationization, optimal concentrations of complexon and homoenzyme preparation.

KEYWORDS

enzymatic activity, fragmentation, protopectin complex, inhibition, decationization, vegetable raw materials

CORRESPONDENCE:

Vladimir V. Kondratenko

E-mail: v_kondratenko@vnimi.org

FOR CITATIONS:

Kondratenko, V. V., & Kondratenko, T. Yu. (2023). Determination of the feasibility of preliminary decationization of plant raw materials for enzymatic fragmentation of the protopectin complex. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 118-131. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.426>

RECEIVED: 15.02.2023

ACCEPTED: 17.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ВВЕДЕНИЕ

Благодаря проявлению высокой каталитической активности и специфичности к виду субстрата, ферменты находят широкое применение в пищевой промышленности при решении задач, связанных с увеличением темпа технологических процессов, получением целевого продукта с требуемыми физико-химическими характеристиками, увеличением выхода готовой продукции, улучшением её качества, а также — с увеличением глубины переработки сырья, уменьшением количества отходов и снижением себестоимости (Rimareva et al., 2017; Mandake et al., 2020). Однако практическое применение ферментов связано с рядом объективных ограничений, определяемых особенностями состава и структуры их молекулы, таких как активная реакция среды, температура процесса, а также — наличие или отсутствие в системе активатора или ингибитора.

Некоторые группы ферментов проявляют чувствительность к концентрации поливалентных катионов металлов: при отсутствии в среде катионов Ca^{2+} каталитическая активность ферментов практически всех семейств полисахарид-лиаз значительно снижается (Ochiai et al., 2007; Silva et al., 2011; Dhillon et al., 2016; Yuan et al., 2019; Wang et al., 2022). Это связано с присутствием катионов металлов в составе ферментов. Их удаление может частично или полностью ингибировать каталитическую активность. В то же время, не смотря на присутствие в составе молекул катионов Ca^{2+} , полисахарид-лиазы семейства PL4 выделяются на общем фоне отсутствием необходимости наличия данных катионов в среде (Jensen et al., 2010;

Laatu & Condemine, 2003; Iwai et al., 2015; Morales-Quintana et al., 2022). Это, вероятно, связано с пониженной подвижностью катионов в составе фермента.

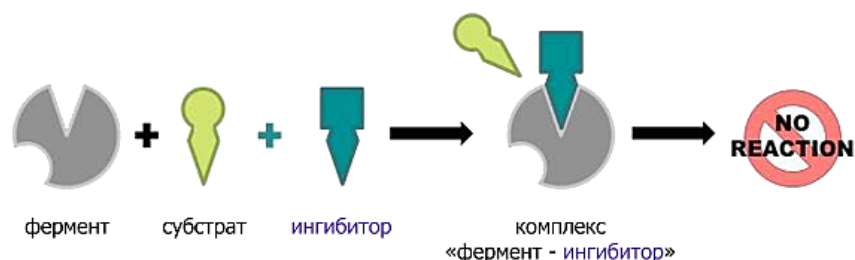
В работах (Ochiai et al., 2007; Silva et al., 2011; Dhillon et al., 2016; Yuan et al., 2019; Iwai et al., 2015) отмечается, что наравне с Ca^{2+} , положительное влияние на активность лиазных ферментов может оказывать присутствие в среде также катионов Ag^{2+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} и Hg^{2+} . При этом присутствие катионов Ca^{2+} в составе молекулярной структуры не является определяющим фактором чувствительности каталитической активности таких ферментов к поливалентным катионам. В ряде исследований (Fujimoto et al., 2013; O'Neill et al., 2015; Furusawa et al., 2021) в отношении некоторых катион-не-содержащих гидролазных ферментов косвенно показана такая возможность.

В то же время к ингибирующему действию может приводить не только отсутствие или недостаток поливалентных катионов металлов в среде, но и некоторый их избыток (Robin et al., 2018; Иванова, 2022). Один из возможных механизмов ингибирования представлен на Рисунке 1.

При этом активирующее или ингибирующее действие катионов металлов на каталитическую активность ферментов при прочих равных условиях в большинстве случаев определяется их концентрацией (Рисунок 2).

Применение ферментативной обработки для направленной деструкции биополимерного матрикса клеточных стенок растительного сырья неизбежно

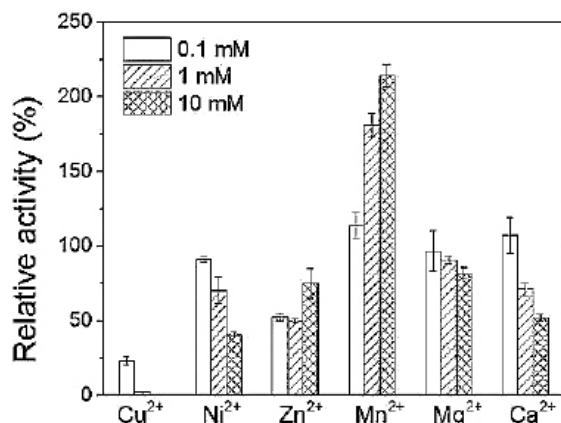
Рисунок 1
Механизм ингибирования ферментативного процесса



Примечание. Из «A Review on enzyme inhibitors», by N. Patadiya, N. Panchal, V. Vaghela, 2021, *International Research Journal of Pharmacy*, 12(6), 60–66. Copyright 2021 by IRJP.

Рисунок 2

Влияние концентрации катионов металлов на активность ферментов



Примечание. Из «Bioinspired immobilization of glycerol dehydrogenase by metal ion-chelated polyethyleneimines as artificial polypeptides», by Y. Zhang, H. Ren, Y. Wang, K. Chen, B. Fang, S. Wang, 2016, *Scientific Reports*, 6, Article 24163 (<https://doi.org/10.1038/srep24163>). Copyright 2016 by Springer Nature Limite.

связано с высвобождением катионов, нативно связанных в его составе (Joslyn, 1963). Поскольку интенсификация ферментативной обработки растительного сырья с целью его глубокой переработки связана с необходимостью оптимизации кинетики ферментативного процесса (Кондратенко с соавт., 2022а; Кондратенко с соавт., 2022б), решение её предполагает предварительное регулирование катионного состава среды «субстрат — фермент» для предотвращения ингибирования (Кондратенко с соавт., 2018). Соответственно, актуальным становится определение целесообразности такого регулирования и параметров его проведения.

Целью данной работы является разработка универсального подхода к определению целесообразности предварительной декатионизации растительного сырья перед ферментативным процессом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Для исследования ферментативной кинетики в качестве субстрата был использован негранулированный сухой немелассированный свекловичный жом (АО «Успенский сахарник», Краснодарский край).

В качестве ферментного препарата использовали гомоферментный препарат рамногалактуроназного (RGL) действия, относящийся к группе лиаз (ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва).

Методы и инструменты

Удельную электрическую проводимость снимали в автоматическом режиме с дискретностью 1 с помощью оригинального программного обеспечения WTW MultiLab Importer 1.24.

Процедура исследования

Для проведения ферментативного процесса в условиях декатионизации предварительно готовили раствор комплексона (ЭДТА) в концентрациях, соответствующих 0,00, 0,20, 0,50 и 0,91 ед. от 2,87 % водного раствора.

Процесс обработки свекловичного жома проводили следующим образом. В коническую колбу объёмом 100 см³ брали навеску сухого субстрата массой 6 г, прибавляли 96 см³ бидистиллированной воды комнатной температуры, перемешивали и оставляли на 15 часов. Экстракт от набухшего субстрата осторожно полностью отделяли. В колбу к субстрату вносили 96 см³ раствора ЭДТА, тщательно перемешивали и выдерживали 46 мин при комнатной температуре. Экстракт от субстрата осторожно полностью отделяли. В колбу с субстратом вносили 96 см³ бидистиллированной воды, предварительно нагретой до температуры 45 °С, и тщательно перемешивали, отделяли образовавшийся экстракт.

Навеску ферментного препарата (0,05, 0,1, 0,2, 0,4 и 0,8 % от массы сухого субстрата) помещали в стеклянный стакан на 50 см³, прибавляли 40 см³ бидистиллированной воды с температурой 45 °С и тщательно перемешивали до полного растворения. Раствор гомоферментного препарата количественно переносили в колбу с субстратом, используя для этого дополнительные 56 см³ бидистиллированной воды с температурой 45 °С. Смесь тщательно перемешивали, колбу со смесью переносили на водяную баню. В смесь помещали и фиксировали на одинаковом расстоянии от дна погружную ячейку кон-

дуктометра WTW inoLab 7310 с чернёными платиновыми электродами.

Ферментативный процесс проводили при температуре теплоносителя 45 °С течение 8 часов.

Анализ данных

Математическую обработку проводили с использованием табличного процессора Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation) с установленными надстройками «Анализ данных», «Поиск решения» и «Подбор параметра», а также специализированного программного обеспечения Table Curve 2D v.5.01 (SYSTAT Software Inc.).

Для уменьшения статистической погрешности, каждый эксперимент проводили в трёхкратной повторности с отбраковкой статистически ненадёжных экспериментальных данных в повторностях по существующим методикам (Seltman, 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В предыдущих исследованиях авторов в области оценки кинетики биотехнологического фрагментирования протопектинового комплекса растительной ткани с использованием гомоферментных препаратов лиазного и гидролазного действия в условиях непрерывного изменения концентрации субстрата (Кондратенко с соавт., 2022а; Кондратенко с соавт., 2022б) был разработан алгоритм определения оптимальной концентрации ферментного препарата. При этом было установлено, что в процессе ферментативной обработки, при прочих равных условиях, происходит непрерывное увеличение одного из фундаментальных показателей кинетики ферментативного процесса — константы Михаэлиса, — что указывает на уменьшение эффективности процесса. Было показано, что наиболее вероятной причиной этого является ингибирующее действие катионов поливалентных металлов, нативно присутствующих в составе матрикса клеточных стенок, на активность ферментов, с увеличением его по мере перевода в раствор при ферментативном фрагментировании протопектинового комплекса. В этом случае перед процессом ферментирования

необходимо удаление некоторой части этих катионов из сырья, для чего необходимо разработать алгоритм определения оптимальных условий декантионизации.

Для этого на основании анализа полученных данных и опираясь на постулируемые положения, был проведён анализ динамики кинетических показателей основного уравнения ферментативной кинетики (уравнения Михаэлиса — Ментон) в процессе ферментирования в зависимости от степени декантионизации:

$$V = \frac{V_{\max} \cdot S}{K_m + S}, \quad (1)$$

где V — темп ферментативного процесса, моль/см³ · с; S — молярная концентрация субстрата, моль/см³; V_{\max} — максимальный (асимптотический) темп ферментативного процесса, моль/см³ · с; K_m — константа Михаэлиса, моль/см³.

Руководствуясь приведёнными выше соображениями, используемые единицы измерения анализируемых показателей были отличны от канонических, не меняя при этом суть и кинетическое описание процессов (Kondratenko, Petrov, *et al.*, 2022).

Для определения кинетических показателей основного уравнения ферментативной кинетики применили его преобразование методом двойных обратных координат по Лайнуиверу-Бэрку:

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_{\max}} + \frac{K_m}{V_{\max}} \cdot \frac{1}{S}. \quad (2)$$

При этом, руководствуясь представлением, что $S = \omega_0 - P = \omega_0 - f_p(\tau)$, где ω_0 — предельная концентрация субстрата при данной степени декантионизации, ед., а $V = f_p'(\tau)$, для удобства оперирования формула (2) была преобразована следующим образом:

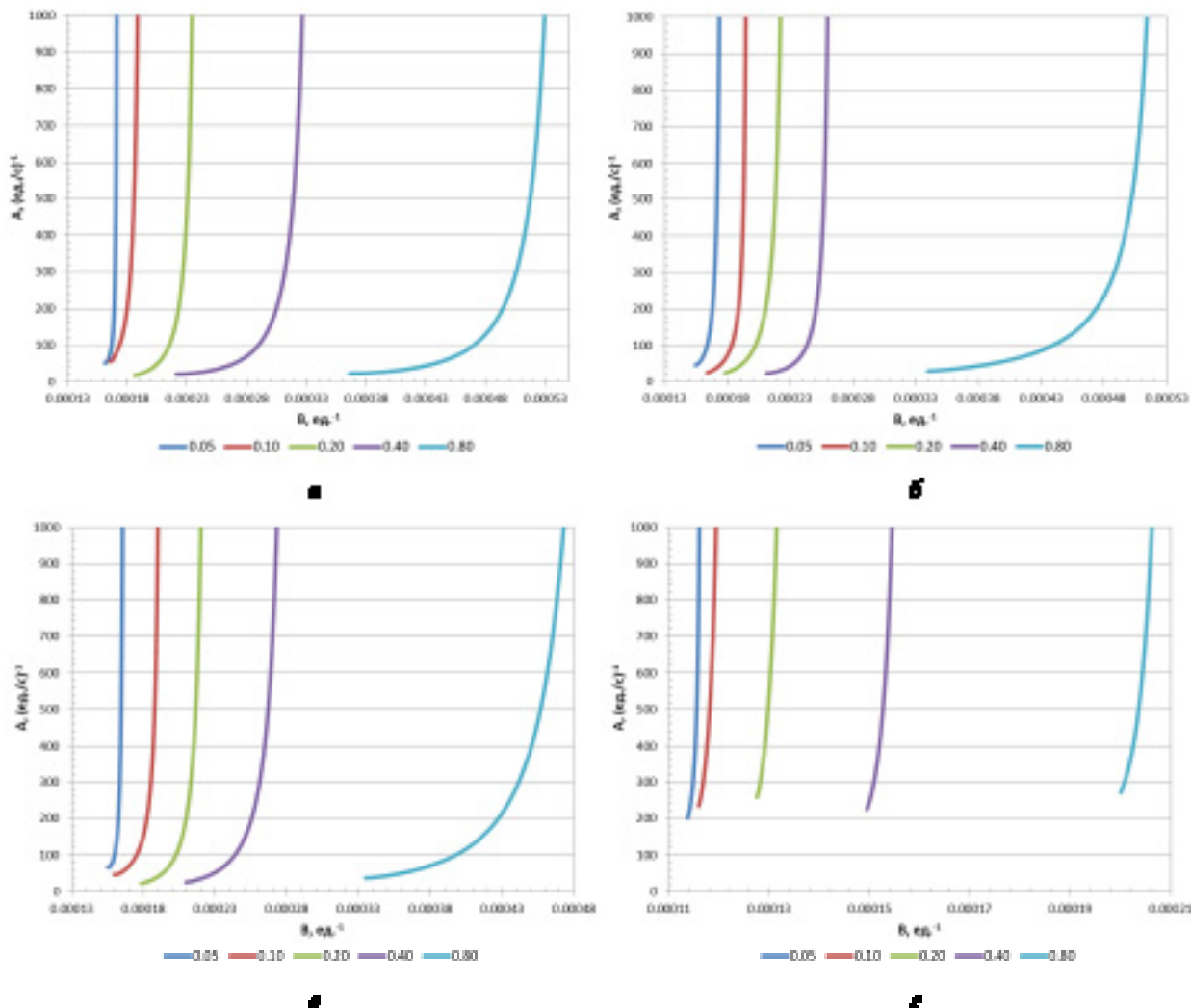
$$A = \frac{1}{V_{\max}} + \frac{K_m}{V_{\max}} \cdot B, \quad (3)$$

где $A = \frac{1}{f_p'(\tau)}$, (ед./с)⁻¹; $B = \frac{1}{\omega_0 - f_p(\tau)}$, ед⁻¹.

Результаты преобразования представлены на Рисунке 3.

Рисунок 3

Влияние концентрации субстрата (в обратных координатах) на темп ферментативного процесса при разной концентрации ферментного препарата при разной в зависимости от степени предварительной декатионизации



Примечания: а – концентрация ЭДТА 0 ед.; б – концентрация ЭДТА 0,2 ед.; в – концентрация ЭДТА 0,5 ед.; г – концентрация ЭДТА 0,91 ед.

Анализ полученных результатов показывает, что во всех вариантах проведения исследования зависимость A от B имеет выраженный нелинейный характер, в силу чего непосредственное решение задачи нахождения кинетических характеристик ферментативного процесса в некоторой степени затруднительно.

В этом случае, как и в наших предыдущих исследованиях (Кондратенко с соавт., 2022а), был применён следующий подход – виду того, что во всех исследованных вариантах вид кривой динамики

накопления продуктов ферментативной обработки демонстрировал монотонное возрастание на всей положительной области определения продолжительности процесса, следовательно, на этой области определения темп накопления, равно как и обратная ему величина A не может быть отрицательной.

В свою очередь, в соответствии с принципом насыщающей дополненности, значение остаточной концентрации субстрата, равно как и обратной ей величине B не может быть отрицательным.

Кроме того, в соответствии с физическим смыслом показателей A, B и V_{\max} , значение последнего соответствует положению

$$V_{\max} = \lim_{B \rightarrow 0} A. \tag{4}$$

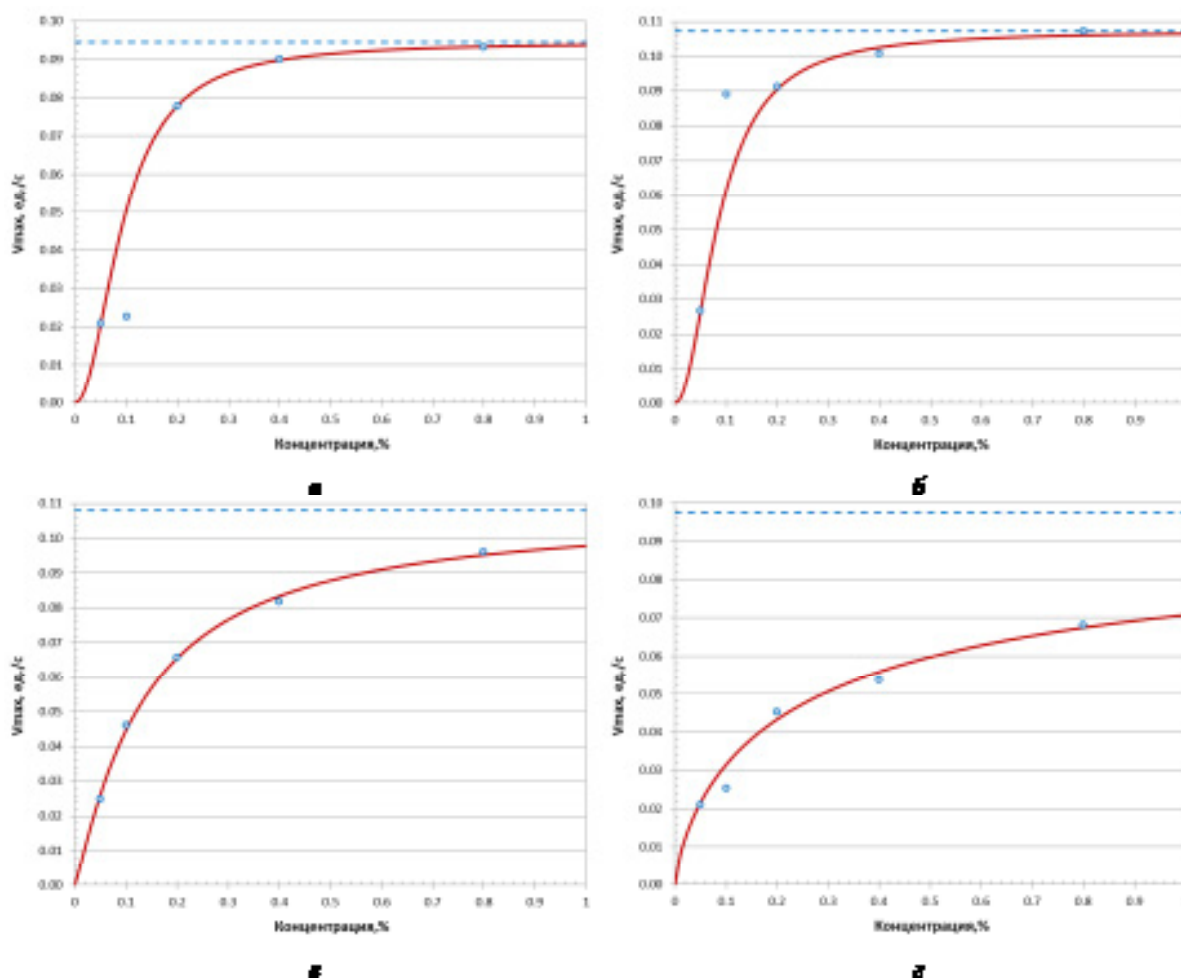
В силу криволинейности зависимости вида $A = f_A(B)$ и специфики преобразования по Лайнуиверу-Берку неотрицательные решения в отношении кинетических характеристик возможны только при условии, что

$$\frac{f_A(B)}{B \cdot f'_A(B)} \geq 1 \Big|_{B \geq 0} \tag{5}$$

на всей положительной области определения значений B .

Рисунок 4

Влияние концентрации ферментного препарата на динамику V_{\max} в зависимости от степени предварительной декатионизации



Примечания: а – концентрация ЭДТА 0 ед.; б – концентрация ЭДТА 0,2 ед.; в – концентрация ЭДТА 0,5 ед.; г – концентрация ЭДТА 0,91 ед.

В отношении всех вариантов, представленных на Рисунке 3, данное требование не выполняется, что указывает на единственность решения задачи, вытекающую из формулы (5).

На основании изложенного подхода для каждого из вариантов были определены значения V_{\max} .

Анализ полученных результатов показал, что, частные значения V_{\max} находятся в функциональной зависимости от концентрации ферментного препарата, монотонно возрастаая при её увеличении, и это справедливо для всех исследованных вариантов предварительной декатионизации (Рисунок 4).

Для каждого варианта предварительной декатионизации было определено математическое описание данной зависимости вида $V_{\max} = f_V(E)$. Во всех вариантах математическое описание имело асимптотический характер. В результате анализа исследованных зависимостей были определены асимптотические значения V_{\max} при $E \rightarrow \infty$, где E — концентрация ферментного препарата, %.

Для определения наличия и выраженности функциональной зависимости V_{\max} от концентрации комплексона для каждого варианта концентрации ферментного препарата, а также для асимптотической концентрации, были получены математические описания вида $V_{\max} = f_{V_{\max}}(C_c)$, где C_c — концентрация комплексона, ед. (Рисунок 5).

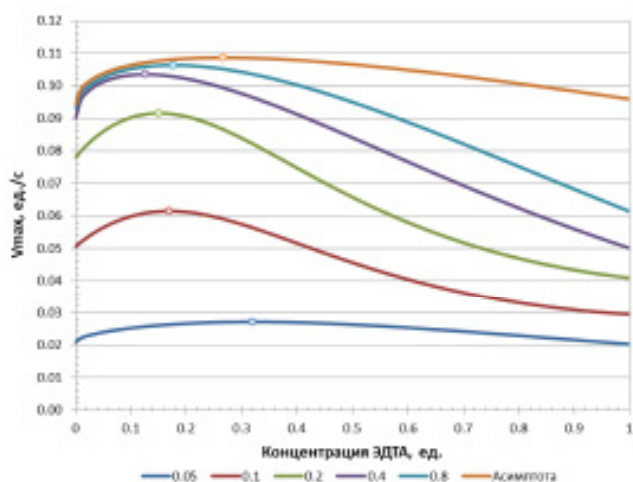
Особенностью полученных математических зависимостей является наличие экстремума, соответствующего некоторому единственному максимальному значению V_{\max} для каждого варианта концентрации ферментного препарата (включая асимптотическую) для соответствующего ему единственного значения концентрации комплексона.

Полагаясь на априорное утверждение, что максимальному значению интенсивности ферментативного процесса при прочих равных условиях соответствует максимальное значение V_{\max} , постулируем условие оптимизации ферментативного процесса:

$$V_{\max} \Big|_{\text{opt}} \rightarrow \max. \quad (6)$$

Рисунок 5

Влияние концентрации комплексона на V_{\max} в зависимости от концентрации ферментного препарата



Для проведения сравнительного анализа эффективности влияния предварительной декатионизации для каждой зависимости, представленной на Рисунке 4, в условиях единственности значения V_{\max} для каждого исследованного варианта, были определены динамики константы Михаэлиса в процессе ферментирования

$$K_m = f_{K_m}(\tau) = \frac{A \cdot V_{\max} - 1}{B}. \quad (7)$$

В рамках каждого из вариантов имела место некоторая динамика рассчитанного показателя. В то же время изменение константы Михаэлиса в процессе ферментации указывает на некоторую его не стационарность.

Для интегральной оценки степени изменчивости константы Михаэлиса введём критерий изменчивости $Q(K_m)$:

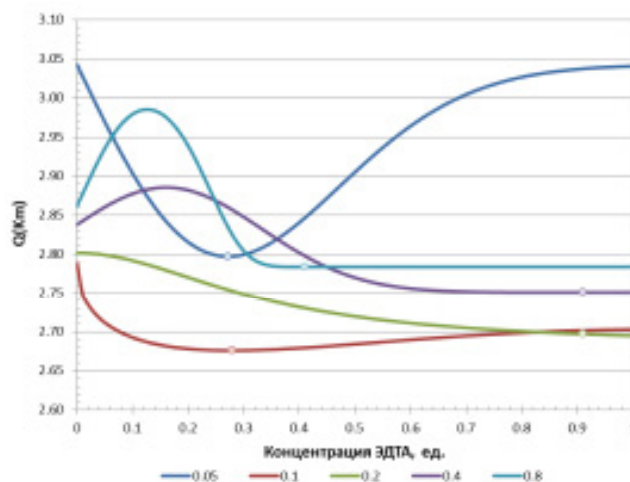
$$Q(K_m) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \log_{10} \left(\frac{K_m}{K_{m(\min)}} \right) d\tau, \quad (8)$$

где $K_{m(\min)}$ — минимальное значение K_m на интервале $\tau \in [\tau_1; \tau_2]$.

Таким образом, каждому варианту концентрации ферментного препарата для каждого варианта концентрации комплексона соответствует единственное значение критерия изменчивости. Для оценки динамики данного критерия в зависимости от концентрации комплексона для каждой концентрации

Рисунок 6

Влияние концентрации комплексона на критерий $Q(K_m)$ в зависимости от концентрации ферментного препарата



ферментного препарата было определено математическое вида $Q(K_m) = f_{Q(K_m)}(C_c)$. Результаты представлены на Рисунке 6.

На основании особенностей влияния изменчивости константы Михаэлиса на кинетику ферментативного процесса было принято априорное утверждение о максимизации эффективности ферментативного процесса при минимизации критерия изменчивости.

В этой связи постулируем II условие оптимизации ферментативного процесса:

$$Q(K_m) \Big|_{\text{opt}} \rightarrow \min. \tag{9}$$

Анализ данных динамики критерия $Q(K_m)$ показывает его нелинейное непрерывное изменение с увеличением концентрации комплексона.

При этом в каждом варианте динамики либо присутствует область локального минимума, либо имеет место полная минимизация критерия изменчивости при достижении некоторого максимального значения концентрации комплексона. Соответственно, наличие данных минимумов соответствует II постулируемому условию оптимизации.

Сравнительный анализ экстремумов V_{\max} , соответствующих I условию оптимизации, и экстремумов $Q(K_m)$, соответствующих II условию оптимизации, показывает их некоторое несовпадение по значениям концентрации комплексона (Таблица 1).

Следствием такого рода несовпадений является невозможность непосредственного определения оптимальных параметров декатионизации только лишь на основе комплексного анализа экстремумов V_{\max} и $Q(K_m)$.

В этой связи необходим некоторый компромисс. Для достижения его введём второй критерий — дискретный критерий оптимальности Z , интегрирующий оба постулируемых условия оптимизации ферментативного процесса:

$$Z = \frac{V_{\max}}{Q(K_m)} = \frac{f_{V_{\max}}(C_c)}{f_{Q(K_m)}(C_c)} = f_Z(C_c). \tag{10}$$

В соответствии с физическим смыслом и положением входящих в критерий параметров, постулируем III условие оптимизации:

$$Z \Big|_{\text{opt}} \rightarrow \max. \tag{11}$$

Согласно математическому описанию критерия Z , отражённому в формуле (10), в пределах каждого значения концентрации ферментного препарата существует как минимум одно значение критерия Z , удовлетворяющее III постулируемому условию:

$$Z_{\max} = f_Z(C_c) \Big|_{\max}. \tag{12}$$

В этом случае, в пределах каждого значения концентрации ферментного препарата существует одна определённая комбинация значений Z_{\max} и со-

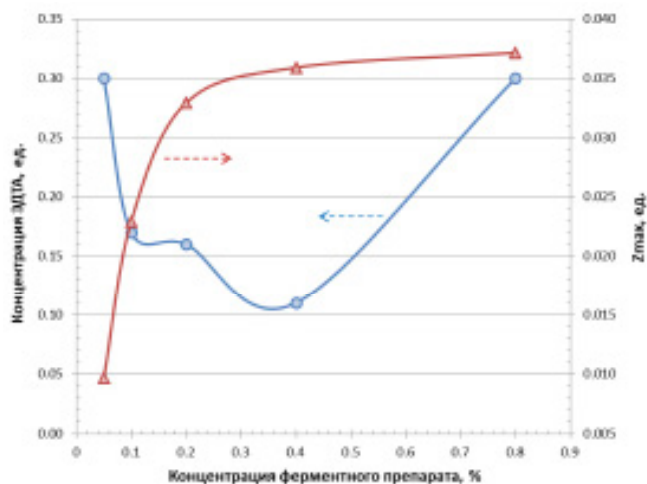
Таблица 1

Значения экстремумов в координатах «концентрация ЭДТА – V_{\max} » и «концентрация ЭДТА – $Q(K_m)$ »

Концентрация RGL, %	Экстремумы по V_{\max}		Экстремумы по $Q(K_m)$	
	$V_{\max(\text{extr})}$	C_c	$Q(K_m)_{(\text{extr})}$	C_c
0.05	0.0271	0.320	2.797	0.272
0.10	0.0615	0.169	2.676	0.279
0.20	0.0915	0.151	2.697	0.910
0.40	0.1035	0.126	2.751	0.910
0.80	0.1063	0.176	2.784	0.410

Рисунок 7

Влияние концентрации ферментного препарата на критерий Z_{\max} и оптимальную концентрацию комплексона



ответствующего ему $C_c|_{Z_{\max}}$. Динамики Z_{\max} и $C_c|_{Z_{\max}}$ в зависимости от концентрации RGL представлены на Рисунке 7.

Сравнительный анализ полученных данных, показывает, что если увеличению концентрации ферментного препарата соответствует монотонное нелинейное увеличение $C_c|_{Z_{\max}}$ с постепенным замедлением прироста показателя, то в отношении динамики Z_{\max} всё сложнее — максимумы этого критерия приходятся на противоположные границы интервала варьирования экспериментальных значений концентраций ферментного препарата, также имеет место локальный минимум, соответствующий концентрации RGL 0,36 %.

При этом в отношении последнего показателя может быть постулировано IV условие оптимизации:

$$Z_{\max}|_{\text{opt}} \rightarrow \max. \quad (13)$$

Принимая во внимание, что при прочих равных условиях оптимальной является та комбинация концентрации комплексона для предварительной декатионизации субстрата и — ферментного препарата для осуществления непосредственно процесса ферментирования, при которой находят одновременное удовлетворение все четыре условия оптимизации при минимизации концентрации участвующих в процессе обработки активных ре-

агентов — комплексона и ферментного препарата. Для реализации этого условия введём комплексный критерий оптимальности декатионизации F :

$$F = \frac{Z_{\max}}{C_c|_{Z_{\max}}} \cdot E. \quad (14)$$

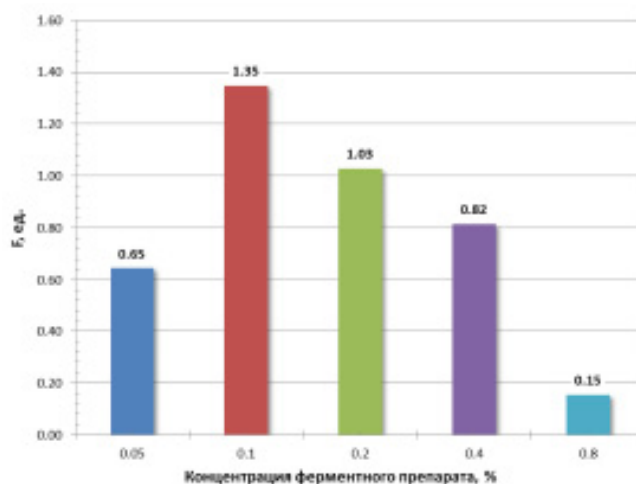
При этом однозначно оптимальным является та комбинация искомых факторов, которая соответствует максимуму данного критерия по вариантам концентрации ферментного препарата ($F|_{\text{opt}} \rightarrow \max$).

Данные по влиянию концентрации фермента на критерий F представлены на Рисунке (8).

Сравнительный анализ значений критерия F показал, что однозначным оптимумом в отношении как расхода комплексона и ферментного препарата, так и в отношении кинетических показателей ферментативного процесса является концентрация RGL и комплексона 0,1% и 0,17 ед., соответственно. При этом остаётся открытым вопрос целесообразности предварительной декатионизации как необходимой составляющей процесса биотехнологической переработки растительного сырья. Ответом на него является анализ изменчивости критерия F по вариантам концентрации ферментного препарата. В случае отсутствия целесообразности декатионизации анализируемая изменчивость будет практически нивелирована в силу малого изменения кинетики ферментативного процесса при обработке растительной ткани комплексонам.

Рисунок 8

Влияние концентрации ферментного препарата на критерий F



Для практической оценки целесообразности декатионизации формализуем процесс оценки изменчивости, сведя его в единый критерий. Логика такой формализации следующая. Большей изменчивости критерия F будет соответствовать большая площадь геометрической фигуры под кривой, соответствующей зависимости $F = f_F(C_c)$, за вычетом «холостой» площади, включающей прямоугольник шириной, равной интервалу области определения экспериментальных значений концентраций ферментного препарата, и высотой, равной минимальному значению (F_{\min}) критерия F на данном интервале, — S_F :

$$S_F = \int_{E_1}^{E_2} F dE - F_{\min} \cdot (E_2 - E_1). \quad (15)$$

При этом практическая реализация процесса интегрирования — непрерывное либо дискретное — существенной роли не играет. На основании определённой площади находим приведённый прирост критерия F на интервале концентраций:

$$\Delta F_{av} = \frac{S_F}{E_2 - E_1}, \quad (16)$$

после чего соотносим полученное значение с максимальным значением функции $F = f_F(E)$ (либо дискретное значение максимума критерия F), определяя тем самым величину относительного прироста критерия F на интервале концентраций:

$$\Delta F_{rel} = \frac{\Delta F_{av}}{F_{\max}}. \quad (17)$$

Для удобства оперирования введём критерий оценки Q :

$$Q = 1 - \Delta F_{rel}. \quad (18)$$

В общем виде, объединяя формулы (15)–(18), после небольшого алгебраического упрощения получим конечную формулу расчёта критерия Q :

$$Q = \frac{(F_{\max} + F_{\min}) \cdot (E_2 - E_1) - \int_{E_1}^{E_2} F dE}{F_{\max} \cdot (E_2 - E_1)}. \quad (19)$$

В силу специфики физического содержания показателя ΔF_{rel} и формулы (18), критическим значением критерия Q , при котором изменчивость показателя

F по вариантам концентрации ферментного препарата практически отсутствует, составляет 0,98.

Значение $Q \geq 0,98$ указывает на отсутствие целесообразности проведения декатионизации, и — наоборот.

В отношении динамики критерия F в диапазоне концентраций ферментного препарата $Q = 0,574$, что указывает на целесообразность проведения предварительной декатионизации свекловичного жома перед ферментативной обработкой гомоферментным препаратом RGL.

Разработанная система критериев позволяет решить сразу три актуальных задачи оптимизации ферментативного процесса:

- (1) определение целесообразности предварительной декатионизации;
- (2) определение оптимальной концентрации ферментного препарата;
- (3) определение оптимальной концентрации комплексона.

В основу методологии проведённых исследований положено ядро алгоритма определения оптимальной концентрации ферментных препаратов лиазного и гидролазного действия для ферментативной обработки растительного сырья, разработанного наших предыдущих исследованиях (Кондратенко с соавт., 2022б). При этом данный алгоритм был значительно усовершенствован с введением в него системы критериев определения целесообразности и оптимальных условий декатионизации сырья перед основной ферментативной обработкой.

ВЫВОДЫ

В результате проведённых исследований было экспериментально установлено, что в процессе предварительной декатионизацией растительного сырья перед основной ферментативной обработкой концентрация комплексона оказывает нелинейное влияние на величину кинетического показателя V_{\max} как в каждой из использованных в работе фиксированных значений концентрации ферментного препарата, так и в их динамике. В этой связи для определения целесообразности и оптимальных параметров предварительной декатионизации была разработана и апробирована последовательность

нетривиальных критериев, позволяющая дать интегральную оценку процесса эффективности процесса ферментирования после предварительного частичного удаления катионов металлов в развёртке концентраций ферментного препарата с учётом наличия и выраженности его проявления. На основании результатов исследования был разработан алгоритм определения целесообразности и оптимальных параметров предварительной декатионизации растительного сырья перед ферментативной обработкой. Данный алгоритм является значительно переработанной и усовершенствованной версией алгоритма определения параметров ферментативной кинетики, оптимальной концентрации и продолжительности процесса ферментирования для гомоферментных препаратов групп лиаз и гидролаз на основе экспериментальных данных динамики косвенного показателя, коррелирующего с молярной концентрацией продукта реакции, разработанного авторами в результате предыдущего этапа исследований (Konдратенко, Petrov et al., 2022). В результате разработанная система критериев позволяет решать сразу три задачи — определение целесообразности предварительной декатионизации, оптимальные концентрации комплексона и гомоферментного препарата. Разработанные критерии и алгоритм в целом позволяют получать адекватную оценку процесса декатионизации в отношении последующей биотехнологической трансформации протопектинового комплекса растительного гомоферментными препаратами лиазного и гидролазного действия. Предположительно, разработанный авторами подход является универсальным в силу сходственности общей структуры протопектинового комплекса растительной ткани и особенностей

ферментализации его основной — рамногалактуроновой — цепи.

Данное исследование является органичным этапом большого комплекса многолетних исследований авторов, нацеленных на разработку единой парадигмы формирования технологических процессов получения пектина и пектинопродуктов с прогнозируемыми потребительскими свойствами из растительного сырья с учётом максимизации использования ресурсного потенциала.

Соответственно, на следующем этапе исследований необходимо, опираясь на полученные результаты, разработать систему формирования технологических процессов глубокой переработки растительного сырья для получения продуктов направленной фрагментации протопектинового комплекса матрикса клеточных стенок на основе дерева принятия решений.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Кондратенко Владимир Владимирович: научное руководство исследованием, концептуализация, разработка методологии исследования, написание — рецензирование и редактирование рукописи.

Татьяна Юрьевна Кондратенко: проведение исследования, верификация данных, формальный анализ — применение статистических и математических методов, визуализация, написание — подготовка черновика рукописи, подготовка и создание рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванова, Ю. В. (2022). Ферменты глазами реставраторов, или остроумный и изобретательный идадьго Дон-Кихот Ламанчский. Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение, (4), 7–20.
- Кондратенко, В. В., Петров, А. Н., & Кондратенко, Т. Ю. (2022а). Основные представления о кинетике ферментативных процессов и подходах к её определению. *Всё о мясе*, (6), 12–19. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-6-12-19>
- Кондратенко, В. В., Петров, А. Н., & Кондратенко, Т. Ю. (2022б). Разработка методов определения оптимальной концентрации ферментов на основании анализа динамики ферментирования. *Пищевая промышленность*, (11), 67–74. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.11.11.016>
- Кондратенко, В. В., Царёва, М. А., Кондратенко, Т. Ю., Давыдова, А. Ю., & Алабина, Н. М. (2018). О декатионизации пектинсодержащего сырья на примере свекловичного жома. *Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия*, 21, 42–48.
- Dhillon, A., Fernandes, V. O., Dias, F. M. V., Prates, J. A. M., Ferreira, L. M. A., Fontes, C. M. G. A., Centeno, M. S., & Goyal, A. (2016). A new member of family 11 polysaccharide lyase, rhamnogalacturonan lyase (CtRGLf) from *Clostridium thermocellum*. *Molecular Biotechnology*, 58, 232–240. <https://doi.org/10.1007/s12033-016-9921-6>
- Fujimoto, Z., Jackson, A., Michikawa, M., Maehara, T., Momma, M., Henrissat, B., Gilbert, H. J., & Kaneko, S. (2013). The

- structure of a streptomyces avermitilis α -L-rhamnosidase reveals a novel carbohydrate-binding module CBM67 within the six-domain arrangement. *The Journal of Biological Chemistry*, 288(17), 12376–12385. <https://doi.org/10.1074/jbc.M113.460097>
- Furusawa, G., Azami, N. A., & The, A.-H. (2021). Genes for degradation and utilization of uronic acid-containing polysaccharides of a marine bacterium *Catenovulum* sp. CCB-QB4. *PeerJ*, 9, Article 10929. <http://doi.org/10.7717/peerj.10929>
- Iwai, M., Yamada, H., Ikemoto, T., Matsumoto, S., Fujiwara, D., Takenaka, S., & Sakamoto, T. (2015). Biochemical characterization and overexpression of an endo-rhamnogalacturonan lyase from *penicillium chrysogenum*. *Molecular Biotechnology*, 57(6), 539–548. <https://doi.org/10.1007/s12033-015-9847-4>
- Jensen, M. H., Otten, H., Christensen, U., Borchert, T. V., Christensen, L. L. H., Larsen, S., & Leggi, L. L. (2010). Structural and biochemical studies elucidate the mechanism of rhamnogalacturonan lyase from *aspergillus aculeatus*. *Journal of Molecular Biology*, 404(1), 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2010.09.013>
- Joslyn, M. A. (1963). The chemistry of protopectin: A critical review of historical data and recent developments. *Advances in Food Research*, 11, 1–107. [https://doi.org/10.1016/S0065-2628\(08\)60064-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2628(08)60064-6)
- Laatu, M., & Condemine, G. (2003). Rhamnogalacturonate lyase RhiE is secreted by the out system in *Erwinia chrysanthemi*. *Journal of Bacteriology*, 185(5), 1642–1649. <https://doi.org/10.1128/JB.185.5.1642-1649.2003>
- Mandake, M. B., Das, U., Phad, L., & Busamwar, S. (2020). Application of enzyme immobilization in the food industry. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science*, 7(2), 6–10. <http://dx.doi.org/10.20431/2349-0403.0702002>
- Morales-Quintana, L., Ramos, P., & Méndez-Yáñez, A. (2022). Rhamnogalacturonan endolyase family 4 enzymes: An update on their importance in the fruit ripening process. *Horticulturae*, 8(5), 465. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050465>
- Ochiai, A., Itoh, T., Kawamata, A., Hashimoto, W., & Murata, K. (2007). Plant cell wall degradation by saprophytic *Bacillus subtilis* strains: Gene clusters responsible for rhamnogalacturonan depolymerization. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(12), 3803–3813. <https://doi.org/10.1128/aem.00147-07>
- O'Neill, E. C., Stevenson, C. E., Paterson, M. J., Rejzek, M., Chauvin, A. L., Lawson, D. M., & Field, R. A. (2015). Crystal structure of a novel two domain GH78 family α -rhamnosidase from *Klebsiella oxytoca* with rhamnose bound. *Protein*, 83(9), 1742–1749. <https://doi.org/10.1002/prot.24807>
- Patadiya, N., Panchal, N., & Vaghela, V. (2021). A Review on enzyme inhibitors. *International Research Journal of Pharmacy*, 12(6), 60–66. <http://doi.org/10.7897/2230-8407.1206145>
- Rimareva, L. V., Serba, E. M., Sokolova, E. N., Borshcheva, Yu. A., & Ignatova, N. I. (2017). Enzyme preparations and biocatalytic processes in the food industry. *Problems of Nutrition*, 86(5), 62–74. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2017-00078>
- Robin, T., Reuveni, S., & Urbakh, M. (2018). Single-molecule theory of enzymatic inhibition. *Nature Communications*, 9, Article 779. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02995-6>
- Seltman, Y. J. (2018). *Experimental design and analysis*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University.
- Silva, I. R., Larsen, D. M., Meyer, A. S., & Mikkelsen, J. D. (2011). Identification, expression, and characterization of a novel bacterial RGI lyase enzyme for the production of bio-functional fibers. *Enzyme and Microbial Technology*, 49(2), 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2011.04.015>
- Wang, W., Wang, Y., Yi, H., Liu, Y., Zhang, G., Zhang, L., Mayo, K. H., Yuan, Y., & Zhou, Y. (2022). Biochemical characterization of two rhamnogalacturonan lyases from *bacteroides ovatus* ATCC 8483 with preference for RG-I substrates. *Frontiers in Microbiology*, 12, Article 799875. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.799875>
- Yuan, Y., Zhang, X.-Y., Zhao, Y., Zhang, H., Zhou, Y.-F., & Gao, J. (2019). A Novel PL9 pectate lyase from *paenibacillus polymyxa* KF-1: Cloning, expression, and its application in pectin degradation. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(12), Article 3060. <https://doi.org/10.3390/ijms20123060>
- Zhang, Y., Ren, H., Wang, Y., Chen, K., Fang, B., & Wang, S. (2016). Bioinspired immobilization of glycerol dehydrogenase by metal ion-chelated polyethyleneimines as artificial polypeptides. *Scientific Reports*, 6, Article 24163. <https://doi.org/10.1038/srep24163>

REFERENCES

- Ivanova, Yu. V. (2022). Fermenty glazami restavratorov, ili ostroumnyi i izobretatel'nyi idal'go Don-Kikhot Lamanchskii [Enzymes through the eyes of restorers, or the witty and inventive Hidalgo Don Quixote of La Mancha]. *Khudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavratsiya. Khraneniye [Artistic Heritage. Researches. Restoration. Keeping]*, (4), 7–20.
- Kondratenko, V. V., Petrov, A. N., & Kondratenko, T. Yu. (2022a). Osnovnye predstavleniya o kinetike fermentativnykh protsessov i podkhodakh k ee opredeleniyu [Basic ideas about the kinetics of enzymatic processes and approaches to its definition]. *Vse o myase [All about Meat]*, (6), 12–19. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-6-12-19>
- Kondratenko, V. V., Petrov, A. N., & Kondratenko, T. Yu. (2022b). Razrabotka metodov opredeleniya optimal'noi kontsentratsii fermentov na osnovanii analiza dinamiki fermentirovaniya [Development of methods for determining the optimal concentration of enzymes based on the analysis of the dynamics of fermentation]. *Pishchevaya*

- promyshlennost'* [Food Industry], (11), 67–74. <https://doi.org/10.52653/PPL.2022.11.11.016>
- Kondratenko, V. V., Tsareva, M. A., Kondratenko, T. Yu., Davydova, A. Yu., & Alabina, N. M. (2018). O dekationizatsii pektinsoderzhashchego syr'ya na primere sveklovichnogo zhoma [On decationization of pectin-containing raw materials on the example of beet pulp]. *Nauchnye trudy Severo-Kavkazskogo federal'nogo nauchnogo tsentra sadovodstva, vinogradarstva, vinodeliya* [Scientific Works of the North Caucasus Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Winemaking], 21, 42–48.
- Dhillon, A., Fernandes, V. O., Dias, F. M. V., Prates, J. A. M., Ferreira, L. M. A., Fontes, C. M. G. A., Centeno, M. S., & Goyal, A. (2016). A new member of family 11 polysaccharide lyase, rhamnogalacturonan lyase (CtRGLf) from *Clostridium thermocellum*. *Molecular Biotechnology*, 58, 232–240. <https://doi.org/10.1007/s12033-016-9921-6>
- Fujimoto, Z., Jackson, A., Michikawa, M., Maehara, T., Momma, M., Henrissat, B., Gilbert, H. J., & Kaneko, S. (2013). The structure of a streptomyces avermitilis α -L-rhamnosidase reveals a novel carbohydrate-binding module CBM67 within the six-domain arrangement. *The Journal of Biological Chemistry*, 288(17), 12376–12385. <https://doi.org/10.1074/jbc.M113.460097>
- Furusawa, G., Azami, N. A., & The, A.-H. (2021). Genes for degradation and utilization of uronic acid-containing polysaccharides of a marine bacterium *Catenovulum* sp. CCB-QB4. *PeerJ*, 9, Article 10929. <http://doi.org/10.7717/peerj.10929>
- Iwai, M., Yamada, H., Ikemoto, T., Matsumoto, S., Fujiwara, D., Takenaka, S., & Sakamoto, T. (2015). Biochemical characterization and overexpression of an endo-rhamnogalacturonan lyase from *Penicillium chrysogenum*. *Molecular Biotechnology*, 57(6), 539–548. <https://doi.org/10.1007/s12033-015-9847-4>
- Jensen, M. H., Otten, H., Christensen, U., Borchert, T. V., Christensen, L. L. H., Larsen, S., & Leggi, L. L. (2010). Structural and biochemical studies elucidate the mechanism of rhamnogalacturonan lyase from *Aspergillus aculeatus*. *Journal of Molecular Biology*, 404(1), 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2010.09.013>
- Joslyn, M. A. (1963). The chemistry of protopectin: A critical review of historical data and recent developments. *Advances in Food Research*, 11, 1–107. [https://doi.org/10.1016/S0065-2628\(08\)60064-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2628(08)60064-6)
- Laatu, M., & Condemine, G. (2003). Rhamnogalacturonate lyase RhiE is secreted by the out system in *Erwinia chrysanthemi*. *Journal of Bacteriology*, 185(5), 1642–1649. <https://doi.org/10.1128/JB.185.5.1642-1649.2003>
- Mandake, M. B., Das, U., Phad, L., & Busamwar, S. (2020). Application of enzyme immobilization in the food industry. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science*, 7(2), 6–10. <http://dx.doi.org/10.20431/2349-0403.0702002>
- Morales-Quintana, L., Ramos, P., & Méndez-Yáñez, A. (2022). Rhamnogalacturonan endolyase family 4 enzymes: An update on their importance in the fruit ripening process. *Horticulturae*, 8(5), 465. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050465>
- Ochiai, A., Itoh, T., Kawamata, A., Hashimoto, W., & Murata, K. (2007). Plant cell wall degradation by saprophytic *Bacillus subtilis* strains: Gene clusters responsible for rhamnogalacturonan depolymerization. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(12), 3803–3813. <https://doi.org/10.1128/aem.00147-07>
- O'Neill, E. C., Stevenson, C. E., Paterson, M. J., Rejzek, M., Chauvin, A. L., Lawson, D. M., & Field, R. A. (2015). Crystal structure of a novel two domain GH78 family α -rhamnosidase from *Klebsiella oxytoca* with rhamnose bound. *Protein*, 83(9), 1742–1749. <https://doi.org/10.1002/prot.24807>
- Patadiya, N., Panchal, N., & Vaghela, V. (2021). A Review on enzyme inhibitors. *International Research Journal of Pharmacy*, 12(6), 60–66. <http://doi.org/10.7897/2230-8407.1206145>
- Rimareva, L. V., Serba, E. M., Sokolova, E. N., Borshcheva, Yu. A., & Ignatova, N. I. (2017). Enzyme preparations and biocatalytic processes in the food industry. *Problems of Nutrition*, 86(5), 62–74. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2017-00078>
- Robin, T., Reuveni, S., & Urbakh, M. (2018). Single-molecule theory of enzymatic inhibition. *Nature Communications*, 9, Article 779. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02995-6>
- Seltman, Y. J. (2018). *Experimental design and analysis*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University.
- Silva, I. R., Larsen, D. M., Meyer, A. S., & Mikkelsen, J. D. (2011). Identification, expression, and characterization of a novel bacterial RGI lyase enzyme for the production of bio-functional fibers. *Enzyme and Microbial Technology*, 49(2), 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2011.04.015>
- Wang, W., Wang, Y., Yi, H., Liu, Y., Zhang, G., Zhang, L., Mayo, K. H., Yuan, Y., & Zhou, Y. (2022). Biochemical characterization of two rhamnogalacturonan lyases from *Bacteroides ovatus* ATCC 8483 with preference for RG-I substrates. *Frontiers in Microbiology*, 12, Article 799875. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.799875>
- Yuan, Y., Zhang, X.-Y., Zhao, Y., Zhang, H., Zhou, Y.-F., & Gao, J. (2019). A Novel PL9 pectate lyase from *Paenibacillus polymyxa* KF-1: Cloning, expression, and its application in pectin degradation. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(12), Article 3060. <https://doi.org/10.3390/ijms20123060>
- Zhang, Y., Ren, H., Wang, Y., Chen, K., Fang, B., & Wang, S. (2016). Bioinspired immobilization of glycerol dehydrogenase by metal ion-chelated polyethyleneimines as artificial polypeptides. *Scientific Reports*, 6, Article 24163. <https://doi.org/10.1038/srep24163>

УДК 664.764:663.14.038.3

Влияние способа получения экстрактов из зерновых отрубей на ферментативную активность *Saccharomyces Cerevisiae* W-34/70

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Л. В. Пермякова, И. Ю. Сергеева, И. А. Короткий, С. С. Лашицкий, Л. А. Рябоконева

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Короткий Игорь Алексеевич

E-mail: krot69@mail.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Пермякова, Л.В., Сергеева, И.Ю., Короткий, И.А., Лашицкий, С.С., & Рябоконева, Л.А. (2023). Влияние способа получения экстрактов из зерновых отрубей на ферментативную активность *Saccharomyces Cerevisiae* W-34/70. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 132-145. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.445>

ПОСТУПИЛА: 15.02.2023

ПРИНЯТА: 17.07.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-20102, <https://rscf.ru/project/22-26-20102/> (дата соглашения 25.03.2022) и Кемеровской области (Кузбасса).

АННОТАЦИЯ

Введение: Сокращение длительности ферментации среды, накопления биомассы – актуальная задача в производстве продуктов брожения. Интенсификация процесса сбродивания суслу напрямую связана с активностью дрожжей. Зерновые отруби – доступный источник биологически ценных для дрожжей веществ (азотистых, минеральных, витаминов), извлечение которых возможно различными приемами.

Цель: Изучить влияние экстрактов, полученных обработкой отрубей (пшеничных, ржаных, овсяных) ультразвуком (УЗ) и ферментными препаратами, на бродильную активность пивных дрожжей W-34/70.

Материалы и методы: Объекты – экстракты отрубей, производственные пивные дрожжи. Параметры обработки водно-отрубных суспензий УЗ: мощность 30–90 % от полной, длительность от 1 до 7 минут; ферментными препаратами (Termamyl 60 L, Ultraflo XL, Alkalase, Ondea pro) – температура 55 °С, время от 40 до 120 минут.

Результаты: Выявлен максимальный выход сухих веществ и азота аминокислот через 5 минут озвучивания при мощности УЗ 70 % в ржаном экстракте. Высокое накопление аминного азота в экстрактах обеспечили препараты Alkalase (в 1,4–2 раза по отношению к контролю – отруби без обработки), Ultraflo XL (в 1,1–2,5 раза), Ondea pro (в 1,2–2,3 раза), редуцирующих веществ – Termamyl (в 1,2–3 раза), Ondea pro (в 1,1–3,8 раза), Ultraflo XL (в 1,2–1,7 раза). По абсолютным значениям исследуемых показателей преимущество у ржаных и пшеничных экстрактов при любом способе получения. Бродильная активность дрожжей после 20 минут обработки УЗ экстрактами (ржаным/овсяным) в среднем на 40 % выше в сравнении с пшеничным экстрактом, после выдержки с ферментативными экстрактами (Termamyl и Ondea pro) – на 170 и 260 % больше контроля.

Выводы: Использование отрубных экстрактов повышает биокаталитическую активность пивных дрожжей W-34/70, что в дальнейшем интенсифицирует размножение культуры, азотистый обмен с целью получения биоактивных пептидов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

отруби зерновые, ультразвук, ферментные препараты, аминный азот, дрожжи пивные, бродильная активность



The Influence of the Method of Obtaining Extracts From Cereal Bran for the Enzymative Activity of *Saccharomyces Cerevisiae* W-34/70

Kemerovo State University, Moscow, Russia

Larisa V. Permyakova, Irina Y. Sergeeva, Igor' A. Korotkiy, Sergey S. Lashitsky, Larisa A. Ryabokoneva

CORRESPONDENCE:

Igor' A. Korotkiy

E-mail: krot69@mail.ru

FOR CITATIONS:

Permyakova, L.V., Sergeeva, I.Yu., Korotkiy, I.A., Lashitsky, S.S., & Ryabokoneva L.A. (2023). The Influence of the Method of Obtaining Extracts From Cereal Bran for the Enzymative Activity of *Saccharomyces Cerevisiae* W-34/70. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 132-145. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.445>

RECEIVED: 15.02.2023

ACCEPTED: 17.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 22-26-20102, <https://rscf.ru/project/22-26-20102/> (date of agreement 03/25/2022) and the Kemerovo Region (Kuzbass).

ABSTRACT

Background: Reducing the duration of the fermentation of the medium, the accumulation of biomass is an urgent task in the production of fermentation products. The intensification of the must fermentation process is directly related to the activity of the yeast. Cereal bran is an affordable source of biologically valuable substances for yeast (nitrogenous, mineral, vitamins), the extraction of which is possible by various methods.

Purpose: To study the effect of extracts obtained by processing bran (wheat, rye, oat) with ultrasound (US) and enzyme preparations on the fermentation activity of brewer's yeast W-34/70

Materials and Methods: Processing parameters of aqueous bran suspensions US: power 30–90% of full, duration from 1 to 7 minutes; enzyme preparations (Termamyl 60 L, Ultraflo XL, Alkalase, Ondea pro) - temperature 55 ° C, time from 40 to 120 minutes. The maximum yield of solids and nitrogen of amino acids was revealed after 5 minutes of sonication at an ultrasound power of 70% in rye extract.

Results: The maximum yield of solids and nitrogen of amino acids was revealed after 5 minutes of sonication at an ultrasound power of 70% in rye extract. The high accumulation of amine nitrogen in the extracts was provided by Alkalase preparations (by 1.4–2 times in relation to the control bran without treatment), Ultraflo XL (by 1.1–2.5 times), Ondea pro (by 1.2–2.3 times), reducing substances – Termamyl (by 1.2–3 times), Ondea pro (by 1.1–3.8 times), Ultraflo XL (by 1.2–1.7 times). According to the absolute values of the studied parameters, rye and wheat extracts have an advantage for any method of obtaining. The fermentation activity of yeast after 20 minutes of treatment with ultrasonic extracts (rye/oatmeal) is on average 40% higher compared to wheat extract, after aging with enzymatic extracts (Termamyl and Ondea pro) it is 170% and 260% higher than control.

Conclusion: The use of bran extracts increases the biocatalytic activity of brewer's yeast W-34/70, which further intensifies the propagation of the culture, nitrogen metabolism in order to obtain bioactive peptides.

KEYWORDS

grain bran, ultrasound, enzyme preparations, amine nitrogen, brewer's yeast, fermentation activity



ВВЕДЕНИЕ

Полноценность питательной среды — обязательное условие для нормального развития любого биообъекта, в том числе дрожжей. В процессе культивирования дрожжей с целью получения как напитков брожения, спирта, так и биомассы клеток для извлечения биологически активных субстанций, в зависимости от концентрации растворенных веществ среды, принятых технологических режимов и используемого оборудования микробная культура может испытывать различного рода стрессы, ухудшающие размножение популяции, приводящие к ее дегенерации, торможению процесса ферментации среды, негативным изменениям в целом характеристик готового продукта (Annemuller et al., 2011; Меледина с соавт., 2013; Пермьякова, 2016; Shiyan et al., 2017). Минимизация данных отклонений возможна разнообразными приемами, с использованием различных источников органических и неорганических веществ (Пермьякова, 2016; Ковалева с соавт., 2021; Rimareva et al., 2022). Одним из таковых ресурсов являются отруби — вторичные продукты переработки мукомольного производства. Обычно отруби используют в качестве источника пищевых волокон в хлебопекарном и макаронном производстве, в кормах для животных и как важный компонент продуктов функционального назначения (Казаков & Карпиленко, 2005; Лукьянчикова с соавт., 2020; Nemes et al., 2022).

По сравнению с нативным сырьем содержание крахмала в отрубях ниже в 2,5–3 раза, однако количество некрахмальных полисахаридов, белковых и минеральных компонентов на порядок больше. В состав отрубей входят биологически активные компоненты, такие как полифенолы, водорастворимая клетчатка (β -глюкан, арабиноксилан), устойчивый крахмал, обладающие антиоксидантной и пребиотической активностью, жирорастворимые и водорастворимые витамины (Казаков & Карпиленко, 2005; Chalamacharla et al., 2018; Nemes et al., 2022). По содержанию минеральных веществ в отрубях среди множества макроэлементов лидируют калий, фосфор, магний и кальций (Крикунова с соавт., 2021). Наличие широкого набора аминокислот позволяет использовать отруби в качестве дополнительного источника азотистого питания для микробной культуры, что отмечено рядом авторов при получении дистиллятов (Крикунова & Дубинина 2022; Крикунова с соавт., 2022), культивиро-

вании микроорганизмов (Капрельянц & Журлова, 2015; Иштуганова & Гаричева, 2021; Шарова с соавт., 2023). Учитывая это, зерновые отруби можно рассматривать как альтернативный ресурс факторов роста и питания для пивных дрожжей.

Для интенсификации извлечения необходимых компонентов из сырья можно применять разнообразные методы воздействия: химические, биохимические, физические (Pasha et al., 2020; Ковалева с соавт., 2021; Крикунова с соавт., 2021; Витол, 2022; Krikunova et al., 2023; Pogorelova & Gavrilova, 2023). С этой точки зрения интерес представляет использование ультразвука (УЗ), как одного из наиболее изученного, доступного и экологичного с точки зрения снижения нагрузки на сам продукт и окружающую среду физического фактора (Верещагин & Хмелева, 2010; Chemat et al., 2011; Калужина с соавт., 2020; Пономарёва с соавт., 2020; Gavahian et al., 2022). Биологический эффект УЗ зависит от свойств объекта, мощности и длительности действия. При малой и кратковременной интенсивности УЗ наблюдается положительное воздействие на биологический объект без его разрушения, в противном случае — происходят необратимые разноуровневые (тканевые, клеточные, молекулярные) повреждения. Основной механизм УЗ определяется эффектом кавитации в жидких средах, а также изменением проницаемости клеточных стенок и мембран, скорости физиолого-биохимических процессов, температурным воздействием (Верещагин & Хмелева, 2010; Chemat et al., 2011).

В ряде работ показано использование УЗ обработки с целью интенсификации экстракции белка, арабиноксилана, фенольных веществ, деградация клеточных стенок, повышения окислительной стабильности, изменения структурно-функциональных свойств растительных объектов, в том числе зерновых и бобовых (пшеницы и сои) (Моргунова, 2022), корня *Polyscias fru-ticosa* (L.) Harms (Quoc & Anh, 2023), подсолнечного жмыха в смеси с молочной сывороткой (Волончук с соавт., 2022), отрубей пшеничных (Wang et al., 2014; Habuš et al., 2021), рисовых (Wang et al., 2021), кунжутных (Görgüç et al., 2020), овсяных (Зяйнитдинов с соавт., 2020). При этом применяли ультразвуковые установки различных производителей, параметры воздействия отличались частотой (от 18–20 кГц до 35 кГц), мощностью (от 100 Вт до 550 Вт), длительностью озвучивания (в большинстве случаев от 10 до 30 мин).

Другим способом повышения выхода ценных веществ из сырья является ферментативный, позволяющий в различной степени осуществить деградацию биополимеров исходного сырья (Погорелова с соавт., 2020; Pasha et al., 2020; Ковалева с соавт., 2021; Серба с соавт., 2022; Rimareva et al., 2022; Krikunova et al., 2023). Спектр биокатализаторов характеризуется производителями (отечественными и зарубежными), наличием активности ферментов (одного или нескольких), оптимальными условиями действия.

Целью данной статьи являлось исследование возможности применения зерновых отрубей в виде водных экстрактов, полученных с использованием УЗ либо биокатализаторов, для стимуляции биохимических свойств пивных дрожжей *S. cerevisiae* W-34/70. При этом решались следующие задачи: (1) определение рациональных параметров получения экстрактов из отрубей в результате воздействия УЗ или ферментных препаратов, (2) оценка бродительной активности дрожжевой культуры после обработки экстрактами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Объекты изучения — водные экстракты зерновых отрубей и производственные пивные дрожжи низового брожения *S. cerevisiae* W-34/70 (ООО «ТД «Золотая сова», г. Кемерово).

Для получения экстрактов использовали отруби: пшеничные, овсяные (ООО «Эверест», С-Петербург), ржаные (ООО «Эль-Про», Тульская область, г. Узловая). Дрожжи расы W-34/70 были выбраны с учетом их широкого использования для ферментации сусла на отечественных пивоваренных заводах.

Оборудование

Отруби измельчали на лабораторной мельнице (модель ЛЗМ-1), рассевали на ситах (с диаметром отверстий $d_1 = 1,0$ мм, $d_2 = 0,50$ мм).

Для обработки отрубей УЗ использовали установку «Волна» УЗТА-0,63/22-ОМ (г. Бийск). Основные

технические характеристики: полная мощность 630 ВА, регуляция выходной мощности (30–100%), частота механических колебаний $22 \pm 1,65$ кГц, интенсивность ультразвукового воздействия не менее 10 Вт/см². В условиях эксперимента длительность воздействия варьировалась от 1 до 7 минут.

Методы

Эффективность процесса экстрагирования оценивали общепринятыми методами: по количеству сухих веществ — рефрактометрическим способом, аминного азота — «медным» способом, редуцирующих веществ — йодометрическим методом в пересчете на мальтозу. В дрожжах до и после обработки определяли бродительную активность экспресс-методом по количеству выделившегося CO₂ за 1 час (Давыденко, 2012).

Процедура исследования

С учетом влияния размера частиц зернового сырья на содержание отдельных групп веществ и выход их в раствор (Аманжол с соавт., 2019; Ульянова с соавт., 2020; Крикунова & Дубинина 2022; Крикунова с соавт., 2022) в работе применяли фракцию, являющуюся сходом с сита $d_2 = 0,50$ мм.

Извлечение экстрактивных веществ осуществляли следующим образом: отруби смешивали с дистиллированной водой (гидромодуль 1:10) и подвергали ультразвуковому или ферментативному воздействию.

Воздействие на отруби биокатализаторов изучали на примере ферментных препаратов «Novozymes» (Дания): Termamyl 60 L, Ultraflo XL, Alkalase, Ondea pro (Таблица 1). В водно-отрубные суспензии вносили ферментные препараты в виде 1%-х растворов и помещали в водяную баню лабораторного шейкера. Параметры проведения гидролиза: температура 55 °С, длительность инкубации смеси при заданной температуре 40, 60, 90 и 120 минут, скорость перемешивания 50 мин⁻¹. Периодически отбирали пробы для оценки глубины гидролиза. Для инактивации ферментов растворы выдерживали в водяной бане при температуре 85 °С в течение 5 минут. Контролем служили водно-отрубные суспензии без экзогенного ферментативного воздействия, но с тем-

Таблица 1

Характеристика ферментных препаратов

Препарат	Основная активность
Termamyl	Термостабильная α -амилаза
Alkalase	Кислая эндопротеаза
Ultraflo XL	Целлюлоза, β -глюканаза, ксиланаза, α -амилаза
Ondea Pro	Термостабильная α -амилаза, протеаза, липаза, ксиланаза, β -глюканаза, пуллуланаза

пературной и временной выдержкой, аналогичной опытным образцам. Режимы обработки зерновых отрубей препаратами (доза, температура) соответствовали рекомендациям производителя.

Экстракты, полученные любым способом, центрифугировали при 3500 мин⁻¹ в течение 10 минут и применяли для активации дрожжевой культуры. Производственные пивные дрожжи смешивали с отрубными экстрактами в соотношении 1:1, выдерживали в диапазоне от 20 до 60 минут при температуре 24–25 °С. Контролем служила водно-дрожжевая суспензия (1:1) без обработки.

Анализ данных

Результаты работы обрабатывали статистически и выражали в средних значениях со стандартным отклонением. Различия считали достоверными при уровне вероятности $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

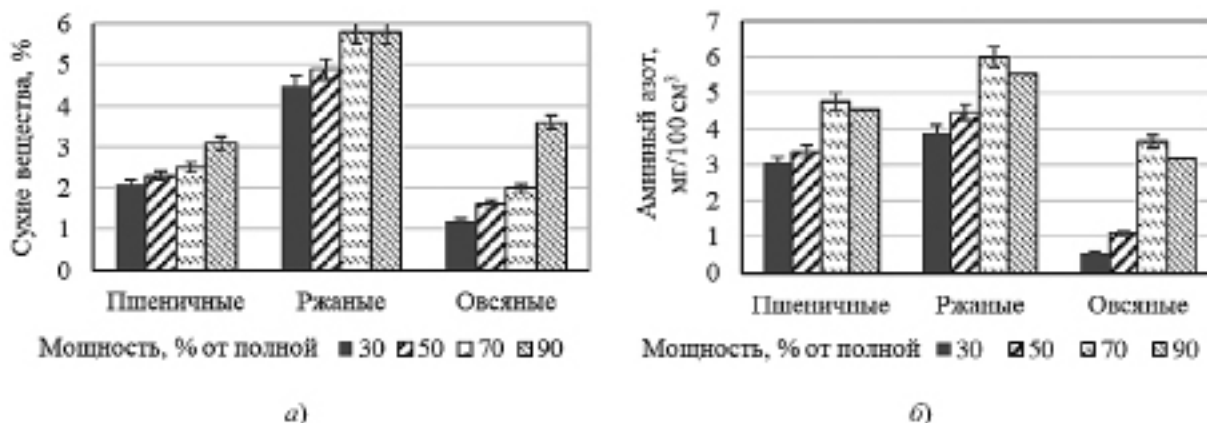
Получение экстрактов воздействием ультразвука

На первом этапе исследований определяли влияние обработки водно-отрубных суспензий УЗ в диапазоне 30–90 % от полной мощности при однотипной длительности воздействия (3 мин) на выход сухих веществ и содержание аминного азота. Полученные данные, представленные на Рисунке 1, свидетельствуют о возрастании сухих веществ в экстрактах с увеличением мощности УЗ воздействия. В исследуемом интервале мощности наибольший прирост сухих веществ наблюдается в овсяных экстрактах (при мощности 90 % увеличение в 3 раза в сравнении с мощностью 30 %, в то время как в пшеничных — в 1,5 раза, в ржаных в 1,3 раза). Однако абсолютные значения сухих веществ в экстрактах ржаных отрубей в среднем в 2,3 раза больше в сравнении с овсяными и пшеничными экстрактами.

Изменение содержания аминного азота имеет схожий характер, но при мощности 90 % происходит некоторое снижение величины данного показателя. Максимальное значение азота аминокислот при мощности УЗ 70 % в ржаном экстракте на 36 и 64 % выше, чем соответственно в экстрактах из пшеничных и овсяных отрубей. Приоритет ржаных отрубей по содержанию растворимого белка, аминного азота перед иными видами (пшеничными, тритикалевыми) отмечается в работах и других авторов (Ульянова с соавт., 2020; Крикунова с соавт.,

Рисунок 1

Содержание в экстрактах: а) сухих веществ, б) аминного азота в зависимости от мощности УЗ обработки отрубей



2022). В указанных исследованиях количество азота аминокислот в экстрактах ржаных отрубей фракции 0,56 мм было на 10–14% больше, чем в пшеничных, при этом экстрагирование осуществляли методом настаивания в интервале от 5 до 30 минут при температуре 20–25 °С. Использование УЗ воздействия (в диапазоне мощности 30–90% от полной) на зерновое сырье аналогичной фракции позволило нам существенно увеличить выход низкомолекулярных азотистых соединений из ржаных отрубей в сравнении с пшеничными — в среднем на 27%.

С учетом выявленных тенденций определяли рациональное время обработки водных суспензий отрубей УЗ при мощности 70% и 90%, контролируя накопление аминного азота. Наибольший выход низкомолекулярных азотистых веществ был достигнут через 5 минут озвучивания при мощности 70% (Рисунок 2). Величина этого показателя в ржаном экстракте в среднем в 1,4 раза выше в сравнении с пшеничным и овсяным экстрактами. Аналогичный характер изменений наблюдается при мощности 90%, однако содержание аминного азота во всех образцах в среднем на 23% ниже, чем при мощности 70%. Дальнейшее увеличение длительности озвучивания при любой мощности приводит к снижению выхода данной группы веществ.

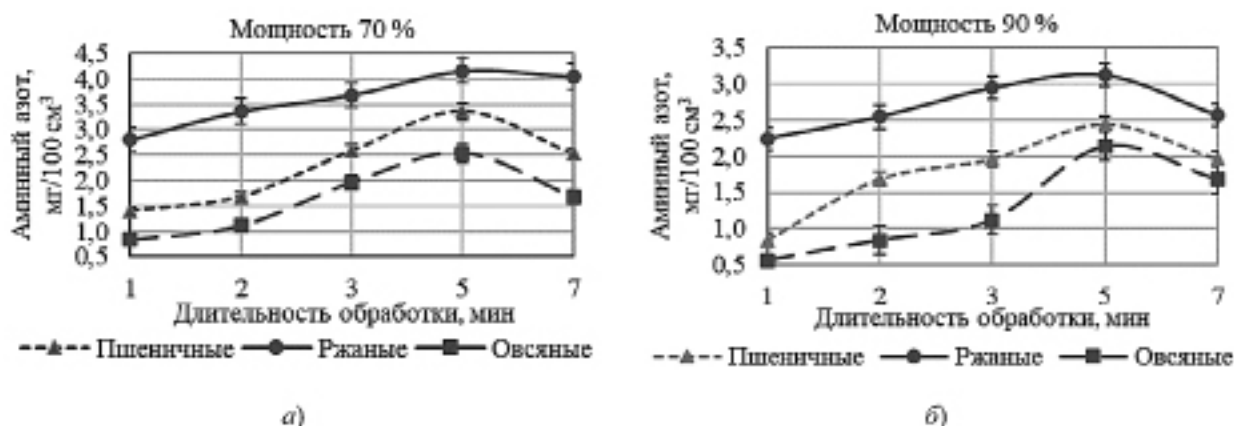
Причина этого связана, возможно, с клейстеризацией крахмала, денатурацией и коагуляцией белков частиц эндосперма и алейронового слоя отрубей за счет высокой температуры (в эксперименте 68–82 °С) при действии УЗ. В результате происходит

забивка каналов для выхода в среду веществ, в том числе аминокислот. Кроме того, аминокислоты могут участвовать в реакции меланоидинообразования, фактором интенсификации которой является повышенная температура обрабатываемой среды.

Изменения в составе отрубных экстрактов обусловлены также явлениями, лежащими в основе действия УЗ, в первую очередь, кавитационными процессами, тепловыми эффектами (повышением температуры), диспергированием частиц сырья, механическим разрушением клеток (Верещагин & Хмелева, 2010; Chemat et al., 2011). В отличие от извлечения экстрактивных веществ методом настаивания (Ульянова с соавт., 2020; Крикунова с соавт., 2022), создаваемые УЗ гидродинамические пульсирующие микропотоки способствуют интенсивной механической деструкции отрубей и активируют процесс влагопоглощения клетками сырья. За счет разрыва молекулярных связей при воздействии УЗ происходит деградация клеточных компонентов — высокомолекулярных углеводов и азотистых веществ. Подтверждением этого в эксперименте является не только увеличение в экстрактах азота аминокислот, но и трансформация окраски растворов в присутствии йода. С увеличением длительности УЗ обработки цвет изменялся от темно-фиолетовой к буро-фиолетовой, и далее бурой, что, очевидно, связано с высвобождением из клеток крахмала и его возможным частичным расщеплением с участием имеющихся эндогенных ферментов (Vitol et al., 2019, Krikunova et al., 2022) до декстринов различной молекулярной массы и сахаров.

Рисунок 2

Влияние длительности обработки отрубей УЗ на содержание аминного азота в экстрактах



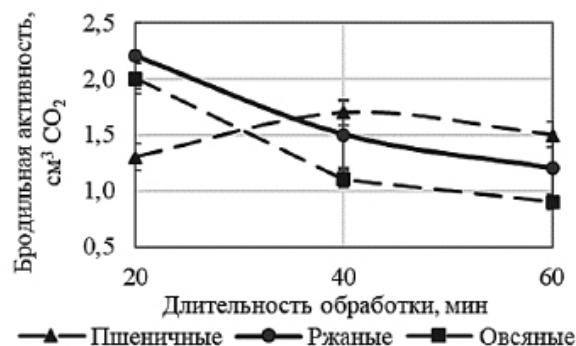
Полученные данные по характеру изменения контролируемых показателей согласуются с результатами других авторов, но осуществлявших эксперимент в иных условиях, чем в представленной работе. Например, для получения кормовой добавки с повышенной усвояемостью из подсолнечного жмыха и молочной сыворотки применяли облучение УЗ с частотой 22 кГц и мощностью 200 Вт в течение 20 минут при температуре $60 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Волончук с соавт., 2022). Для извлечения полифенолов и улучшения в последующем ферментативного катализа овсяных отрубей использовали УЗ воздействие при частоте 35 кГц в течение 30 минут (Зяйнитдинов с соавт., 2020). В случае пшеничных отрубей для экстрагирования некрахмальных полисахаридов озвучание осуществляли при мощности 180 Вт (Wang et al., 2014), для повышения устойчивости сырья к окислительным процессам — 400 Вт в течение 15 мин (Nabuš et al., 2021). Изменение структуры и свойств белка рисовых отрубей наблюдалось после 10 минут действия УЗ при мощности 200 Вт (Wang et al., 2021). В сравнении с приведенными работами в данном исследовании параметры УЗ обработки отрубей при близких значениях частоты и температуры отличаются большей интенсивностью озвучания (10 Вт/см^2) и мощностью (440 Вт и 570 Вт соответственно при 70% и 90% мощности от полной), что обеспечило высокий выход растворимых усвояемых компонентов отрубей при значительно меньшей длительности воздействия (5–7 минут).

Экстракты с максимальным накоплением аминного азота (мощность УЗ 70%, длительность воздействия 5 минут) использовали для обработки дрожжей с целью изучения влияния на ферментативный потенциал культуры. Бродильная активность — технологически важный показатель дрожжей, косвенно характеризующий активность ферментов гликолиза и его подготовительной стадии.

Определение оптимального времени обработки дрожжей полученными экстрактами показало (Рисунок 3) увеличение в значительной степени бродильной активности через 20 минут выдержки клеточной биомассы с экстрактами из овсяных и ржаных отрубей, из пшеничных отрубей — через 40 мин. При этом ферментативная активность дрожжей, суспендированных в овсяном и ржаном экстракте, за весь период обработки в среднем на 35 и 40% выше, чем в пшеничном. Бродильная

Рисунок 3

Влияние длительности обработки дрожжей отрубными экстрактами на бродильную активность



активность дрожжевой культуры после выдержки с отрубными экстрактами, полученными при мощности УЗ 90%, была в среднем на 56% меньше, чем извлеченными при 70%.

Несмотря на то, что овсяные экстракты по абсолютной величине выхода сухих веществ и содержания азота аминокислот уступают экстрактам из других отрубей, они обеспечивают достаточно высокий биокаталитический потенциал дрожжей. Это связано с химическим составом исходного сырья. В сравнении с пшеницей белок овса характеризуется значительным содержанием незаменимых (в частности, лейцина, изолейцина, валина) и серосодержащих (метионина и цистеина) аминокислот, наличием жирных кислот (моно- и полиненасыщенных), высоким содержанием β-глюкана, витаминов группы В (особенно тиамина, ниацина), микроэлементов (преимущественно кремния) (Казаков & Карпиленко, 2005; Chalamacharla et al., 2018; Nemes et al., 2022), что важно с точки зрения стимуляции роста и ферментативной активности дрожжевой культуры (Меледина с соавт., 2013).

Ржаные отруби в отличие от пшеничных содержат повышенное количество фосфора — основного энергетического компонента синтеза микробной массы (Казаков & Карпиленко, 2005; Крикунова с соавт., 2021). Наряду с другими веществами достаточность фосфора в среде культивирования — обязательное условие высокой эффективности размножения дрожжей (Annemuller et al., 2011).

Полученные нами данные по использованию УЗ воздействия для извлечения ценных компонентов

из зерновых отрубей позволяют говорить об эффективности данного способа, что подтверждается значительным накоплением в водных экстрактах усвояемых азотистых соединений за относительно короткий промежуток времени и высокой активностью биокатализаторов дрожжевой культуры после обработки биостимуляторами.

Использование биокатализа для получения экстрактов

Другим приемом извлечения экстрактивных веществ отрубей является биокаталитическое воздействие на сложные компоненты сырья. Водно-отрубные суспензии обрабатывали ферментными препаратами в виде 1%-х растворов в диапазоне от 40 до 120 минут с периодическим отбором проб.

Оценку эффективности процесса вели по количеству редуцирующих веществ (РВ), аминного азота и сухих веществ.

Значимое изменение анализируемых показателей происходит в диапазоне 60–120 минут обработки водно-отрубных суспензий всеми исследуемыми ферментными препаратами (Рисунок 4). Наибольший выход сухих веществ в сравнении с контролем обеспечили препараты Termamyl (в 1,1–4,8 раза) и Ondea pro (в 1,3–6,7 раза) в зависимости от используемых отрубей.

На примере экстракта ржаных отрубей видно (Рисунок 5), что количество аминного азота и редуцирующих веществ возрастает с увеличением времени субстрат-ферментного взаимодействия. Подобная тенденция прослеживается и для других

Рисунок 4

Влияние обработки отрубей ферментными препаратами на выход сухих веществ

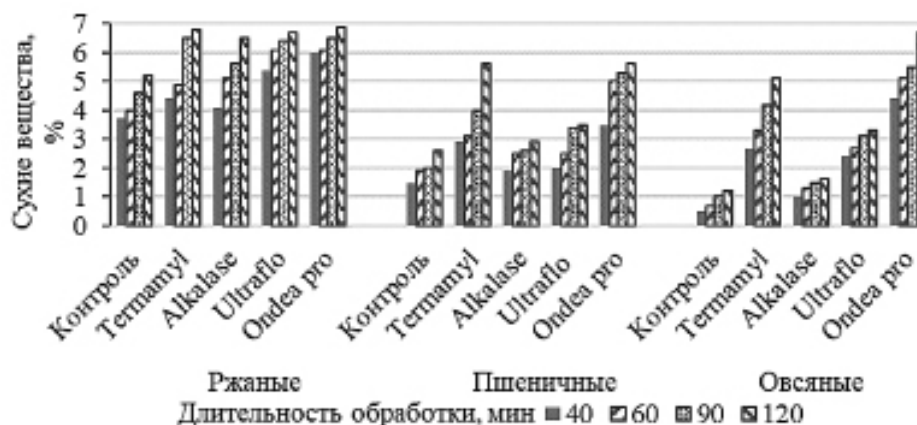


Рисунок 5

Изменение а) аминного азота и б) редуцирующих веществ в ржаных экстрактах в зависимости от длительности обработки ферментными препаратами

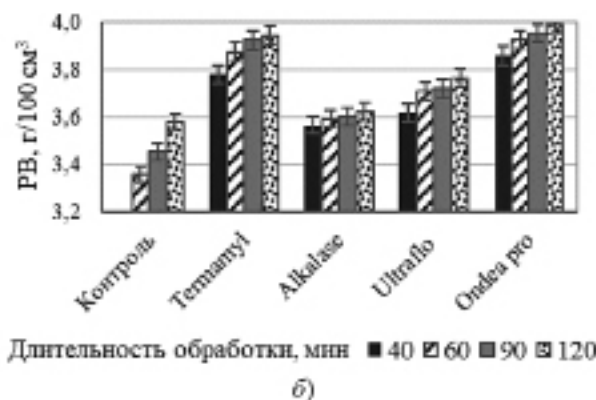
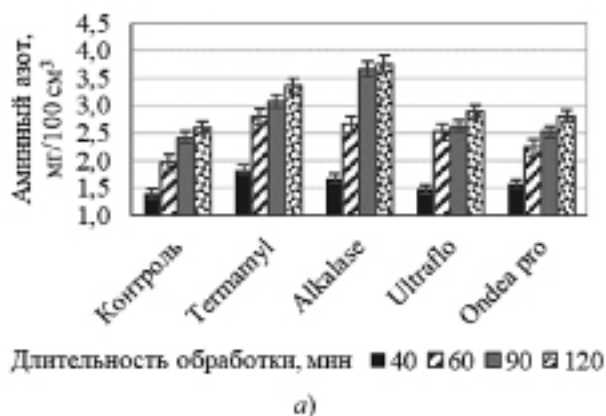
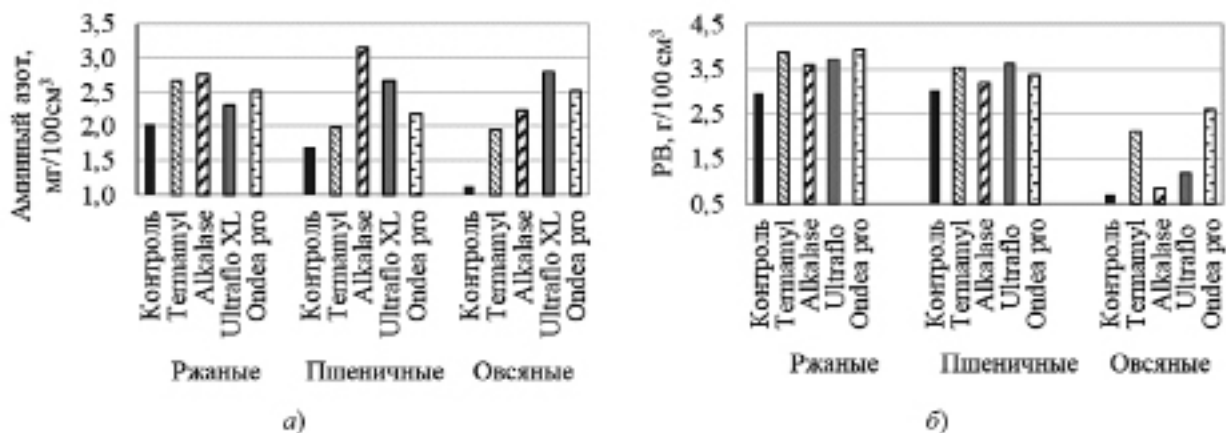


Рисунок 6

Средние значения а) аминокислотного азота и б) редуцирующих веществ в отрубных экстрактах после воздействия ферментными препаратами



видов зерновых отрубей (на Рисунке 6 представлены средние значения показателей за весь период ферментативной обработки). Как и в случае применения физического воздействия (УЗ) на отруби, по абсолютной величине оцениваемых характеристик преимущество у экстрактов ржаных и пшеничных, но по величине прироста к контролю — у овсяных экстрактов.

Большее накопление азота аминокислот в заданных условиях по отношению к контрольному образцу в зависимости от зерновых отрубей обеспечили препараты Alkalase (на 136–200%), Ultraflo XL (на 114–250%), Ondea pro (на 124–225%), редуцирующих веществ — Termamyl (на 117–306%), Ondea pro (на 111–375%), Ultraflo XL (на 120–171%).

Наблюдаемые изменения обусловлены действием соответствующих ферментов. Использование для получения гидролизатов пшеничных и ржаных отрубей мультиэнзимной композиции, включающей, в частности, активности целлюлаз (препарат Агроксил Премиум), протеазы (Нейтраз 0,8L) и фитазы (Агрофит), в течение 4 часов при 50 °С способствовало увеличению концентрации свободных аминокислот в среднем в 1,5–2,0 раза (Krikunova et al., 2023). В настоящем исследовании ферментные препараты способствовали примерно такому же по величине приросту аминокислот за более короткий промежуток времени (90–120 минут), отличаясь при этом индивидуальным применением и составом биокатализаторов. Препараты, содержащие комплекс ферментов разнонаправленного

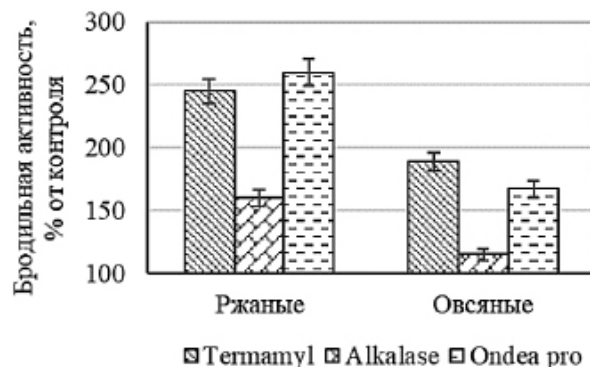
действия (амилолитического, протеолитического, цитолитического), обеспечили большой выход экстракта и его отдельных составляющих.

С учетом вышеприведенных результатов, ржаные и овсяные экстракты, полученные биоконверсией препаратами Alkalase, Termamyl, Ondea pro в течение 90 минут, использовали для оценки влияния на бродильную активность дрожжевой культуры. Длительность выдержки дрожжей с экстрактами 30 минут при температуре 24–26 °С. Контроль — дрожжи без обработки.

Как видно из данных Рисунка 7, более значимый прирост ферментативной активности дрожжей (в среднем в 1,5 раза) обеспечили ржаные экстрак-

Рисунок 7

Влияние экстрактов зерновых отрубей на бродильную активность дрожжей



ты, чем овсяные, при всех прочих равных условиях. Экстракты отрубей после воздействия амилазой Termamyl и комплексом гидролаз Ondea pro существенно увеличили (в 1,7–2,6 раза по отношению к контролю) бродильную активность дрожжевых клеток за счет наличия в достаточном количестве как усвояемых углеводов, так и азотистых соединений. В то же время экстракты, полученные обработкой зернового сырья протеазой препарата Alkalase, с относительно низким содержанием аминного азота показали меньший стимулирующий эффект (в 1,2–1,6 раза) на микробную культуру.

Положительная динамика в изменении бродильной активности дрожжевой культуры обусловлена комплексом веществ, извлеченных разными приемами и вносимых с отрубными экстрактами. Наличие в отрубях биологически активных компонентов (витаминов, минеральных, азотистых веществ), часто являющихся коферментами отдельных биокатализаторов, оказывает благоприятное влияние на различные стороны клеточного метаболизма и жизнеспособность дрожжей. Дополнительное азотистое питание позволяет поддерживать высокую ферментативную активность дрожжевых клеток.

Для активизация физиолого-биохимических функций дрожжевой культуры, компенсации недостатка необходимых клеткам веществ добавление биостимуляторов общепринято в среду ферментации перед введением инокулята (Меледина с соавт., 2013; Пермякова, 2016). В работе (Ковалева с соавт., 2019) на примере использования в производстве спирта нейтральной протеазы (препарат «Пролайв BS Ликвид») и фитазы (препарат «Кингфос»), вносимых на этапе сбраживания зернового сусла, показано увеличение выхода клеточной биомассы, повышение бродильной активности дрожжей в 1,2 раза в сравнении с контролем (без ферментных препаратов). В технологии фруктовых дистиллятов введенные в сусло гидролизаты пшеничных и ржаных отрубей могут служить альтернативным источником азотного и фосфорного питания дрожжей (Krikunova et al., 2023). Нами предложена обработка инокулята экстрактами из зерновых отрубей на этапе предферментационной подготовки, что значительно повысило биокаталитическую активность дрожжевой культуры. Кроме того, необходимо учитывать экономическую целесообразность данного приема: с учетом объема вносимой на брожение разводки дрожжей, требуемое количество биости-

муляторов существенно меньше в сравнении с объемом обогащаемого ферментируемого сусла.

Потребность в пищевых дрожжевых подкормках в различных отраслях бродильной промышленности достаточно высока, и в настоящее время в основном обеспечивается препаратами (причем химического, синтетического происхождения) импортного производства (Пермякова, 2016). Полученные результаты представленного научного исследования по использованию растительного, естественного источника (зерновых отрубей) ценных, биологически важных для дрожжевой культуры соединений даже с необходимостью их извлечения предлагаемыми приемами (УЗ, биокатализаторами) позволят решить проблему импортозамещения данного вида вспомогательных материалов, а также расширить область применения вторичных материальных ресурсов (зерновых отрубей). Установленные рациональные параметры получения экстрактов из пшеничных, ржаных и овсяных отрубей обеспечивают высокий выход компонентов сырья с одновременной интенсификацией процесса.

ВЫВОДЫ

Экстракты зерновых отрубей (предпочтительно ржаных), полученные с применением УЗ (мощность 70%, длительность 5 минут) или ферментных препаратов (Termamyl, Ondea pro, Alkalase, при обработке сырья в течение 60–120 минут), могут использоваться как стимулирующая добавка в среду инкубации или культивирования пивных дрожжей расы W-34/70 с целью повышения биокаталитической активности микробной культуры. Выдержка дрожжей с экстрактами в диапазоне от 20 до 40 минут обеспечивает прирост бродильной активности в 1,3–2,6 раза в зависимости от вида отрубей и способа экстрагирования.

Предферментационная обработка отрубными экстрактами как технологический прием регуляции физиолого-биохимических процессов дрожжей *S. cerevisiae* W-34/70 в дальнейшем должна положительно отразиться на интенсификации азотистого обмена и протеолизе белка. Активированная таким воздействием дрожжевая культура является субстанцией для получения пептидов, обладающих различной биологической активностью.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Пермякова Лариса Викторовна: руководство исследованием, создание рукописи и ее редактирование.

Сергеева Ирина Юрьевна: руководство исследованием, методология.

Короткий Игорь Алексеевич: обеспечение приборной базы.

Лашицкий Сергей Сергеевич: проведение исследования, обработка и верификация данных.

Рябоконева Лариса Алексеевна: проведение исследования, создание черновика рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

- Аманжол, Б., Саидов, А. М., Жангабылова, Н. Д., & Альсеитов, К. С. (2019). Обоснование использования отрубей тонкого помола для повышения питательной ценности пшеничной муки. *Механика и Технологии*, (1), 44–53.
- Верещагин, А. Л., & Хмелева, А. Н. (2010). *Влияние ультразвукового облучения и регуляторов роста на ризогенную активность растительных объектов*. Бийск: Алтайский государственный технический университет.
- Витол, И. С. (2022). Структурно-модифицированные отруби — инновационный продукт глубокой переработки зерна. *Пищевая промышленность*, (5), 27–29. <http://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.008>
- Волончук, С. К., Нициевская, К. Н., & Станкевич, С. В. (2022). Обоснование технологических параметров получения белковых эмульсий из ядра семян подсолнечника. *Ползуновский вестник*, (3), 88–94. <http://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.012>
- Давыденко, С. Г. (2012). Создание и применение нового экспресс-метода оценки качества семенных дрожжей. *Пиво и напитки*, (5), 20–24.
- Зяйнитдинов, Д. Р., Евтеев, А. В., & Банникова, А. В. (2020). Исследование иммобилизации полифенолов овсяных отрубей в комплексные коацерваты сывороточного белка и мальтодекстрина. *Техника и технология пищевых производств*, (3), 460–469. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-460-469>
- Иштуганова, К. В., & Гаричева, А. В. (2021). Гидролитическая активность микроорганизмов пшеничных отрубей и соевого жмыха. *Пищевые системы*, 4(3), 93–97. <http://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-93-97>
- Казаков, Е. Д., & Карпиленко, Г. П. (2005). *Биохимия зерна и хлебопродуктов*. С-Петербург: ГИОРД.
- Калужина, О. Ю., Яковлева, К. С., Кашапова, Р. А., Черненко, Е. Н., Черненко, А. А., & Бодров, А. Ю. (2020). Влияние ультразвука на пивоваренные дрожжи. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 82(1), 103–109. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-103-109>
- Капрельянц, Л. В., & Журлова, Е. Д. (2015). Ферментированные пищевые волокна отрубей — стимулятор роста пробиотических культур. *Зерновые продукты и комбикорма*, (1), 24–28. <https://doi.org/10.15673/2313-478x.60/2015.57227>
- Ковалева, Т. С., Яковлев, А. Н., Агафонов, Г. В., & Яковлева, С. Ф. (2021). Влияние ферментного препарата фитазы на физиологическое состояние дрожжей *S. cerevisiae* в производстве спирта. *Актуальная биотехнология*, (1), 83.
- Крикунова, Л. Н., Дубинина, Е. В., Захаров, М. А., & Лазарева, И. В. (2021). К вопросу оценки минерального состава зерновых отрубей. *Ползуновский вестник*, (2), 27–35. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.004>
- Крикунова, Л. Н., & Дубинина, Е. В. (2022). Инновационное направление использования зерновых отрубей в технологии дистиллятов. *Пищевая промышленность*, (5), 20–22. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.005>
- Крикунова, Л. Н., Дубинина, Е. В., Песчанская, В. А., & Ульянова, Е. В. (2022). Новый вид азотсодержащего сырья для использования в технологии дистиллятов. *Техника и технология пищевых производств*, 52(1), 123–132. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-123-132>
- Лукияничкова, Н. Л., Скрябин, В. А., & Табанюхов, К. А. (2020). Особенности состава отрубей пшеницы и ржи и их роль в профилактике хронических заболеваний человека. *Инновации и продовольственная безопасность*, (4), 41–58. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-30-4-41-58>
- Меледина, Т. В., Васильева, Л. М., & Давыденко, С. Г. (2013). *Физиологическое состояние дрожжей*. СПб.: НИУ ИТМО.
- Моргунова, Н. Л. (2022). Ультразвуковая технология обработки зерновых и зернобобовых культур. *Аграрный научный журнал*, (12), 86–88. <http://doi.org/10.28983/asj.y2022i12pp86-88>
- Пермякова, Л. В. (2016). Классификация стимуляторов жизненной активности дрожжей. *Техника и технология пищевых производств*, 42(3), 46–55.
- Погорелова, Н. А., Гаврилова, Н. Б., Рогачев, Е. А., & Щетинина, Е. М. (2020). Определение эффективности способов конверсии пшеничных отрубей для использования их в технологии продуктов питания. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 48–57. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.228>
- Пономарёва, Е. И., Алёхина, Н. Н., & Скворцова, О. Б. (2020). Изменение пищевой ценности зерна гречихи при проращивании с использованием обработанной ультразвуком воды. Известия вузов. *Пищевая технология*, (1), 30–32. <https://doi.org/26297/0579-3009.2020.1.8>

- Серба, Е. М., Римарева, Л. В., Оверченко, М. Б., Игнатова, Н. И., & Погоржельская, Н. С. (2022). Роль биокализа в технологиях переработки зернового сырья. *Пищевая промышленность*, (5), 13–15. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.003>
- Ульянова, Е. В., Созинова, М. С., & Селина, И. В. (2020). Распределение растворимых форм белковых компонентов зерновых отрубей по фракциям. В *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства* (вып. 22, с. 86–88). Йошкар-Ола: Марийский государственный университет.
- Шарова, Н. Ю., Гаричева, А. В., Свердлова, О. П., Принцева, А. А., Сорокоумов, П. Н., Кулишова, К. Е., & Дзюбенко, В. В. (2023). Изменение липазной активности *Acinetobacter radioresistens* при культивировании на пшеничных отрубях. *Научный журнал Национального исследовательского университета Института точной механики и оптики. Процессы и аппараты пищевых производств*, 55(1), 29–36. <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2023-16-1-29-36>
- Annemuller, G., Manger, H.-J., & Lietz, P. (2011). *The yeast in the brewery*. Berlin: VLB.
- Chalamacharla, R. B., Harsha, K., Sheik, K. B., & Viswanatha, C. K. (2018). Wheat bran-composition and nutritional quality: A review. *Advances in Biotechnology and Microbiology*, 9(1), 21–28. <https://doi.org/10.19080/AIBM.2018.09.555754>
- Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonic Sonochemistry*, 18(4), 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Gavahian, M., Manyatsi, T. S., Morata, A., & Tiwari, B. K. (2022). Ultrasound-assisted production of alcoholic beverages: From fermentation and sterilization to extraction and aging. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, Advance Online Publication*, 21(6), 5243–5271. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13043>
- Görgüç, A., Özer, P., & Yılmaz, F. M. (2020). Simultaneous effect of vacuum and ultrasound assisted enzymatic extraction on the recovery of plant protein and bioactive compounds from sesame bran. *Journal of Food Composition and Analysis*, 87, Article 103424. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103424>
- Habuš, M., Novotni, D., Gregov, M., Mustač, N. C., Voučko, B., & Čurić, D. (2021). High-intensity ultrasound treatment for prolongation of wheat bran oxidative stability. *LWT – Food Science and Technology*, 151, Article 112110. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112110>
- Krikunova, L. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Dubinina, E. V., & Obodeeva, O. N. (2023). Grain bran hydrolysates in the production of fruit distillates. *Foods and Raw Materials*, 11(1), 35–42. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-550>
- Nemes, S. A., C˘alinoiu, L. F., Dulf, F. V., F˘arcas, A. C., & Vodnar, D. C. (2022). Integrated Technology for Cereal Bran Valorization: Perspectives for a Sustainable Industrial Approach. *Antioxidants*, 11(11), Article 2159. <https://doi.org/10.3390/antiox11112159>
- Pasha, I., Ahmad, F., Siddique, Z., & Iqbal, F. (2020). Probing the effect of physical modifications on cereal bran chemistry and antioxidant potential. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 1909–1918. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00438-9>
- Pogorelova, N. A., & Gavrilova, N. B. (2023). Conversion of Wheat Bran into Target Biosynthetic Products. *Food Processing: Techniques and Technology*, 53(1), 49–59. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2414>
- Quoc, L. P. T., & Anh, H. N. Q. (2023). Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Polyscias fruticosa* (L.) Harms root. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 165(1), 58–67. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.1.58-67>
- Rimareva, L. V., Serba, E. M., Overchenko, M. B., Shelekhova, N. V., Ignatova, N. I., & Pavlova, A. A. (2022). Enzyme complexes for activating yeast generation and ethanol fermentation. *Foods and Raw Materials*, 10(1), 127–136. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-1-127-136>
- Shiyan, P., Mudrak, T., Kyrylenko, R., & Kovalchuk, S. (2017). Effect of nitrogen and mineral composition of the high-concentrated wort made from starch-containing raw materials on the cultivation of yeast. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(11), 72–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117357>
- Vitol, I. S., Igoryanova, N. A., & Meleshkina, E. P. (2019). Bioconversion of secondary products of processing of grain cereals crops. *Food systems*, 2(4), 18–24. <http://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-4-18-24>
- Wang, J., Sun, B., Liu, Y., & Zhang, H. (2014). Optimisation of ultrasound-assisted enzymatic extraction of arabinoxylan from wheat bran. *Food Chemistry*, 150, 482–488. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.121>
- Wang, T., Chen, X., Wang, W., Wang, L., Jiang, L., Yu, D., & Xie, F. (2021). Effect of ultrasound on the properties of rice bran protein and its chlorogenic acid complex. *Ultrasonics Sonochemistry*, 79, Article 105758. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105758>

REFERENCES

- Amanzhol, B., Saidov, A. M., Zhangabylova, N. D., & Al'seitov, K. S. (2019). Obosnovanie ispol'zovaniya otrubei tonkogo pomola dlya povysheniya pitatel'noi tsennosti pshenichnoi muki [Substantiation of the use of fine-grounded wheat bran for improving the food value of flour]. *Mekhanika i Tekhnologii* [Mechanics and Technologies], (1), 44–53.
- Davydenko, S. G. (2012). Sozdanie i primeneniye novogo ekspress-metoda otsenki kachestva semennykh drozhzhei [The creation and application of a new rapid method of assessing the quality of the seed yeast]. *Pivo i napitki* [Beer and Drinks], (5), 20–24.
- Ishtuganova, K. V., & Garicheva, A.V. (2021). Gidroliticheskaya aktivnost' mikroorganizmov pshenichnykh otrubei i soevogo zhmykha [Hydrolytic activity of microorganisms of wheat bran and soybean meal]. *Pishchevye sistemy* [Food Systems], 4(3), 93–97. <http://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-93-97>
- Kaluzhina, O. Yu., Yakovleva, K. S., Kashapova, R. A., Chernenkov, E. N., Chernenkova, A. A., & Bodrov, A. Yu. (2020). Vliyanie ul'trazvuka na pivovarenyye drozhzhi [The effect of ultrasound on brewing yeast]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 82(1), 103–109. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-103-109>
- Kaprel'yants, L. V., & Zhurlova, E. D. (2015). Fermentirovannyye pishchevye volokna otrubei — stimulyator rosta probioticheskikh kul'tur [Fermented dietary fibers of bran — a growth stimulator of probiotic crops]. *Zernovyye produkty i kombikorma* [Grain Products and Animal Feed], (1), 24–28. <https://doi.org/10.15673/2313-478x.60/2015.57227>
- Kazakov, E. D., & Karpilenko, G. P. (2005). *Biokhimiya zerna i khleboproduktov* [Biochemistry of grain and bread products]. S-Petersburg: GIORD.
- Kovaleva, T. S., Yakovlev, A. N., Agafonov, G. V., & Yakovleva, S. F. (2021). Vliyanie fermentnogo preparata fitazy na fiziologicheskoe sostoyaniye drozhzhei *S. cerevisiae* v proizvodstve spirta [Effect of the phytase enzyme preparation on the physiological state of the yeast *S. cerevisiae* in the production of alcohol]. *Aktual'naya biotekhnologiya* [Actual Biotechnology], (1), 83.
- Krikunova, L. N., & Dubinina, E. V. (2022). Innovatsionnoye napravleniye ispol'zovaniya zernovykh otrubei v tekhnologii distillyatov [Innovative direction of using grain bran in distillate technology]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], (5), 20–22. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.005>
- Krikunova, L. N., Dubinina, E. V., Peschanskaya, V. A., & Ul'yanova, E. V. (2022). Novyy vid azotsoderzhashchego syr'ya dlya ispol'zovaniya v tekhnologii distillyatov [New Nitrogen-Containing Raw Materials in Distillate Technology]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 52(1), 123–132. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-123-132>
- Krikunova, L. N., Dubinina, E. V., Zakharov, M. A., & Lazareva, I. V. (2021). K voprosu otsenki mineral'nogo sostava zernovykh otrubei [To the question of the grain bran mineral composition evaluation]. *Polzunovskii vestnik* [Polzunovsky Bulletin], (2), 27–35. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.004>
- Luk'yanchikova, N. L., Skryabin, V. A., & Tabanyukhov, K. A. (2020). Osobennosti sostava otrubei pshenitsy i rzhi i ikh rol' v profilaktike khronicheskikh zabolevaniy cheloveka [Peculiarities of the composition of wheat and rye bran and their role in the prevention of chronic diseases of human review]. *Innovatsii i prodovol'stvennaya bezopasnost'* [Innovations and Food Safety], (4), 41–58. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-30-4-41-58>
- Meledina, T. V., Vasil'eva, L. M., & Davydenko, S. G. (2013). *Fiziologicheskoe sostoyaniye drozhzhei* [Physiological state of yeast]. S-Petersburg: NIU ITMO.
- Morgunova, N. L. (2022). Ul'trazvukovaya tekhnologiya obrabotki zernovykh i zernobovovykh kul'tur [Ultrasonic technology processing of grain and leguminous crops]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], (12), 86–88. <http://doi.org/10.28983/asj.y2022i12pp86-88>
- Permyakova, L. V. (2016). Klassifikatsiya stimulyatorov zhiznennoi aktivnosti drozhzhei [Classification of preparations to promote yeast vital activity]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 42(3), 46–55.
- Pogorelova, N. A., Gavrilova, N. B., Rogachev, E. A., & Shchetinina E. M. (2020). Opredeleniye effektivnosti sposobov konversii pshenichnykh otrubei dlya ispol'zovaniya ikh v tekhnologii produktov pitaniya [Determining the effectiveness of wheat bran conversion methods for use in food technology]. *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and Processing of Farm Products], (1), 48–57. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.228>
- Ponomareva, E. I., Alekhina, N. N., & Skvortsova, O. B. (2020). Izmeneniye pishchevoi tsennosti zerna grechikhi pri prorashchivaniy s ispol'zovaniem obrabotannoi ul'trazvukom vody [Changing the nutritional value of buckwheat grains when germination with using ultrasound-treated water]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Food Technology], (1), 30–32. <https://doi.org/26297/0579-3009.2020.1.8>
- Serba, E. M., Rimareva, L. V., Overchenko, M. B., Ignatova, N. I., & Pogorzhel'skaya, N. S. (2022). Rol' biokataliza v tekhnologiyakh pererabotki zernovogo syr'ya [The role of biocatalysis in grain processing technologies]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], (5), 13–15. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.003>
- Sharova, N. Yu., Garicheva, A. V., Sverdlova, O. P., Printseva, A. A., Sorokoumov, P. N., Kulishova, K. E., & Dzyubenko, V. V. (2023). Izmeneniye lipaznoi aktivnosti *Acinetobacter radioresistens* pri kul'tivirovaniy na pshenichnykh otrubiyakh [Changes in lipase activity of *Acinetobacter radioresistens* during cultivation on wheat bran]. *Nauchnyy zhurnal Natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta Instituta tochnoi mekhaniki i optiki. Protssessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Scientific Journal of the

- National Research University Institute of Precision Mechanics and Optics. Processes and devices of food production], 55(1), 29–36. <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2023-16-1-29-36>
- Ul'yanova, E. V., Sozinova, M. S., & Selina, I. V. (2020). Raspreделение rastvorimykh form belkovykh komponentov zernovykh otrubei po fraktsiyam [Distribution of soluble forms of protein components of grain bran by fractions]. In *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaistva* [Actual issues of improving the technology of production and processing of agricultural products]. (vol. 22, pp. 86–88). Ioshkar-Ola: Mariiskii gosudarstvennyi universitet.
- Vereshchagin, A. L., & Khmeleva, A. N. (2010). Vliyaniye ul'trazvukovogo oblucheniya i regulatorov rosta na rizogennuyu aktivnost' rastitel'nykh ob"ektov [Effect of ultrasonic irradiation and growth regulators on the rhizogene activity of plant objects]. Biisk: Altaiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet.
- Vitol, I. S. (2022). Strukturno-modifitsirovannyye otrubi – innovatsionnyi produkt glubokoi pererabotki zerna [Structurally modified bran is an innovative product of deep grain processing]. *Pishcheyaya promyshlennost'* [Food Industry], (5), 27–29. <http://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.008>
- Volonchuk, S. K., Nitsievskaya, K. N., & Stankevich, S. V. (2022). Obosnovaniye tekhnologicheskikh parametrov polucheniya belkovykh emul'sii iz yadra semyan podsolnechnika [Effect of ultrasonic exposure on biochemical composition of sunflower cake and whey suspension]. *Polzunovskii vestnik* [Polzunovsky Bulletin], (3), 88–94. <http://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.012>
- Zyainitdinov, D. R., Evteev, A. V., & Bannikova, A. V. (2020). Issledovaniye immobilizatsii polifenolov ovsyanykh otrubei v kompleksnyye koatservaty syvorotochnogo belka i mal'todekstrina [Immobilization of Oat Bran Polyphenols in Complex Coacervates of Whey Protein and Malthodextrin]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], (3), 460–469. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-460-469>
- Annemuller, G., Manger, H.-J., & Lietz, P. (2011). *The yeast in the brewery*. Berlin: VLB.
- Chalamacharla, R. B., Harsha, K., Sheik, K. B., & Viswanatha, C. K. (2018). Wheat bran-composition and nutritional quality: A review. *Advances in Biotechnology and Microbiology*, 9(1), 21–28. <https://doi.org/10.19080/AIBM.2018.09.555754>
- Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonic Sonochemistry*, 18(4), 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Gavahian, M., Manyatsi, T. S., Morata, A., & Tiwari, B. K. (2022). Ultrasound-assisted production of alcoholic beverages: From fermentation and sterilization to extraction and aging. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, Advance Online Publication*, 21(6), 5243–5271. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13043>
- Görgüç, A., Özer, P., & Yılmaz, F. M. (2020). Simultaneous effect of vacuum and ultrasound assisted enzymatic extraction on the recovery of plant protein and bioactive compounds from sesame bran. *Journal of Food Composition and Analysis*, 87, Article 103424. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103424>
- Habuš, M., Novotni, D., Gregov, M., Mustač, N. C., Voučko, B., & Ćurić, D. (2021). High-intensity ultrasound treatment for prolongation of wheat bran oxidative stability. *LWT – Food Science and Technology*, 151, Article 112110. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112110>
- Krikunova, L. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Dubinina, E. V., & Obodeeva, O. N. (2023). Grain bran hydrolysates in the production of fruit distillates. *Foods and Raw Materials*, 11(1), 35–42. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-550>
- Nemes, S. A., C̃alinoiu, L. F., Dulf, F. V., F̃arcas, A. C., & Vodnar, D. C. (2022). Integrated Technology for Cereal Bran Valorization: Perspectives for a Sustainable Industrial Approach. *Antioxidants*, 11(11), Article 2159. <https://doi.org/10.3390/antiox11112159>
- Pasha, I., Ahmad, F., Siddique, Z., & Iqbal, F. (2020). Probing the effect of physical modifications on cereal bran chemistry and antioxidant potential. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 1909–1918. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00438-9>
- Pogorelova, N. A., & Gavrilova, N. B. (2023). Conversion of Wheat Bran into Target Biosynthetic Products. *Food Processing: Techniques and Technology*, 53(1), 49–59. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2414>
- Quoc, L. P. T., & Anh, H. N. Q. (2023). Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Polyscias fruticosa* (L.) Harms root. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 165(1), 58–67. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.1.58-67>
- Rimareva, L. V., Serba, E. M., Overchenko, M. B., Shelekhova, N. V., Ignatova, N. I., & Pavlova, A. A. (2022). Enzyme complexes for activating yeast generation and ethanol fermentation. *Foods and Raw Materials*, 10(1), 127–136. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-1-127-136>
- Shiyan, P., Mudrak, T., Kyrylenko, R., & Kovalchuk, S. (2017). Effect of nitrogen and mineral composition of the high-concentrated wort made from starch-containing raw materials on the cultivation of yeast. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(11), 72–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117357>
- Vitol, I. S., Igoryanova, N. A., & Meleshkina, E. P. (2019). Bioconversion of secondary products of processing of grain cereals crops. *Food systems*, 2(4), 18–24. <http://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-4-18-24>
- Wang, J., Sun, B., Liu, Y., & Zhang, H. (2014). Optimisation of ultrasound-assisted enzymatic extraction of arabinoxylan from wheat bran. *Food Chemistry*, 150, 482–488. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.121>
- Wang, T., Chen, X., Wang, W., Wang, L., Jiang, L., Yu, D., & Xie, F. (2021). Effect of ultrasound on the properties of rice bran protein and its chlorogenic acid complex. *Ultrasonics Sonochemistry*, 79, Article 105758. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105758>

УДК 664.764:663.14.038.3

Киллерные токсины аскомицетовых дрожжей, подавляющие фитопатогенные грибы *Botrytis cinerea*

В. А. Шагалова¹, М. М. Вустин², Н. Г. Машенцева¹¹ Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)² Биоресурсный центр Всероссийская коллекция промышленных микроорганизмов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – ГосНИИгенетика, Москва, Россия**КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:****Шагалова Валерия Алексеевна**

E-mail: shagalovalira@gmail.com

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:Шагалова, В.А., Вустин, М.М., & Машенцева, Н.Г. (2023). Киллерные токсины, продуцируемые различными видами аскомицетовых дрожжей. Скрининг наиболее активных штаммов против фитопатогенных грибов *Botrytis cinerea*. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 146-162. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.440>**ПОСТУПИЛА:** 05.06.2023**ПРИНЯТА:** 27.07.2023**ОПУБЛИКОВАНА:** 30.07.2023**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-1053.

АННОТАЦИЯ**Введение:** Из года в год растет ущерб, причиняемый патогенными микроорганизмами сельскому хозяйству. Использование пестицидов может негативно сказываться на качестве сырья и здоровье потребителей. Односторонний подход в решении данного вопроса не приводит к положительным результатам. Киллерные токсины (КТ) дрожжей представляют значительный интерес для биотехнологии в качестве препаратов, подавляющих активность патогенов.**Целью** данного исследования является проведение скрининга штаммов аскомицетовых дрожжей из коллекции Национального биоресурсного центра Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт», проявляющих наибольшую киллерную активность по отношению к фитопатогенным грибам вида *Botrytis cinerea*, а также определение факторов, влияющих на ее эффективность.**Материалы и методы:** Определение активности КТ проводилось на тонком агаре на полной дрожжевой среде YPD с добавлением 0,5 мл/л 88% раствора молочной кислоты, pH = 4,5. Значение водородного показателя 4,5 выбрано как оптимальное для большинства исследуемых ранее видов дрожжей. Также проведены тесты при различных значениях pH и температуры. Для поддержания различных температур культивирования дрожжей использовался термостат ТС-1/80 (Смоленское СКТБ СПУ, Смоленск, Россия). Контроль уровня pH производился при помощи индикаторных полосок высокой точности Diversey-MN92110 (Macherey-Nagel, Германия). Для подтверждения видовой принадлежности дрожжей методом микроскопирования использовался микроскоп биологический Микромед 2 (2–20 inf.) (ООО «Наблюдательные приборы», Санкт-Петербург, Россия).**Результаты:** Наибольшие зоны подавления роста *Botrytis cinerea* показаны для штаммов *Schwanniomyces occidentalis* Y1-627, Y-1628, Y-1629, Y-1638, Y-1640, Y-1641, *Metschnikowia pulcherrima* Y-3698. Также небольшие зоны подавления наблюдали у штаммов *Cyberlindnera mrakii* Y-1211, *Wickerhamomyces anomalus* Y-201, Y-3836, Y-4562, Y-1182, *Debaryomyces hansenii* Y-1681. При проведении теста на остальных штаммах действие КТ не выявлено.**Выводы:** В настоящем исследовании обнаружены штаммы киллерных дрожжей из коллекции БРЦ ВКПМ, эффективные против *Botrytis cinerea* F-1006, что имеет потенциальное значение для разработки и использования их в качестве средств биоконтроля.**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

киллерные токсины дрожжей, фунгицидные свойства дрожжей, фитопатогенные грибы.



Killer Toxins of Ascomycete Yeast Suppressing Phytopathogenic Fungi *Botrytis cinerea*

¹ Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russia

² Russian State Collection of Industrial Microorganisms National Bio-Resource Center (BRC VKPM), “Kurchatov Institute” – GOSNIIGENETIKA National Research Center, Moscow, Russia

CORRESPONDENCE:

Valeria A. Shagalova

E-mail: shagalovalira@gmail.com

FOR CITATIONS:

Shagalova, V.A., Vustin, M.M., & Mashentseva, N.G. (2023). Killer Toxins of Ascomycete Yeast Suppressing Phytopathogenic Fungi *Botrytis Cinerea*. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 146-162. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.440>

RECEIVED: 05.06.2023

ACCEPTED: 27.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The work was carried out with the financial support of the state represented by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-1053.

Valeria A. Shagalova¹, Mikhail M. Vustin², Natalia G. Mashentseva¹

ABSTRACT

Background: The problem of contamination of agricultural crops and plant raw materials by spoilage microorganisms is urgent – the damage caused by them to agriculture is growing from year to year. The use of pesticides can negatively affect the quality of raw materials and the health of consumers. A unilateral approach to solving this issue does not lead to positive results. Yeast killer toxins (KT) are of considerable interest for biotechnology as drugs that suppress the activity of pathogens.

Purpose: The purpose of this study is to screen ascomycete yeast strains from the collection of the National Bioresource Center of the All-Russian Collection of Industrial Microorganisms of the Kurchatov Institute Research Center, which exhibit the greatest killer activity in relation to phytopathogenic fungi of the *Botrytis cinerea* species, as well as to determine the factors affecting its effectiveness.

Materials and Methods: KT activity was determined on a thin agar on a full yeast medium YPD with the addition of 0,5 ml / l of 88% lactic acid solution, pH = 4,5. The value of the hydrogen index 4,5 was chosen as optimal for most of the studied yeast species.

Results: The largest growth suppression zones of *Botrytis cinerea* were given by *Schwanniomyces occidentalis* strains Y1-627, Y-1628, Y-1629, Y-1638, Y-1640, Y-1641, *Metschnikowia pulcherrima* Y-3698. Also small suppression zones were observed in *Cyberlindnera mrakii* Y-1211, *Wickerhamomyces anomalus* Y-201, Y-3836, Y-4562, Y-1182, *Debaryomyces hansenii* Y-1681 strains. During the test on the remaining strains, the effect of CT was not revealed.

Conclusion: In this study, it was found that killer yeasts from the collection of the BRC VKPM are effective against *Botrytis cinerea* F-1006, which gives the potential for their development and use as means of biocontrol.

KEYWORDS

yeast killer toxin, fungicidal properties of killer yeast, phytopathogenic fungi



ВВЕДЕНИЕ

В научной литературе в области микробиологии и медицины все чаще упоминается о киллерной активности дрожжей в отношении патогенных грибов. Дрожжи — это одноклеточные организмы, которые широко используются в пищевой промышленности для производства хлеба, пива и вина. Некоторые виды дрожжей проявляют киллерную активность — способность подавлять родственные виды и другие микроорганизмы, в том числе патогенные грибы и бактерии. Дрожжи-киллеры выделяют так называемые киллер-токсины или микоцины, которые подавляют рост или жизнеспособность близлежащих чувствительных клеток микроорганизмов. Предполагается, что токсины являются инструментами для интерференционной конкуренции в различных дрожжевых сообществах (Boynnton, 2019).

С точки зрения биотехнологии, киллерные дрожжи полезны благодаря своей противогрибковой/антимикробной активности (Sheppard & Dikicioglu, 2019). Они могут быть использованы в качестве консервантов для продуктов питания, так как способны предотвратить рост и размножение нежелательных микроорганизмов. Кроме того, КТ дрожжей могут быть применены в качестве альтернативы традиционным антимикотикам для лечения грибковых инфекций, таких как кандидоз, аспергиллез, криптококкоз и другие.

Виноградарство и виноделие во всем мире несут экономические потери из-за гнили гроздей винограда. В основном за появление гнили на винограде ответственны мицелиальные грибы, наиболее распространенным из которых является *Botrytis cinerea* (серая плесень). Короткие пептиды дрожжей ингибируют развитие чувствительных клеток,

воздействуя на основные компоненты клеточной стенки грибов.

Использование киллерных дрожжей может иметь большое практическое значение для сельского хозяйства, пищевой промышленности и медицины. **Цель исследования** — провести скрининг штаммов аскомицетовых дрожжей, обладающих киллерной активностью, из коллекции Национального биоресурсного центра Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» и отобрать наиболее активные по отношению к фитопатогенным грибам *Botrytis cinerea*.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Дрожжи-убийцы распространены в окружающей среде повсеместно. Они были обнаружены на всех континентах, включая Антарктиду. Однако природные штаммы изучены слабо по сравнению с лабораторными образцами. Кроме того, КТ могут выполнять функции, выходящие за рамки использования их в конкурентной борьбе (Becker & Schmitt, 2017).

Открытие пивоваренных штаммов *Saccharomyces cerevisiae*, выделяющих токсин, в середине шестидесятых годов прошлого века положило начало интенсивным исследованиям в области вирусологии дрожжей. К настоящему времени идентифицированы четыре различных токсина-убийцы *S. cerevisiae* (K28, K1, K2 и Klus), кодируемые цитоплазматическими двухцепочечными РНК-содержащими вирусами семейства *Totiviridae* (Sheppard & Dikicioglu, 2019). Список известных дрожжей-продуцентов токсинов постоянно пополняется (Таблица 1). С мо-

Таблица 1

Дрожжи, продуцирующие КТ, и некоторые свойства токсинов

Продуцент	Молекулярная масса	Оптимальное значение температуры культивирования	Локализация гена
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	K28 (37,6 кДа), K1 (19 кДа), K2 (38,7 кДа)	60 °С	дцРНК вирусоподобных частиц
<i>Wickerhamomyces anomalus</i>	47,0 кДа	40 °С	Хромосомная ДНК
<i>Pichia farinosa</i>	14,0 кДа	16 °С	Хромосомная ДНК
<i>Pichia membranifaciens</i>	8 кДа	Неизвестно	дцДНК плаزمида

Окончание Таблицы 1

Продуцент	Молекулярная масса	Оптимальное значение температуры культивирования	Локализация гена
<i>Williopsis saturnus</i>	11,0 кДа	16 °С	Хромосомная ДНК
<i>Kluyveromyces lactis</i>	(99 кДа), (30 кДа) и (27,5 кДа) субъединицы	Неизвестно	Линейная плаزمиды рGKL1
<i>Debaryomyces hansenii</i>	23 кДа	20 °С	Хромосомная ДНК
<i>Hansenula mrakii</i>	10,7 кДа	60 °С	Хромосомная ДНК
<i>Schwanniomyces occidentalis</i>	7,4 и 4,9 кДа	40 °С	Неизвестно

Примечание. Из «Yeast killer toxins, molecular mechanisms of their action and their applications», by G. L. Liu, Z. Chi, G. Y. Wang, Z. P. Wang, Y. Li, Z. M. Chi, 2015, *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(2), 222–234 (<https://doi.org/10.3109/07388551.2013.833582>). Copyright 2015 by Informa UK Limited.

мента открытия штаммов *Saccharomyces cerevisiae*, способных секретировать внеклеточные токсины, было получено много информации, существенно расширяющей знания по фундаментальным аспектам клеточной биологии и генетики дрожжей.

Дрожжи могут обладать дополнительной генетической информацией в виде цитоплазматических линейных молекул дцДНК, называемых вирусоподобными элементами. Некоторые из них кодируют токсины-убийцы. Известно о распространенности таких элементов в дрожжах *Debaryomyces hansenii*, депонированных в коллекциях культур, а также в штаммах, выделенных из голубых сыров (Połomska et al., 2021). КТ дрожжей *Metschnikowia pulcherrima* были протестированы против трех широко распространенных микроорганизмов: *Escherichia coli*, *Micrococcus luteus* и *Candida albicans*. Токсин-убийца проявлял ингибирующую активность только в отношении *M. luteus* (De Lima et al., 2013).

На примере дрожжей *Pichia membranifaciens* были описаны два токсина — РМКТ и РМКТ2. Они представляли собой белки с низкой молекулярной массой, которые связывались с первичными рецепторами, расположенными в структуре клеточной стенки чувствительных штаммов дрожжей — линейными (1 → 6)-β-d-глюканами и маннопротеинами для РМКТ и РМКТ2 соответственно. Было предложено несколько применений для микоцинов *P. membranifaciens*, начиная от биоконтроля патогенов растений до и после сбора урожая и заканчивая применением во время ферментации и выдержки вина (ингибирование *Botrytis cinerea*, *Brettanomyces bruxellensis* и др.) (Büyüksirt & Kuleaşan, 2022). Также Belda с соавторами в 2017 году было проанализи-

зировано в общей сложности 580 штаммов дрожжей, выделенных на бразильского штата Сеара, которые были оценены согласно способности продуцировать КТ. Из них для 29 штаммов установлен положительный результат на фенотип киллера. Пять штаммов дрожжей обеспечили значительное снижение роста мицелия и прорастания конидий *Colletotrichum gloeosporioides in vitro*. Так, дрожжи *Meyerozyma guilliermondii* были способны снижать рост мицелия грибов на твердой среде (картофельно-декстрозный агар, PDA) на 60% и блокировать на 100% прорастание конидий на жидкой среде (картофельно-декстрозный бульон, PDB) (Belda et al., 2017).

Дрожжи *Wickerhamomyces anomalus* способны продуцировать микоцины с высоким содержанием антимикробных веществ, поскольку даже при высоких разведениях они ингибировали *Acinetobacter baumannii*. В твердой среде можно было наблюдать ингибирование *A. baumannii*, вызванное диффузией КТ в агаре. Наконец, супернатанты не были цитотоксичными при тестировании на эритроцитах человека. Согласно полученным данным, микоцины *W. anomalus* оказались эффективными при разработке новых противомикробных веществ (Mazzucco et al., 2019).

Дрожжи *Wickerhamomyces anomalus* играют важную роль в борьбе с патогенными дрожжами и бактериями в пищевой промышленности (Muccilli et al., 2013). Установлен штамм *Wickerhamomyces anomalus* VKM Y-159, продуцирующий два типа токсина, обозначенных как WAKT a и WAKT b, кодируемых хромосомными генами. Токсин WAKT a термостойкий, чувствительный к проназе, активен в ди-

апазоне рН 3–4, действует на несколько дрожжей, включая патогенные виды *Candida*, в то время как токсин WAKT b устойчив к протеазам и термостабилен, действует в диапазоне рН 3–7 на два вида дрожжей, *Candida alai* и *Candida norvegica*. Быстрое уменьшение количества жизнеспособных клеток после обработки токсином демонстрирует, что оба токсина обладают цитолитическим действием (Farkas et al., 2012).

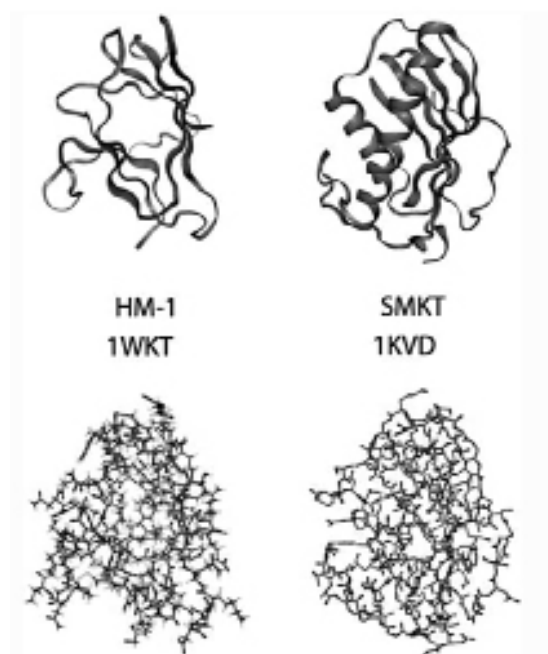
Немалый интерес представляет антагонистическая активность *Williopsis saturnus*. В качестве альтернативного решения для предотвращения роста плесени была разработана противогрибковая пищевая пленка на основе концентрата сывороточного протеина путем включения в нее *Williopsis saturnus* var. *saturnus* (0, 3, 7 и 9 КОЕ/см²). Противогрибковые свойства пленок против *Penicillium expansum* и *Aspergillus niger* были проанализированы с использованием метода дисковой диффузии (Karabulut & Cagri-Mehmetoglu, 2018).

Разнообразие киллерных токсинов дрожжей

КТ дрожжей представляют собой довольно разнородную группу белков. Предполагается, что они неоднократно и независимо возникали в ходе эволюции дрожжей. Со структурной точки зрения токсины-убийцы могут быть сгруппированы в три различных класса: небольшие белки с одной субъединицей, (гетеро-) димерные белки и мультимерные белковые комплексы. Для некоторых КТ были определены трехмерные структуры и наблюдались разнообразные паттерны сворачивания. Например, токсин НМ-1 *Cyberlindnera mrakii* (ранее известный как *Hansenula mrakii*) и SMKT *Millerozyta farinosa* (ранее известный как *Pichia farinosa*) представляли собой небольшие основные белки (<20 кДа), но структурно они, как оказалось, имеют совершенно разные схемы сворачивания. НМ-1 демонстрирует полностью β-складчатую структуру, подобную кристаллинам хрусталика глаза, тогда как SMKT представляет собой белок из двух субъединиц с участками α-спиралей и β-складчатых структур. Общей чертой является наличие большого количества внутримолекулярных дисульфидных связей (Рисунок 1), которые, вероятно, способствуют чрезвычайной термо- и рН-стабильности, характерной для некоторых токсинов, в частности НМ-1 (Klassen et al., 2017).

Рисунок 1

Трехмерные структуры основных токсинов-киллеров НМ-1 и SMKT



Примечание: вверху: модели 1WKT и 1KVD из банка данных белков. Внизу: «проволочное» изображение тех же структур. Изображения были сгенерированы с помощью средства просмотра NGL (WebGL).

Из «Antagonistic Interactions and Killer Yeasts, by R. Klassen, R. Schaffrath, P. Buzzini, P. F. Ganter, 2017, *Yeasts in natural ecosystems: Ecology* (pp. 229–275) (https://doi.org/10.1007/978-3-319-61575-2_9). Copyright 2017 by Springer.

Механизм действия микоцинов и их химическая природа

Существуют первичный и вторичный типы рецепторов к КТ. Первичный обычно располагается на клеточной стенке, а вторичный — на плазматической мембране (Liu et al., 2017).

Первичные рецепторы

Основными компонентами клеточной стенки дрожжей являются (1,3)-β-D-глюкан, (1,6)-β-D-глюкан, маннопротеины и хитин. Известно, что некоторые компоненты клеточных стенок могут быть рецепторами токсина (Liu et al., 2017).

Вторичные рецепторы

После связывания с первичным рецептором в клеточной стенке чувствительных клеток КТ транслоцируется на вторичные рецепторы, локализованные в плазматической мембране, что является энергозависимой стадией. Обычно КТ, например зиготин, имеют катионный суммарный заряд, в то время как плазматическая мембрана чувствительных клеток заряжена отрицательно. В связи с этим КТ могут обладать сродством к вторичным рецепторам, что облегчает адсорбцию токсина на мембране-мишени чувствительных клеток.

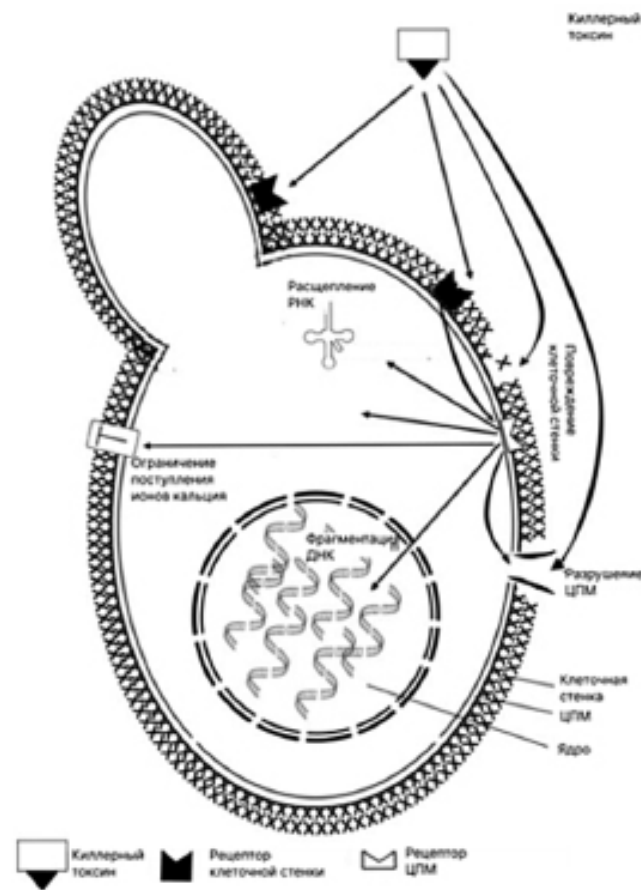
Считается, что КТ убивают чувствительные к ним клетки посредством различных механизмов, таких как ингибирование репликации ДНК, индукция изменений проницаемости мембран, остановка клеточного цикла в фазе G1 и другие (Рисунок 2). Более того, в некоторых случаях токсин может нарушать синтез клеточной стенки путем ингибирования β -1,3-глюкансинтазы или путем гидролиза основных компонентов клеточной стенки в чувствительных клетках (Liu et al., 2015). Так, K28 представляет собой уникальный пример вирусного токсина, продуцируемого инфицированными дрожжами, который проникает в чувствительную клетку путем рецептор-опосредованного эндоцитоза и достигает своей внутриклеточной мишени (мишеней) (Santos et al., 2002; Santos et al., 2007).

Выявлено, что токсин *Debaryomyces hansenii* в основном адсорбируется (1 → 6)- β -D-глюканами. Этот низкомолекулярный белок, вероятно, кодируется хромосомными генами. Данное исследование является первым, в котором идентифицировано место связывания промышленно значимого КТ с клеточной стенкой (Santos et al., 2007).

Также показано, что РМКТ (каналообразующий КТ, выделяемый *Pichia membranifaciens*) обладал антимикробной активностью в отношении дрожжей и мицелиальных грибов (Santos & Marquina, 2011; Hicks et al., 2021).

Рисунок 2

Механизм действия киллерных токсинов



Примечание: Из «Yeast killer toxins, molecular mechanisms of their action and their applications», by G. L. Liu, Z. Chi, G. Y. Wang, Z. P. Wang, Y. Li, Z. M. Chi, 2015, *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(2), 222–234 (<https://doi.org/10.3109/07388551.2013.833582>). Copyright 2015 by Taylor & Francis.

Влияние pH на активность токсинов

Многие исследования указывают на то, что значительное влияние на результаты тестов оказывает водородный показатель среды. Наибольшая активность продуцируемых дрожжами токсинов наблюдается в узком диапазоне pH (4,5–6 ед.) (Таблица 2).

Опыты проводили в широком диапазоне температур и активной кислотности среды, оказывающих сильное влияние на определение фенотипа киллера. Предварительный скрининг дрожжей проводили на газонах *S. cerevisiae* АН22 (обычно используемых в качестве чувствительного к киллерам штамма) при значении pH 4,6, когда активно боль-

Таблица 2

Активность некоторых киллерных дрожжей при различных значениях pH

Видовое название микроорганизма	Значения pH				
	4,5	5	5,5	6	6,5
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	+	-	-	-	-
<i>Metschnikowia pulcherrima</i>	-	+	-	-	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i>	+	-	-	-	-
<i>Candida valida</i>	+	+	-	-	-
<i>Pichia membranifaciens</i>	+	-	-	-	-
<i>Debaryomyces hansenii</i>	+	-	-	-	-
<i>Schwanniomyces occidentalis</i>	+	-	-	-	-
<i>Kluyveromyces wickerhamii</i>	+	-	-	-	-
<i>Kluyveromyces lactis</i>	+	-	-	-	-
<i>Kluyveromyces marxianus</i>	+	-	-	-	-
<i>Kluyveromyces drosophilorum</i>	+	-	-	-	-
<i>Cyberlindera mrakii</i>	+	-	-	-	+
<i>Cyberlindera saturnus</i>	+	-	-	-	-

Примечание. «+» – высокая активность токсина, «-» – низкая активность или ее отсутствие.

Из «Yeast killer toxins, molecular mechanisms of their action and their applications», by G. L. Liu, Z. Chi, G. Y. Wang, Z. P. Wang, Y. Li, Z. M. Chi, 2015, *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(2), 222–234 (<https://doi.org/10.3109/07388551.2013.833582>). Copyright 2015 by Taylor & Francis; «The oleaginous yeast *Metschnikowia pulcherrima* displays killer activity against avian-derived pathogenic bacteria», by R. H. Hicks, M. Moreno-Beltrán, D. Gore-Lloyd, C. J. Chuck, D. A. Henk, 2021, *Biology*, 10(12), Article 1227 (<https://doi.org/10.3390/biology10121227>). Copyright 2021 by MDPI; «The biology of *Pichia membranifaciens* killer toxins», by I. Belda, J. Ruiz, A. Alonso, D. Marquin, A. Santos, 2017, *Toxins*, 9(4), Article 112 (<https://doi.org/10.3390/toxins9040112>). Copyright 2017 by MDPI; «*Kluyveromyces wickerhamii* killer toxin: Purification and activity towards *brettanomyces/dekkera* yeasts in grape must», by F. Comitini, M. Ciani, 2011, *FEMS Microbiology Letters*, 316(1), 77–82 (<https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2010.02194.x>). Copyright 2011 by MDPI; «Immuno-crossreactivity of an anti-*Pichia anomala* killer toxin monoclonal antibody with a *Williopsis saturnus* var. *mrakii* killer toxin», by C. Guyard, P. Evrard, A. M. Corbisier-Colson, H. Louvart, E. Dei-Cas, F. D. Menozzi, L. Polonelli, J. Cailliez, 2001, *Medical Mycology*, 39(5), 395–400 (<https://doi.org/10.1080/mmy.39.5.395.400>). Copyright 2001 by MDPI; «*Williopsis saturnus* yeast killer toxin does not kill *Streptococcus pneumoniae*», by I. Ochigava, P. J. Collier, G. M. Walker, R. Hakenbeck, 2011, *Antonie van Leeuwenhoek*, 99(3), 559–566 (<https://doi.org/10.1007/s10482-010-9524-3>). Copyright 2011 by MDPI; «Killer toxins of *Candida utilis* 22 and *Kluyveromyces marxianus* and their potential applications as biocontrol agents», by M. A. Sanaa, M. H. Zeineb, M. I. Fatma, S. Z. Sanaa, 2015, *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 25(2), 317–325. Copyright 2015 by MDPI.

шинство зарегистрированных киллерных дрожжей (Banjara et al., 2016; Conti et al., 1998).

Была обнаружена взаимосвязь между чувствительным штаммом и оптимальным pH для проявления киллерной активности. Примером является изолят *Pichia anomala* A5, оптимальный pH которого составлял 4,2 для *Saccharomyces cerevisiae*, 5,0 для *Rhodotorula sloffiae* и 4,2–4,6 для *Candida albicans* (Chen & Chou, 2017; De Ullivarri et al., 2020; Dlamini et al., 2008).

Согласно данным литературы, большинство токсинов стабильны и действуют только при кислых

значениях pH и низких температурах, например, при pH = 4,0. Оптимальная киллерная активность КТ, продуцируемого *Pichia membranifaciens* СУС 1106, наблюдалась при температуре до 20 °С, а киллерная активность была выше в кислой среде. Выше pH 4,5 активность резко снижалась и была едва заметна при pH 6,0. Оба КТ Kwkt из *K. wickerhamii* и Pikt из *W. anomalus* сохраняли свою активность в диапазоне pH, совместимом с условиями производства вина. Более того, Pikt оказался более устойчив при повышенной температуре (35 °С), чем Kwkt. Фунгицидное действие, оказываемое Pikt и Kwkt против *Dekkera bruxellensis* в вине, сохраняется не менее 10 дней. Таким обра-

зом, эти два КТ имеют потенциальное применение при выдержке и хранении вина.

Сообщается, что *Debaryomyces hansenii* продуцирует микоцины, эффективные против других видов дрожжей. Изоляты *D. hansenii* были получены из 22 сыров и оценены на киллерную активность в отношении *Candida albicans* и *Candida tropicalis* в широком диапазоне температур и значений pH. Для 23 штаммов показана киллерная активность как против *C. albicans*, так и *C. tropicalis*, которая зависела от pH и температуры. Ни у одного штамма не наблюдалась киллерная активность при $\text{pH} \geq 6,5$ или температуре $\geq 35^\circ\text{C}$ (физиологические условия в желудочно-кишечном тракте человека) (Banjara et al., 2017).

Однако наиболее стабильными являются КТ *Hansenula mrakii* (стабильны при pH 2,0–11,0 и не денатурируют после нагревания при 60°C в течение 1 ч) и *Hansenula saturnus* (устойчивы при pH 3,0–11,0 и сохраняют стабильность на 75% при 80°C в течение 1 ч). КТ *Tilletiopsis albescens* стабилен в интервале активной кислотности от 3,5 до 8,0 ед. pH. Убивающая активность очищенного КТ, продуцируемого *Kluveromyces siamensis* HN12–1, в отношении дрожжей *Metschnikowia bicuspidata* WCY была самой высокой при инкубации при 25°C и pH 4,0 (Liu et al., 2015; Baeza et al., 2008).

Область применения

Киллерный феномен широко распространен среди дрожжей, и на сегодняшний день описано около 100 видов дрожжей с таким фенотипом. В спектр действия вырабатываемых ими КТ часто попадают и патогенные микроорганизмы. Таким образом, они обладают потенциалом в качестве природных противомикробных препаратов в пищевых продуктах и для биологической борьбы с патогенами растений, а также терапевтических средств против инфекций животных и человека. Несмотря на широкий спектр возможных областей применения, их использование на промышленном уровне все еще находится в зачаточном состоянии (Mannazzu et al., 2019).

Порча вина, связанная с *Brettanomyces bruxellensis*, является серьезной проблемой для виноделов. Поэтому чрезвычайно важен эффективный и на-

дежный метод контроля размножения этих дрожжей. Текущее исследование было сосредоточено на выявлении и характеристике токсинов-убийц, которые являются противомикробными соединениями, обладающими потенциалом подавления *B. bruxellensis* в вине. Были идентифицированы и частично охарактеризованы два КТ (CpKT1 и CpKT2), выделенные из винных дрожжей *Candida pyralidae* (Mehlomakulu et al., 2014).

Антагонистические эффекты *Debaryomyces hansenii* KI2a, *D. hansenii* MI1a и *Wickerhamomyces anomalus* BS91 были протестированы против *Monilinia fructigena* и *Monilinia fructicola* в исследованиях *in vitro* и *in vivo*. Антагонистические штаммы *D. hansenii* и *W. anomalus* могут быть предложены в качестве активных ингредиентов для разработки биофунгицидов против видов *Monilinia*, которые являются причиной значительных экономических потерь косточковых культур (Grzegorzczuk et al., 2016).

КТ, вырабатываемый дрожжами *Metschnikowia pulcherrima*, был очищен и добавлен в готовые к приготовлению мясные полуфабрикаты для повышения их микробиологической безопасности и продления срока годности. Добавление ингибирующего соединения в фарш снижало общее количество аэробных мезофильных бактерий, дрожжей и плесневых грибов, а также молочнокислых бактерий (Büyüksırt & Kuleaşan, 2021).

Рассматриваются возможные последствия применения феномена дрожжевых киллеров в борьбе с инфекционными заболеваниями. Особый упор делается на некоторые токсины-киллеры широкого спектра действия (KTS), продуцируемые *Wickerhamomyces anomalus* и другими родственными видами. Перспектива применения этих КТ в области медицины представлена с учетом:

- (1) прямого использования штаммов-киллеров, в частности, для симбиотической борьбы с болезнями, переносимыми членистоногими;
- (2) прямого использования КТ в качестве экспериментальных терапевтических агентов;
- (3) производство через идиотипическую сеть иммунологических производных КТs и их использование в качестве потенциальных противоиных инфекционных терапевтических средств.

Также описаны исследования иммунологических производных КТ в контексте разработки вакцины (Giovati et al., 2021).

Помимо прочего штаммы *W. anomalus*, способные продуцировать КТ, называемые «дрожжами-убийцами», обладают высокой конкурентоспособностью в окружающей среде. Разнообразные штаммы *W. anomalus* были выделены из различных местообитаний, в том числе из насекомых. Дрожжи, ассоциированные с комарами, обладают антимикробной активностью, что делает эти дрожжи достойными дальнейших исследований, учитывая их потенциал в качестве средства симбиотической борьбы с малярией (Carpelli et al., 2014).

Kpкт — это токсин-убийца дрожжей, вырабатываемый естественным путем *Tetrapisispora phaffii*, который может найти применение в виноделии благодаря своей антимикробной активности в отношении связанных с вином дрожжей, включая *Kloeckera/Hanseniaspora*, *Saccharomyces* и *Zygosaccharomyces*. Ген, кодирующий Kpкт, был экспрессирован в *Komagataella phaffii* (ранее *Pichia pastoris*), что является основой биореакторного производства рекомбинантного токсина rKpкт. Для получения готового к применению препарата rKpкт бесклеточный супернатант рекомбинантного клона-убийцы *K. phaffii* концентрировали в 80 раз и лиофилизировали. Полученный препарат легко растворялся в стерильной дистиллированной воде и сохранял свою убийственную активность до шести месяцев при температуре 4 °С. При добавлении в виноградное сусло он оказывал летальное действие на дикие винные дрожжи, одновременно являясь совместимым с ферментативной активностью закваски на основе штаммов *Saccharomyces cerevisiae*. Кроме того, препарат оказывал сильное бактерицидное действие на различные виды бактерий, включая молочнокислые бактерии и патогены, значимые для пищевой промышленности. Напротив, он не оказал летального действия на мицелиальные грибы и два вида насекомых (*Ceratitis capitata* и *Musca domestica*), которые могут служить моделью для биомедицинских исследований. Так, производство в биореакторах и лиофилизация представляют собой перспективный вариант использования этого КТ, который может найти применение для борьбы с микробными загрязнениями в винодельческой и пищевой промышленности (Carboni et al., 2020).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты

Исследовались ранее отобранные наиболее активные штаммы различных видов дрожжей-продуцентов КТ из коллекции БРЦ ВКПМ (Таблица 3).

Таблица 3

Киллерные штаммы дрожжей

Видовое название	Номер штамма
<i>Metschnikowia pulcherrima</i>	Y-735, Y-3698
<i>Wickerhamomyces anomalus</i>	Y-736, Y-737, Y-738, Y-201, Y-1006
<i>Pichia membranifaciens</i>	Y-835
<i>Debaryomyces hansenii</i>	Y-1682, Y-1683, Y-1681
<i>Schwanniomyces vanrijiae</i>	Y-1170
<i>Schwanniomyces occidentalis</i>	Y-1627, Y-1628, Y-1629, Y-1638, Y-1639, Y-1640, Y-1641
<i>Cyberlindnera mrakii</i>	Y-1209, Y-1211

В качестве тест-культуры для изучения действия КТ дрожжей на фитопатогенные грибы был использован плесневый гриб *Botrytis cinerea* F-1006 — возбудитель «серой гнили» многих сельскохозяйственных культур (Bi et al., 2023).

Материалы

Для культивирования дрожжей при различных температурах использовался термостат ТС-1/80 (Смоленское СКТБ СПУ, Смоленск, Россия). Определение значений pH производился при помощи индикаторных полосок высокой точности Diversey-MN92110 (Macherey-Nagel, Германия). Для подтверждения видовой принадлежности дрожжей методом микроскопирования использовался микроскоп биологический Микромед 2 (2–20 inf.) (ООО «Наблюдательные приборы», Санкт-Петербург, Россия).

Методы

Определение активности КТ проводили на тонком агаре на полной дрожжевой среде YPD (г/1000 см³: пептон — 10,0, глюкоза — 20,0, дрожжевой экстракт — 5,0, агар-агар — 20,0, дистиллированная вода — 1000 см³) с добавлением 88 % раствора молочной кислоты в количестве 2,0 см³ на 1 000 см³, рН = 4,5. Значение водородного показателя 4,5 выбрано как оптимальное для большинства исследуемых видов дрожжей.

В качестве тест-культур при отборе лучших по уровню киллерной активности штаммов использовали сверхчувствительные ко многим КТ культуры дрожжей *Candida nitratophila* ВКПМ Y-2123 и *Candida tenuis* ВКПМ Y-739.

Грибы *Botrytis cinerea* F-1006 перед проведением теста культивировали на среде YPD в течение 120 ч.

Максимальное значение продуцируемого КТ у всех дрожжей наблюдалось в экспоненциальной фазе роста дрожжей и соответствовало возрасту суточной культуры.

Тест на определение оптимального значения рН для продуцирования КТ проводили на среде YPD на основе цитратно-фосфатного буфера. Раствор цитрата с концентрацией 0,1 М и раствор фосфата натрия смешивали в разных отношениях для получения активной кислотности среды, равной 4; 4,4; 5 и 5,5 ед. рН.

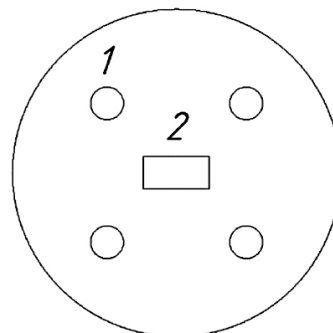
Процедура

На агаризованную полную дрожжевую среду YPD в центре чашки Петри помещали часть биомассы микроскопического гриба, взятой вместе с агаром. После этого бляшками (5 мм) наносили суточную биомассу киллерных дрожжей, равноудаленных от тест-культуры примерно на 2 см. Расположение образцов схематично представлено на Рисунке 3.

Культивирование проводили в течение 120 ч при температуре 30 °С. По окончании культивирования отмечали наличие или отсутствие киллерной активности по появлению или отсутствию зон подавления роста, диаметр которых коррелировал с киллерной активностью исследуемого штамма.

Рисунок 3

Схема распределения образцов на чашке Петри



Примечание: 1 – биомасса дрожжей-продуцентов КТ, 2 – тест-культура

Для выявления благоприятных условий для синтеза КТ были проведены тесты на чувствительность при различных значениях рН (4/4,5/5/5,5) и температуры (15 °С/20 °С/25 °С/30 °С).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

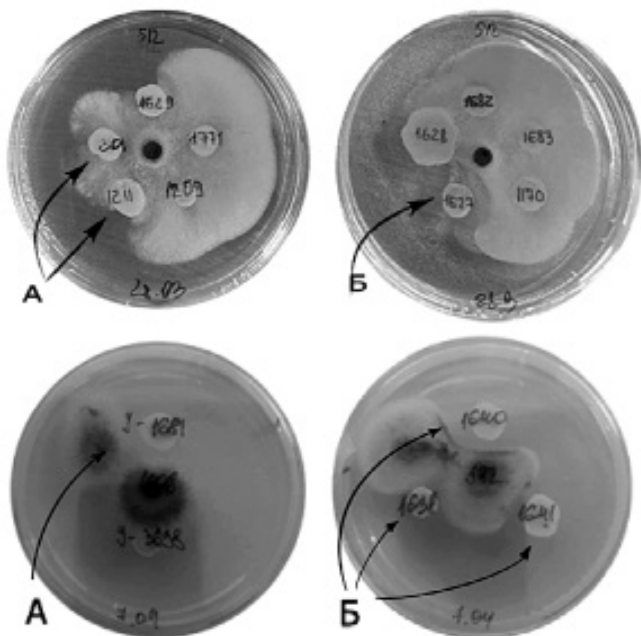
Было обнаружено, что часть штаммов образовывала отчетливые зоны просветления, указывающие на разрушение клеток и цидный эффект. Часть штаммов образовывала вокруг себя зоны неполного подавления роста грибной культуры, что обусловлено статическим эффектом КТ конкретного штамма.

Наибольшие зоны полного подавления роста *Botrytis cinerea* выявлены для штаммов *Schwanniomyces occidentalis* Y-1627, Y-1628, Y-1629, Y-1638, Y-1640, Y-1641 и *Metschnikowia pulcherrima* Y-3698. Небольшие зоны подавления роста наблюдали у *Cyberlindnera mrakii* Y-1211, *Wickerhamomyces anomalus* Y-201, Y-3836, Y-4562, Y-1182 и *Debaryomyces hansenii* Y-1681. При проведении теста на остальных штаммах действие КТ не выявлено (Рисунок 4).

При исследовании влияния рН на продуцирование дрожжами КТ установлено, что значение рН 4,5 является оптимальным для большинства продуцентов КТ (Таблица 4). Данная закономерность наглядно представлена на Рисунке 5.

Рисунок 4

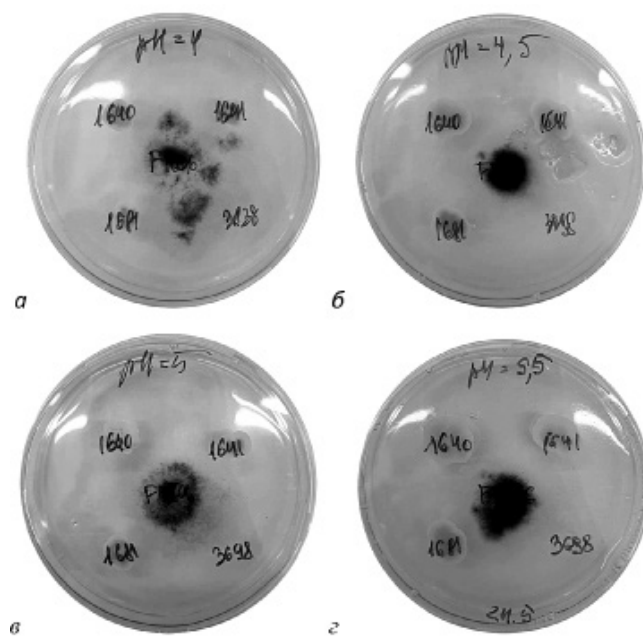
Зоны подавления роста тест-культуры *Botrytis cinerea* F-1006 киллер-токсинами штаммов *Schwanniomyces occidentalis* Y-1627, Y-1628, Y-1629 Y-1638, Y-1640, Y-1641, *Cyberlindnera mrakii* Y-1211, *Wickerhamomyces anomalus* Y-201, Y-3836, Y-4562, Y-1182, *Debaryomyces hansenii* Y-1681



Примечание: А – статическое действие КТ, Б – фунгицидное действие

Рисунок 5

Действие КТ штаммов *Schwanniomyces occidentalis* Y-1638, Y-1640, Y-1641, *Metschnikowia pulcherrima* Y-3698 на тест-культуру *Botrytis cinerea* F-1006 при различных значениях pH



Примечание: а – pH 4; б – pH 4,5; в – pH 5; г – pH 5,5

Таблица 4

Киллерная активность дрожжей при различных значениях pH

№ штамма	Значение pH			
	4	4,5	5	5,5
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-736	+	+	-	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-737	+	+	-	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-738	+	+	-	-
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1627	-	+	-	-
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1628	-	+	-	-
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1209	+	+	+	-
<i>Cyberlindnera mrakii</i> Y-1211	+	+	-	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-201	+	+	+	+
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-483	-	+	-	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-1182	-	+	+	-
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1638	+	+	+	+
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1640	+	+	+	+
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1641	+	+	+	+
<i>Debaryomyces hansenii</i> Y-1681	+	+	-	-
<i>Metschnikowia pulcherrima</i> Y-3698	-	-	-	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-3896	-	+	-	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-4562	-	+	-	-

Примечание: «+» – высокая активность КТ, «-» – низкая активность или ее отсутствие.

Таблица 5

Киллерная активность дрожжей при различной температуре

№ штамма	Температура культивирования, °С		
	15	20	25
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-736	+	+	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-737	+	+	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-738	+	+	-
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1627	+	+	+
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1628	-	+	+
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1209	-	+	+
<i>Cyberlindnera trakii</i> Y-1211	+	+	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-201	+	+	+
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-483	-	+	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-1182	-	+	+
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1638	+	+	+
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1640	+	+	+
<i>Schwanniomyces occidentalis</i> Y-1641	+	+	+
<i>Debaryomyces hansenii</i> Y-1681	-	+	+
<i>Metschnikowia pulcherrima</i> Y-3698	-	+	-
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-3896	-	+	+
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> Y-4562	-	+	+

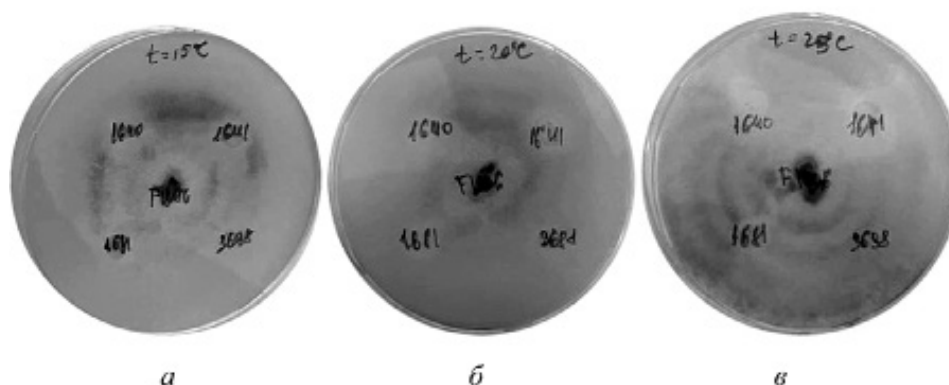
Примечание: «+» – высокая активность КТ, «-» – низкая активность или ее отсутствие.

В ходе проведения теста на продуцирование КТ дрожжами при различных значениях температуры было обнаружено, что при 15–25 °С наблюдается более быстрый и интенсивный рост тест-культуры (Таблица 5). При этом также происходит формирование зон подавления тест-культуры *Botrytis cinerea*.

В большинстве случаев виден статический эффект, за исключением штамма *Schwanniomyces occidentalis* Y-1640, который оказывает фунгицидное действие. Других различий при смене температурного режима не обнаружено (Рисунок 6).

Рисунок 6

Действие КТ штаммов *Schwanniomyces occidentalis* Y-1638, Y-1640, Y-1641, *Metschnikowia pulcherrima* Y-3698 на тест-культуру *Botrytis cinerea* F-1006 при температурах а – 15 °С, б – 20 °С и в – 25 °С



Steel с соавторами в 2013 году сообщили об исследовании дрожжей *Candida oleophila*, *Wickerhamomyces anomalus* и *Pichia kluyveri* как о потенциальных антагонистах различных плесневых грибов, поражающих фрукты (виноград, яблоки, черешню и клубнику) (Steel et al., 2013). Из всех перечисленных аскомицетовых дрожжей-продуцентов КТ, упоминаемых в приведенных исследованиях, явным фунгицидным действием обладают отдельные штаммы видов *Meurozyma guilliermondii*, *Metschnikowia pulcherrima*, *Wickerhamomyces anomalus*, *Williopsis saturnus* var. *saturnus*, *Debaryomyces hansenii*, *Kluyveromyces wickerhamii* (De Lima et al., 2013, Belda et al., 2017, Mazzucco et al., 2019, Karabulut & Cagri-Mehmetoglu, 2019, Büyüksirt & Kuleaşan, 2021, Grzegorzczuk et al., 2017).

На тест-культуре *Botrytis cinerea* Maluleke E. и соавторами ранее проведено исследование фунгицидной активности в экспериментах на других видах дрожжей, которое подтверждает полученные результаты. Проявление сильной глюканазной активности антагонистических штаммов обуславливает подавление фитопатогенных грибов, что свидетельствует о наличии фунгицидных свойств (Maluleke et al., 2022).

Дрожжи-антагонисты обладают несколькими механизмами действия, включая конкуренцию за питательные вещества и пространство, а также образование ферментов, разрушающих клеточную стенку чувствительных организмов (Freimoser et al., 2019). Можно предположить, что выявленные нами наиболее активные киллерные штаммы исследуемых дрожжей также обладают β -глюканазой, действующей на глюканы клеточной стенки гриба *Botrytis cinerea*.

ВЫВОДЫ

В соответствие с целью настоящего исследования проведен скрининг штаммов дрожжей из коллекции БРЦ ВКПМ. Обнаружено, что *Schwanniomyces occidentalis* Y-1627, Y-1628, Y-1629, Y-1638, Y-1640, Y-1641, *Metschnikowia pulcherrima* Y-3698, *Cyberlindnera mrakii* Y-1211, *Wickerhamomyces anomalus* Y-201, Y-3836, Y-4562, Y-1182, *Debaryomyces hansenii* Y-1681 эффективны против *Botrytis cinerea* F-1006, что потенциально важно для разработки препаратов на их основе и использования этих

препаратов в качестве средств биоконтроля. Подбор оптимальных условий, таких как pH, температура, обусловил повышение активности киллерных дрожжей. Так, значение pH 4,5 оказалось оптимальным для большинства продуцентов КТ, а при 15–25 °C наблюдался более быстрый и интенсивный рост тест-культуры. Эффективность данных видов дрожжей может быть дополнительно оценена *in vivo* в отношении ряда патогенов растений с учетом различных факторов окружающей среды.

Препараты, полученные на основе выбранных штаммов, могут быть использованы как для обработки растительного сырья, так и при лечении инфекционных заболеваний. Основой эффективности таких препаратов является отсутствие у патогенных организмов резистентности к КТ и устойчивость данных соединений к факторам внешней среды. Стоит отметить специфический механизм действия, при котором гибнут только чувствительные к токсинам клетки, что обеспечивает безопасность их использования.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Шагалова Валерия Алексеевна: верификация данных, формальный анализ, создание черновика рукописи, визуализация, проведение исследования.

Вустин Михаил Михайлович: руководство исследованием, методология, концептуализация, администрирование проекта.

Машенцева Наталья Геннадьевна: администрирование данных, создание рукописи и её редактирование.

ЛИТЕРАТУРА

- Baeza, M. E., Sanhueza, M. A., & Cifuentes, V. H. (2008). Occurrence of killer yeast strains in industrial and clinical yeast isolates. *Biological Research*, 41(2), 173–182. <https://doi.org/10.4067/S0716-97602008000200007>
- Banjara, N., Nickerson, K. W., Suhr, M. J., & Hallen-Adams, H. E. (2016). Killer toxin from several food-derived *Debaryomyces hansenii* strains effective against pathogenic *Candida* yeasts. *International Journal of Food Microbiology*, 222, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.01.016>
- Becker, B., & Schmitt, M. J. (2017). Yeast killer toxin k28: Biology and unique strategy of host cell intoxication and killing. *Toxins*, 9(10), Article 333. <https://doi.org/10.3390/toxins9100333>
- Belda, I., Ruiz, J., Alonso, A., Marquin, D., & Santos, A. (2017). The biology of *Pichia membranifaciens* killer toxins. *Toxins*, 9(4), Article 112. <https://doi.org/10.3390/toxins9040112>
- Bi, K., Liang, Y., Mengiste, T., & Sharon, A. (2023). Killing softly: A roadmap of *Botrytis cinerea* pathogenicity. *Trends in Plant Science*, 28(2), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.08.024>
- Boynton, P. J. (2019). The ecology of killer yeasts: Interference competition in natural habitats. *Yeast*, 36(8), 473–485. <https://doi.org/10.1002/yea.3398>
- Büyüksırt, B. T., & Kuleşan, H. (2021). A natural approach, the use of killer toxin produced by *Metschnikowia pulcherrima* in fresh ground beef patties for shelf life extension. *International Journal of Food Microbiology*, 345, Article 109154. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109154>
- Büyüksırt, B. T., & Kuleşan, H. (2022). Purification and characterization of a *Metschnikowia pulcherrima* killer toxin with antagonistic activity against pathogenic microorganisms. *Archives of Microbiology*, 204(6), Article 337. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02940-8>
- Cappelli, A., Ulissi, U., Valzano, M., Damiani, C., Epis, S., Gabrielli, M. G., Conti, S., Polonelli, L., Bandi, C., Favia, G., & Ricci, I. (2014). A *Wickerhamomyces anomalus* killer strain in the malaria vector *Anopheles stephensi*. *PLoS One*, 9(5), Article e95988. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095988>
- Carboni, G., Fancello, F., Zara, G., Zara, S., Ruiu, L., Marova, I., Pinna, G., Budroni, M., Mannazzu, I. (2020). Production of a lyophilized ready-to-use yeast killer toxin with possible applications in the wine and food industries. *International Journal of Food Microbiology*, 335, Article 108883. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108883>
- Chen, P. H., & Chou, J. Y. (2017). Screening and identification of yeasts antagonistic to pathogenic fungi show a narrow optimal pH range for antagonistic activity. *Polish Journal of Microbiology*, 66(1), 101–106. <https://doi.org/10.5604/17331331.1234997>
- Comitini, F., & Ciani, M. (2011). *Kluyveromyces wickerhamii* killer toxin: Purification and activity towards *Brettanomyces/dekkera* yeasts in grape must. *FEMS Microbiology Letters*, 316(1), 77–82. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2010.02194.x>
- Conti, S., Magliani, W., Gerloni, M., Salati, A., Dieci, E., Arseni, S., Fiscaro, P., & Polonelli, L. (1998). A transphyletic anti-infectious control strategy based on the killer phenomenon. *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, 22(1–2), 151–161. <https://doi.org/10.1111/j.1574-695x.1998.tb01200.x>
- De Lima, J. R., Gonçalves, L. R., Brandão, L. R., Rosa, C. A., & Viana, F. M. (2013). Isolation, identification, and activity in vitro of killer yeasts against *Colletotrichum gloeosporioides* isolated from tropical fruits. *Journal of Basic Microbiology*, 53(7), 590–599. <https://doi.org/10.1002/jobm.201200049>
- De Ullivarri, F. M., Bulacios, G. A., Navarro, S. A., Lanza, L., Mendoza, L. M., & Chalón, M. C. (2020). The killer yeast *Wickerhamomyces anomalus* Cf20 exerts a broad anti-*Candida* activity through the production of killer toxins and volatile compounds. *Medical Mycology*, 258(8), 1102–1113. <https://doi.org/10.1093/mmy/myaa011>
- Dlamini, N. R., & Dube, S. (2008). Studies on the physico-chemical, nutritional and microbiological changes during the traditional preparation of Marula wine in Gwanda, Zimbabwe. *Nutrition & Food Science*, 38(1), 61–69. <https://doi.org/10.1108/00346650810848025>
- Farkas, Z., Márki-Zay, J., Kucsera, J., Vágvölgyi, C., Golubev, W. I., & Pfeiffer, I. (2012). Characterization of two different toxins of *Wickerhamomyces anomalus* (*Pichia anomala*) VKM Y-159. *Acta Biologica Hungarica*, 63(2), 277–287. <https://doi.org/10.1556/abiol.63.2012.2.9>
- Freimoser, F. M., Rueda-Mejia, M. P., Tilocca, B., & Migheli, Q. (2019). Biocontrol yeasts: mechanisms and applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(10), Article 154. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2728-4>
- Giovati, L., Ciociola, T., De Simone, T., Conti, S., & Magliani, W. (2021). *Wickerhamomyces* yeast killer toxins' medical applications. *Toxins*, 13(9), Article 655. <https://doi.org/10.3390/toxins13090655>
- Grzegorzczak, M., Żarowska, B., Restuccia, C., & Cirvilleri, G. (2017). Postharvest biocontrol ability of killer yeasts against *Monilinia fructigena* and *Monilinia fructicola* on stone fruit. *Food Microbiology*, 61, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.09.005>
- Guyard, C., Evrard, P., Corbisier-Colson, A. M., Louvart, H., De-Cas, E., Menozzi, F. D., Polonelli, L., & Cailliez, J. (2001). Immuno-crossreactivity of an anti-*Pichia anomala* killer toxin monoclonal antibody with a *Williopsis saturnus* var. *mraikii* killer toxin. *Medical Mycology*, 39(5), 395–400. <https://doi.org/10.1080/mmy.39.5.395.400>
- Hicks, R. H., Moreno-Beltrán, M., Gore-Lloyd, D., Chuck, C. J., & Henk, D. A. (2021). The oleaginous yeast *Metschnikowia pulcherrima* displays killer activity against avian-derived pathogenic bacteria. *Biology*, 10(12), Article 1227. <https://doi.org/10.3390/biology10121227>
- Karabulut, G., & Cagri-Mehmetoglu, A. (2018). Antifungal, mechanical, and physical properties of edible film

- containing *williopsis saturnus* var. *saturnus* antagonistic yeast. *Journal of Food Science*, 83(3), 763–769. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14062>
- Klassen, R., Schaffrath, R., Buzzini, P., & Ganter, P. F. (2017). Antagonistic interactions and killer yeasts. In P. Buzzini, M.-A. Lachance, A. Yurkov (Eds.). *Yeasts in natural ecosystems: Ecology* (pp. 229–275). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61575-2_9
- Liu, G. L., Chi, Z., Wang, G. Y., Wang, Z. P., Li, Y., & Chi, Z. M. (2015). Yeast killer toxins, molecular mechanisms of their action and their applications. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(2), 222–234. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.833582>
- Maluleke, E., Jolly, N. P., Patterson, H. G., & Setati, M. E. (2022). Antifungal activity of non-conventional yeasts against *Botrytis cinerea* and non-*Botrytis* grape bunch rot fungi. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 986229. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.986229>
- Mannazzu, I., Domizio, P., Carboni, G., Zara, S., Zara, G., Comitini, F., Budroni, M., & Ciani, M. (2019). Yeast killer toxins: From ecological significance to application. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(5), 603–617. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1601679>
- Mazzucco, M. B., Ganga, M. A., & Sangorrín, M. P. (2019). Production of a novel killer toxin from *Saccharomyces eubayanus* using agro-industrial waste and its application against wine spoilage yeasts. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 112(7), 965–973. <https://doi.org/10.1007/s10482-019-01231-5>
- Mehlomakulu, N. N., Setati, M. E., & Divol, B. (2014). Characterization of novel killer toxins secreted by wine-related non-*Saccharomyces* yeasts and their action on *Brettanomyces* spp. *International Journal of Food Microbiology*, 188, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.07.015>
- Muccilli, S., Wemhoff, S., Restuccia, C., & Meinhardt, F. (2013). Exoglucanase-encoding genes from three *Wickerhamomyces anomalus* killer strains isolated from olive brine. *Yeast*, 30(1), 33–43. <https://doi.org/10.1002/yea.2935>
- Ochigava, I., Collier, P. J., Walker, G. M., & Hakenbeck, R. (2011). *Williopsis saturnus* yeast killer toxin does not kill *Streptococcus pneumoniae*. *Antonie van Leeuwenhoek*, 99(3), 559–566. <https://doi.org/10.1007/s10482-010-9524-3>
- Połomska, X., Neuvéglise, C., Zyzak, J., Żarowska, B., Casaregola, S., & Lazar, Z. (2021). New cytoplasmic virus-like elements (Vles) in the yeast *Debaryomyces hansenii*. *Toxins*, 13(9), Article 615. <https://doi.org/10.3390/toxins13090615>
- Sanaa, M. A., Zeineb, M. H., Fatma, M. I., & Sanaa, S. Z. (2015). Killer toxins of *Candida utilis* 22 and *Kluyveromyces marxianus* and their potential applications as biocontrol agents. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 25(2), 317–325.
- Santos, A., & Marquina, D. (2011). The transcriptional response of *Saccharomyces cerevisiae* to proapoptotic concentrations of *Pichia membranifaciens* killer toxin. *Fungal Genetics and Biology*, 48(10), 979–989. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2011.07.002>
- Santos, A., Marquina, D., Barroso, J., & Peinadom, J. M. (2002). Beta-D-glucan as the cell wall binding site for *Debaryomyces hansenii* killer toxin. *Letters in Applied Microbiology*, 34(2), 95–99. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765x.2002.01053.x>
- Santos, A., San Mauro, M., Abrusci, C., & Marquina, D. (2007). Cwp2p, the plasma membrane receptor for *Pichia membranifaciens* killer toxin. *Molecular Microbiology*, 64(3), 831–843. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2007.05702.x>
- Sheppard, S., & Dikicioglu, D. (2019). Dynamic modelling of the killing mechanism of action by virus-infected yeasts. *Journal of the Royal Society Interface*, 16(152), Article 20190064. <https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0064>
- Steel, C. C., Blackman, J. W., Schmidtke L. M. (2013). Grapevine bunch rots: impacts on wine composition, quality, and potential procedures for the removal of wine faults. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(22), 5189–5206. <https://doi.org/10.1021/jf400641r>

REFERENCES

- Occurrence of killer yeast strains in industrial and clinical yeast isolates. *Biological Research*, 41(2), 173–182. <https://doi.org/10.4067/S0716-97602008000200007>
- Banjara, N., Nickerson, K. W., Suhr, M. J., & Hallen-Adams, H. E. (2016). Killer toxin from several food-derived *Debaryomyces hansenii* strains effective against pathogenic *Candida* yeasts. *International Journal of Food Microbiology*, 222, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.01.016>
- Becker, B., & Schmitt, M. J. (2017). Yeast killer toxin k28: Biology and unique strategy of host cell intoxication and killing. *Toxins*, 9(10), Article 333. <https://doi.org/10.3390/toxins9100333>
- Belda, I., Ruiz, J., Alonso, A., Marquin, D., & Santos, A. (2017). The biology of *Pichia membranifaciens* killer toxins. *Toxins*, 9(4), Article 112. <https://doi.org/10.3390/toxins9040112>
- Bi, K., Liang, Y., Mengiste, T., & Sharon, A. (2023). Killing softly: A roadmap of *Botrytis cinerea* pathogenicity. *Trends in Plant Science*, 28(2), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.08.024>
- Boynton, P. J. (2019). The ecology of killer yeasts: Interference competition in natural habitats. *Yeast*, 36(8), 473–485. <https://doi.org/10.1002/yea.3398>
- Büyüksırt, B. T., & Kuleaşan, H. (2021). A natural approach, the use of killer toxin produced by *Metschnikowia pulcherrima* in fresh ground beef patties for shelf life extension. *International Journal of Food Microbiology*, 345, Article 109154. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109154>
- Büyüksırt, B. T., & Kuleaşan, H. (2022). Purification and characterization of a *Metschnikowia pulcherrima* killer toxin with antagonistic activity against pathogenic

- microorganisms. *Archives of Microbiology*, 204(6), Article 337. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02940-8>
- Cappelli, A., Ulissi, U., Valzano, M., Damiani, C., Epis, S., Gabrielli, M. G., Conti, S., Polonelli, L., Bandi, C., Favia, G., & Ricci, I. (2014). A *Wickerhamomyces anomalus* killer strain in the malaria vector *Anopheles stephensi*. *PLoS One*, 9(5), Article e95988. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095988>
- Carboni, G., Fancello, F., Zara, G., Zara, S., Ruiu, L., Marova, I., Pinna, G., Budroni, M., Mannazzu, I. (2020). Production of a lyophilized ready-to-use yeast killer toxin with possible applications in the wine and food industries. *International Journal of Food Microbiology*, 335, Article 108883. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108883>
- Chen, P. H., & Chou, J. Y. (2017). Screening and identification of yeasts antagonistic to pathogenic fungi show a narrow optimal ph range for antagonistic activity. *Polish Journal of Microbiology*, 66(1), 101–106. <https://doi.org/10.5604/17331331.1234997>
- Comitini, F., & Ciani, M. (2011). *Kluyveromyces wickerhamii* killer toxin: Purification and activity towards *Brettanomyces/dekkera* yeasts in grape must. *FEMS Microbiology Letters*, 316(1), 77–82. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2010.02194.x>
- Conti, S., Magliani, W., Gerloni, M., Salati, A., Dieci, E., Arseni, S., Fiscaro, P., & Polonelli, L. (1998). A transphyletic anti-infectious control strategy based on the killer phenomenon. *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, 22(1–2), 151–161. <https://doi.org/10.1111/j.1574-695x.1998.tb01200.x>
- De Lima, J. R., Gonçalves, L. R., Brandão, L. R., Rosa, C. A., & Viana, F. M. (2013). Isolation, identification, and activity in vitro of killer yeasts against *Colletotrichum gloeosporioides* isolated from tropical fruits. *Journal of Basic Microbiology*, 53(7), 590–599. <https://doi.org/10.1002/jobm.201200049>
- De Ullivarri, F. M., Bulacios, G. A., Navarro, S. A., Lanza, L., Mendoza, L. M., & Chalón, M. C. (2020). The killer yeast *Wickerhamomyces anomalus* Cf20 exerts a broad anti-Candida activity through the production of killer toxins and volatile compounds. *Medical Mycology*, 258(8), 1102–1113. <https://doi.org/10.1093/mmy/myaa011>
- Dlamini, N. R., & Dube, S. (2008). Studies on the physico-chemical, nutritional and microbiological changes during the traditional preparation of Marula wine in Gwanda, Zimbabwe. *Nutrition & Food Science*, 38(1), 61–69. <https://doi.org/10.1108/00346650810848025>
- Farkas, Z., Márki-Zay, J., Kucsera, J., Vágvölgyi, C., Golubev, W. I., & Pfeiffer, I. (2012). Characterization of two different toxins of *Wickerhamomyces anomalus* (*Pichia anomala*) VKM Y-159. *Acta Biologica Hungarica*, 63(2), 277–287. <https://doi.org/10.1556/abiol.63.2012.2.9>
- Freimoser, F. M., Rueda-Mejia, M. P., Tilocca, B., & Migheli, Q. (2019). Biocontrol yeasts: mechanisms and applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(10), Article 154. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2728-4>
- Giovati, L., Ciociola, T., De Simone, T., Conti, S., & Magliani, W. (2021). *Wickerhamomyces* yeast killer toxins' medical applications. *Toxins*, 13(9), Article 655. <https://doi.org/10.3390/toxins13090655>
- Grzegorzczak, M., Żarowska, B., Restuccia, C., & Cirvilleri, G. (2017). Postharvest biocontrol ability of killer yeasts against *Monilinia fructigena* and *Monilinia fructicola* on stone fruit. *Food Microbiology*, 61, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.09.005>
- Guyard, C., Evrard, P., Corbisier-Colson, A. M., Louvart, H., De-Cas, E., Menozzi, F. D., Polonelli, L., & Cailliez, J. (2001). Immuno-crossreactivity of an anti-*Pichia anomala* killer toxin monoclonal antibody with a *Williopsis saturnus* var. *mrakii* killer toxin. *Medical Mycology*, 39(5), 395–400. <https://doi.org/10.1080/mmy.39.5.395.400>
- Hicks, R. H., Moreno-Beltrán, M., Gore-Lloyd, D., Chuck, C. J., & Henk, D. A. (2021). The oleaginous yeast *Metschnikowia pulcherrima* displays killer activity against avian-derived pathogenic bacteria. *Biology*, 10(12), Article 1227. <https://doi.org/10.3390/biology10121227>
- Karabulut, G., & Cagri-Mehmetoglu, A. (2018). Antifungal, mechanical, and physical properties of edible film containing *williopsis saturnus* var. *saturnus* antagonistic yeast. *Journal of Food Science*, 83(3), 763–769. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14062>
- Klassen, R., Schaffrath, R., Buzzini, P., & Ganter, P. F. (2017). Antagonistic interactions and killer yeasts. In P. Buzzini, M.-A. Lachance, A. Yurkov (Eds.). *Yeasts in natural ecosystems: Ecology* (pp. 229–275). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61575-2_9
- Liu, G. L., Chi, Z., Wang, G. Y., Wang, Z. P., Li, Y., & Chi, Z. M. (2015). Yeast killer toxins, molecular mechanisms of their action and their applications. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(2), 222–234. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.833582>
- Maluleke, E., Jolly, N. P., Patterton, H. G., & Setati, M. E. (2022). Antifungal activity of non-conventional yeasts against *Botrytis cinerea* and non-*Botrytis* grape bunch rot fungi. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 986229. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.986229>
- Mannazzu, I., Domizio, P., Carboni, G., Zara, S., Zara, G., Comitini, F., Budroni, M., & Ciani, M. (2019). Yeast killer toxins: From ecological significance to application. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(5), 603–617. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1601679>
- Mazzucco, M. B., Ganga, M. A., & Sangorrín, M. P. (2019). Production of a novel killer toxin from *Saccharomyces eubayanus* using agro-industrial waste and its application against wine spoilage yeasts. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 112(7), 965–973. <https://doi.org/10.1007/s10482-019-01231-5>
- Mehломakulu, N. N., Setati, M. E., & Divol, B. (2014). Characterization of novel killer toxins secreted by wine-related non-*Saccharomyces* yeasts and their action on *Brettanomyces* spp. *International Journal of Food Microbiology*, 188, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.07.015>
- Muccilli, S., Wemhoff, S., Restuccia, C., & Meinhardt, F. (2013). Exoglucanase-encoding genes from three *Wickerhamomyces*

- anomalus* killer strains isolated from olive brine. *Yeast*, 30(1), 33–43. <https://doi.org/10.1002/yea.2935>
- Ochigava, I., Collier, P. J., Walker, G. M., & Hakenbeck, R. (2011). *Williopsis saturnus* yeast killer toxin does not kill *Streptococcus pneumoniae*. *Antonie van Leeuwenhoek*, 99(3), 559–566. <https://doi.org/10.1007/s10482-010-9524-3>
- Połomska, X., Neuvéglise, C., Zyzak, J., Żarowska, B., Casaregola, S., & Lazar, Z. (2021). New cytoplasmic virus-like elements (Vles) in the yeast *Debaryomyces hansenii*. *Toxins*, 13(9), Article 615. <https://doi.org/10.3390/toxins13090615>
- Sanaa, M. A., Zeineb, M. H., Fatma, M. I., & Sanaa, S. Z. (2015). Killer toxins of *Candida utilis* 22 and *Kluyveromyces marxianus* and their potential applications as biocontrol agents. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 25(2), 317–325.
- Santos, A., & Marquina, D. (2011). The transcriptional response of *Saccharomyces cerevisiae* to proapoptotic concentrations of *Pichia membranifaciens* killer toxin. *Fungal Genetics and Biology*, 48(10), 979–989. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2011.07.002>
- Santos, A., Marquina, D., Barroso, J., & Peinadom, J. M. (2002). Beta-D-glucan as the cell wall binding site for *Debaryomyces hansenii* killer toxin. *Letters in Applied Microbiology*, 34(2), 95–99. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765x.2002.01053.x>
- Santos, A., San Mauro, M., Abrusci, C., & Marquina, D. (2007). Cwp2p, the plasma membrane receptor for *Pichia membranifaciens* killer toxin. *Molecular Microbiology*, 64(3), 831–843. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2007.05702.x>
- Sheppard, S., & Dikicioglu, D. (2019). Dynamic modelling of the killing mechanism of action by virus-infected yeasts. *Journal of the Royal Society Interface*, 16(152), Article 20190064. <https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0064>
- Steel, C. C., Blackman, J. W., Schmidtke L. M. (2013). Grapevine bunch rots: impacts on wine composition, quality, and potential procedures for the removal of wine faults. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(22), 5189–5206. <https://doi.org/10.1021/jf400641r>

УДК 663.8

Разработка концентратов сухих напитков на основе растительных криопорошков

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Бакуменко Полина Владимировна
E-mail: bacumenko@rambler.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Щерба, И.В., Бакуменко, О.Е., & Бакуменко П.В. (2023). Разработка концентратов сухих напитков на основе растительных криопорошков. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 163-175. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.343>

ПОСТУПИЛА: 04.01.2023

ПРИНЯТА: 12.07.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



И. В. Щерба, О. Е. Бакуменко, П. В. Бакуменко

АННОТАЦИЯ

Введение: Одной из актуальных проблем современного общества является проблема здорового питания. При неправильном способе и режиме обработки растительного сырья, происходят потери витаминов, макро- и микроэлементов, содержащихся в сырье. Одна из технологий, которая позволяет сохранить максимальное количество витаминов и минеральных веществ в продуктах растительного происхождения, является криотехнология. При этом на стадии удаления влаги и измельчения свежего сырья до состояния мелкодисперсного порошка применяется метод понижения температуры. Наиболее ценными продуктами на основе криопорошков могут служить концентраты сухих напитков со специально подобранным составом.

Цель: Авторами проведена сравнительная оценка химического состава свежего растительного сырья – плодов черноплодной рябины, малины, облепихи и криопорошков на их основе по показателям, характеризующим пищевую ценность – витаминам А и С и содержанию калия, кальция и железа.

Материалы и методы: Объектами исследования служили концентраты сухих напитков на основе плодов черноплодной рябины, ягод малины и облепихи. Для оценки качества продукта применяли органолептические, физико-химические и микробиологические методы анализа, а также проводили дегустационную оценку концентратов сухих напитков.

Результаты: Показано, что криопорошки имеют высокую пищевую ценность, что позволит восполнить дефицит витаминов и минеральных веществ в организме человека. Подобраны вкусовые и обогащающие добавки в рецептурах концентратов сухих напитков. Получены лабораторные образцы продукта с использованием дозировочно-смесительного оборудования. Установлена оптимальная температура (35 ± 2 °С) и продолжительность растворения (30–35 с) концентратов.

Выводы: Проведена оценка качества полученных напитков по органолептическим, физико-химическим и показателям безопасности, свидетельствующая о высоком качестве и безопасности полученных продуктов. Разработка концентратов сухих напитков функционального назначения на основе криопорошков позволит расширить ассортимент концентратов сухих напитков и получить продукт на основе отечественного растительного сырья, обладающий функциональными свойствами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

концентраты сухих напитков, криотехнология, криопорошки, функциональное питание, содержание витаминов

Development of Concentrates of Dry Drinks Based on Vegetable Cryopowders

Russian Biotechnological University
(BIOTECH University), Moscow, Russia

Irina V. Shcherba, Olesya E. Bakumenko, Polina V. Bakumenko

CORRESPONDENCE:

Polina V. Bakumenko

E-mail: bakumenko@rambler.ru

FOR CITATIONS:

Sherba, I.V., Bacumenko, O.E., & Bacumenko P.V. (2023). Development of concentrates of dry drinks based on vegetable cryopowders. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 163-175. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.343>

RECEIVED: 04.01.2023

ACCEPTED: 12.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Background: One of the urgent problems of modern society is the problem of healthy nutrition. With the wrong method and mode of processing of vegetable raw materials, losses of macro- and microelements contained in the raw materials occur. One of the technologies that allows you to preserve the maximum amount of vitamins and minerals in plant products is cryotechnology. At the same time, at the stage of removing moisture and grinding fresh raw materials to a fine powder, the method of lowering the temperature is used. The most valuable products based on cryo powders can serve as concentrates of dry drinks with a specially selected composition.

Materials and Methods: Materials and methods. The objects of research in the work were concentrates of dry drinks based on the fruits of mountain ash, raspberries and sea buckthorn. To assess the quality of the product, organoleptic, physico-chemical, microbiological methods of analysis were used in the work, and a tasting evaluation of dry beverage concentrates was carried out.

Results: It is shown that cryopowders have a high nutritional value, which will make up for the deficiency of vitamins and minerals in the human body. Flavoring and enriching additives have been selected in the formulations of concentrates of dry drinks. Laboratory samples of the product were obtained using dosing and mixing equipment. The optimum temperature ($35 \pm 2^\circ\text{C}$) and the duration of dissolution (30–35 c) of concentrates have been established.

Conclusion: The evaluation of the quality of the obtained beverages according to organoleptic, physico-chemical and safety indicators was carried out, indicating the high quality and safety of the obtained products. The development of functional dry beverage concentrates based on cryopowders will allow expanding the range of dry beverage concentrates and obtaining a product based on domestic plant raw materials with functional properties.

KEYWORDS

concentrates of dry drinks, cryotechnology, cryopowders, functional nutrition, vitamin content

ВВЕДЕНИЕ

Учитывая массовое проявление у населения страны витаминно-минерального дефицита, его устранение является первостепенным фактором поддержания здоровья и профилактики заболеваемости (Основы государственной политики Российской Федерации в области здорового питания населения на период до 2030 года¹). В соответствии со Стратегией повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года в ближайшие годы будут «создаваться продукты нового поколения с заданными характеристиками», что и определяет необходимость использования новых видов отечественного сырья и применение инновационных технологий, обеспечивающих стабильное качество, безопасность и конкурентность новых видов продукции.

Коденцова (2019), Остриков с соавт. (2004), Скурихин с соавт. (2007), исследовав фактический рацион граждан в возрастной категории от 30–55 лет, выявили дефицит витамина А у 17% обследованных, витаминов группы В — у 60%, витамина С — у 8%, витамина Е — у 30–40%.

По данным ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи потребность в витаминах зависит в первую очередь от характера питания. Так, например, белки помогают сохранности витамина В₁ в организме, а избыток углеводов, наоборот, повышает его расход. Также на содержание витаминов группы В влияет уровень физического и нервно-психического напряжения: чем он выше, тем, соответственно, больше расход витаминов. Сокращению запасов витаминов в организме могут способствовать экстремальные погодные условия, строгие диеты, нарушения в работе щитовидной железы и чрезмерное употребление алкоголя². Витаминный дефицит носит сочетанный характер и обнаруживается не только зимой и весной, но и в летне-осенний период. Общую ситуацию можно рассматривать как массовый круглогодичный гиповитаминоз витамина С (Егорова с соавт., 2018; Спиричев с соавт., 2005). Для предотвращения негативной ситуации, необходима разработка продуктов функционального назначения, обога-

щенных дефицитными витаминами, с длительным сроком годности.

При неправильных способах и режимах обработки и хранения, происходят потери природных макро- и микронутриентов, содержащихся в сочном растительном сырье. Актуальным является выбор технологии получения концентратов напитков на основе растительного сырья, позволяющей максимально сохранить ценные биологически активные вещества (БАВ). Такой технологией может служить криотехнология, при которой на стадии удаления влаги и измельчения свежего сырья до состояния мелкодисперсного порошка применяется метод понижения температуры (Кухаренко с соавт., 2014; Hemila, 1997; Nehring & Krause, 1963; Valkonen & Kuusi, 2019).

Преимуществами использования криотехнологии являются:

- (1) сохранение пищевой ценности исходного продукта;
- (2) повышение усвояемости биологически активных веществ готового продукта организмом человека;
- (3) увеличение сорбционной активности порошков.

Криотехнология является одной из самых эффективных в области переработки растительного сырья. В процессе осуществления технологии используются пониженные температуры на всех стадиях переработки, а на стадии дробления и измельчения применяется метод глубокого замораживания до температуры ниже — 180°C, что позволяет максимально сохранить ценные БАВ, содержащиеся в сырье и обеспечить высокое качество продукции (Ломачинский & Касьянов, 2009; Бакуменко, 2013; Шатнюк с соавт., 1987). Криопорошки на основе лекарственных трав содержат комплексы натуральных БАВ, определяющих их лечебное и лечебно-профилактическое действие (Касьянов с соавт., 2014; Быстрова, 2018). Таким образом, криопорошки могут служить хорошей основой для разработки сухих продуктов длительного хранения, таких как концентраты сухих напитков.

¹ Распоряжение Правительства РФ № 1364-р. (2016). *Основы государственной политики российской федерации в области здорового питания населения на период до 2030 года*. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200636/

² Рогожин, В. В., & Рогожина, Т. В. (2014). *Биохимия сельскохозяйственной продукции: Учебник*. СПб.: ГИОРД.

Концентраты сухих напитков представляют собой смесь сахара-песка, плодово-ягодных и овощных соков, экстрактов растительного сырья, эссенций, ароматизаторов, настоев, продуктов пчеловодства, пищевых кислот, красителей и консервантов (Ломачинский, 2010). Срок годности герметично упакованных концентратов, которые правильно хранятся, может достигать от нескольких месяцев до нескольких лет. Благодаря этим свойствам, сухие концентраты напитков считаются одними из самых удобных продуктом питания в полевых, экспедиционных, лагерных условиях. (Рогов с соавт., 2004, Доронин с соавт., 2011). Именно поэтому, разработка и внедрение в производство концентратов сухих напитков функционального назначения с целью восполнения дефицита макро-и микронутриентов актуальна, так как они просты в употреблении, содержат максимальное количество пищевых веществ в относительно небольшом объеме, устойчивы при хранении и хорошо переносят транспортировку.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В промышленно развитых странах большую роль в питании людей играют концентраты сухих напитков функционального назначения, оказывающие положительное физиологическое воздействие на организм (Зверев & Зверева, 2016). Регулярные обследования состояния здоровья и питания различных групп населения России свидетельствуют о наличии дефицита важнейших пищевых веществ (витаминов группы В, С, А, D) и минеральных веществ (калия, кальция, магния, железа, йода, цинка и др.), приводящего к снижению иммунитета и возникновению различных алиментарных заболеваний — сердечно-сосудистых, желудочно-кишечного тракта, нарушений функций зрения, анемии и др., распространенность которых в последние годы возросла.

Наиболее эффективным путем снижения дефицита пищевых веществ и повышения сопротивляемости организма вредным факторам является разработка

нового ассортимента пищевых продуктов на основе натурального растительного сырья, обогащенных дефицитными нутриентами и способствующих улучшению состояния здоровья.

В настоящее время производство пищевых концентратов является высокоразвитой отраслью пищевой индустрии, а по объемам выпуска продукции Россия стоит на уровне передовых стран Европы и Америки. В России продукты быстрого приготовления употребляют около 40% населения (Харламова & Кафка, 2017; Гальперина, 1974; Мамина с соавт., 2009).

Основным ингредиентом в рецептуре концентратов сухих напитков являются плодовые, ягодные и овощные растительные порошки, полученные по различным технологиям — сушка, сублимирование, криотехнологии.

Эффективность в питании, а также безопасность криопорошков подтверждены соответствующими методами исследований в учреждениях на предприятиях Нижнего Новгорода, Москвы, Кирова и Новосибирска³. Качество концентратов сухих напитков напрямую зависит от количества растворенного вещества. Поэтому, в восстановленных концентратах в качестве основного критерия необходимо контролировать максимально возможную суммарную концентрацию растворенных веществ, так как именно они растворяются до молекулярного или коллоидного состояния, а компоненты оказывают на организм функциональное действие⁴.

Учитывая, что организмом усваиваются частицы с размером не более 150 нм, а средний размер частиц криопорошков соответствует данному значению можно сделать вывод, что криопорошки могут служить основой для разработки рецептур концентратов сухих напитков (Ломачинский, В. В., 2010). Это позволит расширить ассортимент напитков, повысить пищевую ценность и усвояемость их организмом. Придать продукту функциональную направленность возможно путем дополнительного обогащения продукта витаминами и минеральными веществами.

³ Касьянов, Г. И., & Сязин, И. Е. (2014). *Криобработка: Учебное пособие*. Краснодар: Экоинвест.

⁴ Кузнецов, В. В., & Шилер, Г. Г. (2006). *Использование сухих молочных компонентов пищевой промышленности: Справочник*. СПб.: Гиорд.

Целью данного исследования явилась разработка концентратов сухих напитков на основе криопорошков. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: (1) научно обосновать выбор сырья для разработки рецептур концентратов сухих напитков; (2) получить образцы концентратов сухих напитков; (3) провести органолептические, физико-химические, микробиологические исследования и дегустационную оценку концентратов сухих напитков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Были изучены свойства криопорошков на базе Нижегородской государственной медицинской академии, НИИ детской гастроэнтерологии, НИИ гигиены труда и профзаболеваний (г. Нижний Новгород), Санкт-Петербургской государственной медицинской академии имени И.И. Мечникова и других организаций.

Объекты исследования

Объектами исследования выступили концентраты сухих напитков на основе плодов черноплодной рябины, ягод малины и облепихи.

Материалы

Сырьем для получения концентратов сухих напитков являлись: (1) криопорошок из малины (декларация соответствия СТО 25622234-002-2019); (2) криопорошок из черноплодной рябины (декларация соответствия ТС № RU Д-РУ.АИ 03.В.01503⁵ от 21.01.2015 г); (3) криопорошок из облепихи (СТО 25622234-001-2018), «Сантевилль» Россия, г. Нижний Новгород; (4) лимонная кислота по ГОСТ 908-

2004⁶; (5) премикс Customix Immunity UF27512375 производства «DSM Nutritional Products Europe Ltd.». ШН — 4002 Базель, (Швейцария), в состав которого входят следующие вещества: токоферола эквивалент (витамин Е), тиамин (витамина В1), рибофлавин (витамин В2), пиридоксин (витамин В6), ниацинамид (РР), фолиевая к-та (витамин В9), пантотеновая к-та, биотин, витамин В12, витамин С, цинк, селен. — подсластитель стевиозид по ГОСТ Р 53904–2010⁷; (6) ароматизаторы натуральные: рябина черноплодная, малина в соответствии с ГОСТ 32049–2013⁸, ООО «Экопродукт.

Оборудование

Спектрофотометр «Hitachi 180–80», жидкостной хроматограф «Agilent», просеиватель марки МП-ПП-1, оснащенный полиамидными ситами с размерами отверстий 132 мкм, барабанный смеситель периодического действия СПБ-20 (объемом 220 л).

Методы

В работе использовали органолептические, физико-химические и микробиологические методы анализа. Определение массовой доли влаги концентратов сухих напитков проводили на приборе ВЧ согласно ГОСТ 15113.4–77 Концентраты пищевые. Методы определения влаги (с Изменением № 1)⁹.

Общую кислотность концентратов сухих напитков определяли по ГОСТ 15113.5–77. Метод основан на титровании всех кислот, находящихся в испытуемом продукте¹⁰.

Определение содержания аскорбиновой кислоты в криопорошках и концентратах сухих напитков определяли методом йодометрии¹¹. Опреде-

⁵ ТС N RU Д-РУ.АИ 03.В.01503. (2016). *Арматура промышленная трубопроводная: краны полиэтиленовые*. https://reestrinform.ru/reestr-declaracii-sootvetstviia/reg_number-%D0%A2%D0%A1_N_RU_%D0%94-FR.%D0%90%D0%9701.%D0%92.01503.html

⁶ ГОСТ 908–2004. (2004). *Кислота лимонная моногидрат пищевая. Технические условия*. М.: Станартинформ.

⁷ ГОСТ Р 53904–2010. (2010). *Добавки пищевые. Подсластители пищевых продуктов. Термины и определения*. М.: Станартинформ.

⁸ ГОСТ 32049–2013. (2014). *Ароматизаторы пищевые. Общие технические условия*. М.: Станартинформ.

⁹ ГОСТ 15113.4–77. (2003). *Концентраты пищевые. Методы определения влаги*. М.: Станартинформ.

¹⁰ ГОСТ 15113.5–77. (2004). *Метод основан на титровании всех кислот, находящихся в испытуемом продукте*. М.: Станартинформ.

¹¹ Кузнецов, В. В., & Шилер, Г. Г. (2006). *Использование сухих молочных компонентов пищевой промышленности*: Справочник. СПб.: Гиорд.

ление витамина А в криопорошках проводили по ГОСТ 50928¹² методом нормально-фазной ВЭЖХ. Определение содержания калия, кальция и железа в криопорошках проводили на спектрофотометре «Hitachi 180–80» атомно-абсорбционным спектральным анализом.

Микробиологические показатели определяли по ГОСТ 30712–2001¹³. Методы микробиологического анализа. Количество мезофильных анаэробных микроорганизмов в готовом продукте определяли методом посева в агаризованные питательные среды и методом наиболее вероятного числа в соответствии с ГОСТ 10444.15¹⁴. Бактерии группы кишечных палочек (БГКП) определяли методом посева в агаризованные селективно-диагностические среды для пищевых продуктов в соответствии с ГОСТ 31747¹⁵. Дрожжи и плесени (в сумме) определяли визуально методом посева десятикратных разведений, с использованием чашек Петри. Массовую концентрацию свинца определяли в соответствии с ГОСТ 26932¹⁶; мышьяка по ГОСТ 26930¹⁷; кадмия по ГОСТ 26933¹⁸; ртути по ГОСТ 26927¹⁹. Органолептическую оценку продукта проводили в соответствии с ИСО 9001²⁰, дегустацию напитков осуществляли сенсорным профилльно-ранговым методом по ГОСТ 53159²¹.

Процедура

По данным литературы изучены дефициты витаминов и минеральных веществ среди разных возрастных групп населения РФ. На основании полученных данных проанализировано ягодное сырье, содержащее дефицитные нутриенты и выбраны 3 вида ягод — черноплодная рябина, малина и облепиха.

Проведена сравнительная оценка по отдельным функциональным ингредиентам — витаминам А и С и минеральным веществам — калию, кальцию и железу между содержанием данных нутриентов в свежем сырье и криопорошках на их основе.

При выборе обогащающих ингредиентов для концентратов сухих напитков и их количества учитывали следующие специфические факторы, влияющие на качество и эффективность будущего концентрата:

- (1) нормы физиологических потребностей (НФП) и физиологическое действие нутриентов на организм человека;
- (2) доступность и экономическая целесообразность использования сырьевых источников, преимущественно на основе отечественного сырья;
- (3) концентрация обогащающих ингредиентов в 1 порции напитка должна быть от 15 до 50% от (НФП), с учетом потерь в результате производства и хранения продукта;
- (4) специфичность взаимодействия между отдельными компонентами.

Подобран состав концентратов сухих напитков на основе криопорошков.

Для обогащения концентратов сухих напитков витаминами и минеральными веществами был выбран витаминно-минеральный премикс «Customix Immunity» UF27512375. Он применяется в пищевой промышленности, в том числе при производстве функциональных пищевых продуктов. Количество вносимого премикса определяется фирмой-производителем.

¹² ГОСТ Р 50928–96. (1999). *Премиксы. Методы определения витаминов А, D, Е. М.*: Станартинформ.

¹³ ГОСТ 30712–2001. (2001). *Продукты безалкогольной промышленности. Методы микробиологического анализа.* М.: Станартинформ.

¹⁴ ГОСТ 10444.15–94. (2015). *Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов.* М.: Станартинформ.

¹⁵ ГОСТ 31747–2012. (2012). *Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий).* М.: Станартинформ.

¹⁶ ГОСТ 26932–86. (2010). *Сырье и продукты пищевые. Методы определения свинца.* М.: Станартинформ.

¹⁷ ГОСТ 26930–86. (2010). *Сырье и продукты пищевые. Метод определения мышьяка.* М.: Станартинформ.

¹⁸ ГОСТ 26933–86. (2010). *Сырье и продукты пищевые. Методы определения кадмия.* М.: Станартинформ.

¹⁹ ГОСТ 26927–86. (2010). *Сырье и продукты пищевые. Методы определения ртути.* М.: Станартинформ.

²⁰ ГОСТ Р ИСО 9001–2015. (2016). *Системы менеджмента качества. Требования.* М.: Станартинформ.

²¹ ГОСТ Р 53159–2008. (2009). *Органолептический анализ. Методология. Метод треугольника.* М.: Станартинформ.

Получены лабораторные образцы продукта и проведена оценка качества концентратов в соответствии с действующими стандартами.

Сухие рецептурные ингредиенты пропускали через просеиватель марки МППШ-1, оснащенный полиамидными ситами с размерами отверстий 132 мкм (49/52 ПА) и скоростью вращения 360 об/мин. Дозирование рецептурных масс компонентов осуществлялось на весах с регистрирующим устройством. Смешивание осуществлялось в один этап в барабанном смесителе периодического действия СПБ-20 (объемом 220 л). С помощью шнекового подающего транспортера смесь отправляли на фасование в вертикальный фасовочный автомат, где осуществлялась фасовка в пакеты из комбинированных полимерных материалов в асептических условиях, при давлении воздуха 0,1 МПа.

Анализ данных

Для обработки результатов исследований использовали статистический метод обработки экспериментальных данных, в ходе которого определяли среднее значение определяемой величины в 3–5 повторностях, среднеквадратичное отклонение и доверительный интервал.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Путем анализа химического состава растительного сырья выбраны черноплодная рябина, малина и облепиха, являющиеся природными витаминными концентратами.

Проведена сравнительная оценка химического состава свежих ягод (черноплодной рябины, малины и облепихи) и криопорошков на их основе по показателям, характеризующим пищевую ценность (Таблица 1).

Установлено, что криопорошки на основе ягодного сырья максимально сохранили нативные витамины и минеральные вещества. Так, порошок из черноплодной рябины отличается высоким содержанием калия, кальция и железа; в криопорошке малины установлено высокое содержание витамина С и железа, а порошок облепихи отличается высоким содержанием витамина А, С и калия. Таким образом, применение криопорошков в качестве основного рецептурного ингредиента концентратов сухих напитков вполне оправдано. Однако, наши исследования свидетельствуют, что использование только натуральных растительных компонентов не может обеспечить получения обогащенного продукта с регламентируемым содержанием микронутриентов в порции напитка. В связи с этим, в рецептуры концентратов сухих напитков целесообразно добавить витаминно-минеральный премикс, содержащий витамины Е, С, В₁, В₂, В₆, РР, В₉, пантотеновую кислоту, биотин, В₁₂, а также минеральные вещества — цинк и селен. Расчетное количество витаминного премикса вносится по рекомендациям фирмы-изготовителя и составляет 0,13 % от массовой доли основы, что обеспечивает удовлетворение в незаменимых пищевых веществах от 15 до 50% от физиологической нормы потребления.

В качестве подсластителя в рецептуры концентратов напитков на основе черноплодной рябины и облепихи добавлен подсластитель стевиозид. Данный подсластитель термостоек, рН стабилен, не поддается процессу брожения. Кроме того, он не повы-

Таблица 1

Сравнение химического состава сырья в свежем и в порошкообразном виде (мг/100 г)

Сырье	Содержание, мг									
	Витамин С, мг		Витамин А, мкг		Калий, мг		Кальций, мг		Железо, мг	
	свежее сырье	криопорошок	свежее сырье	криопорошок	свежее сырье	криопорошок	свежее сырье	криопорошок	свежее сырье	криопорошок
Черноплодная рябина	40,0	29,2 ± 0,7	200,0	187 ± 20,4	158,0	147 ± 0,9	34,0	21 ± 0,8	1,5	1,4 ± 0,5
Малина	46,2	37,8 ± 0,7	260,0	195 ± 19,8	151,0	145 ± 0,7	25,0	22 ± 0,9	2,9	2,2 ± 0,4
Облепиха	50,4	44,4 ± 0,9	255,0	178 ± 16,5	193,0	187 ± 1,2	22,0	19,7 ± 0,7	1,4	1,2 ± 0,2

Таблица 2

Рецептуры концентратов сухих напитков (г на порцию)

№ п/п	Название компонента	Рецептура концентрата сухого напитка, (г на 1 порцию)		
		На основе малины (рецептура 1)	На основе черноплодной рябины (рецептура 2)	На основе облепихи (рецептура 3)
1	Криопорошок малины	12	3	–
2	Криопорошок рябины черноплодной	–	7	3
3	Крипорошок облепихи	–	–	8
4	Лимонная кислота	0,2	0,2	0,2
5	Подсластитель стевииозид	–	1	1
6	Премикс Customix Immunity	0,05	0,07	0,03
7	Ароматизатор натуральный: «Малина»	0,3	–	–
8	Ароматизатор натуральный: Рябина черноплодная	–	0,5	–
Итого: 1 порция		12,5	11,7	12,2

шает гликемический индекс при попадании в организм, что делает его привлекательным в качестве природного подсластителя для больных сахарным диабетом (Крутошникова & Угер, 2011). Количество подсластителя было добавлено с учетом сладости сырьевых компонентов и рекомендаций фирмы-производителя.

В качестве регулятора кислотности была внесена лимонная кислота, в соответствии с ТР ТС 029/2012²² в количестве 0,2 г на порцию концентрата. В концентраты сухих напитков были добавлены натуральные ароматизаторы: «рябина черноплодная» и «малина» в количествах, разрешенных ТР ТС 029²³, а также с учетом предварительной органолептической оценки. В концентрат с облепихой соответствующий ароматизатор не добавляли, так как в данной рецептуре аромат был ярко выражен.

В Таблице 2 представлены рецептуры концентратов сухих напитков на основе криопорошков.

Таким образом, разработаны рецептуры концентратов сухих напитков на основе растительных криопорошков, в состав которых входят вышеуказанные ингредиенты.

В связи с тем, что концентраты сухих напитков употребляют в восстановленном виде, выбор температуры воды, при которой растворение происходит эффективно, достаточно актуален. При этом, полученный напиток должен иметь хорошую текстуру, не содержать комочков и не расслаиваться. Для выбора оптимальной температуры воды и времени для восстановления концентратов был выбран температурный диапазон от 30°C до 50°C с шагом 5°C. Для эксперимента из каждого концентрата приготовили по 5 образцов напитков и восстанавливали их при выбранных температурах. Критерием оценки служила растворимость готового напитка.

На Рисунке 1 представлена зависимость времени растворения концентратов сухих напитков от температуры воды.

Установлено, что оптимальная температура для растворения концентратов сухих напитков составила 35°C при продолжительности 35 с. За это время концентраты полностью растворяются, имеют хорошую текстуру и не расслаиваются. При температуре ниже 35°C концентраты полностью не растворяются. При данной температуре возможно быстро восстановить концентрат и получить напиток,

²² ТР ТС 029/2012. (2012). *Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств.* <https://docs.cntd.ru/document/902359401>

²³ Там же.

Рисунок 1

Зависимость времени растворения концентратов от температуры воды

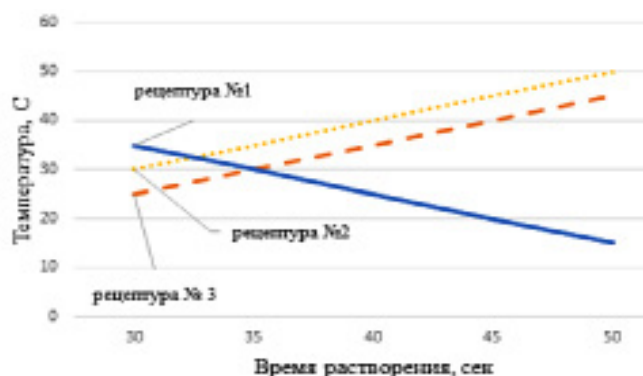
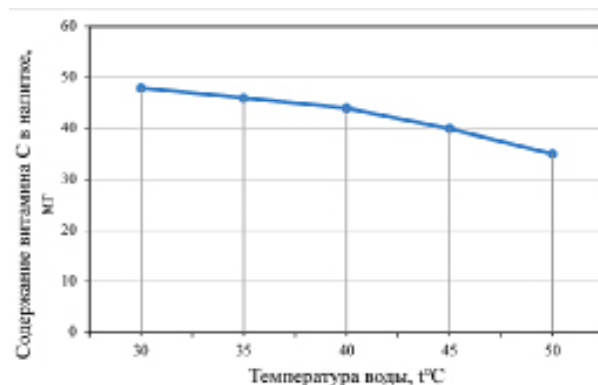


Рисунок 2

Зависимость содержания витамина С от температуры воды при восстановлении концентрата из облепихи



соответствующий стандартам по органолептическим свойствам, однако проблема сохранности биологически-активных веществ остается актуальной. Поэтому, на следующем этапе исследования установлена зависимость между температурой восстановления концентрата и сохранностью витамина С. Для исследований случайным образом выбран образец напитка с облепихой (рецептура 3). Критерием оценки служило количественное содержание витамина С в восстановленном напитке.

На Рисунок 2 представлено содержание витамина С в напитке из облепихи, восстановленном при различных температурах воды.

Наши исследования показали, что при повышении температуры воды для восстановления концентрата содержание витамина С уменьшилось на 13 мг/100 г. При этом, сохранность витамина С составила 73,5%, что согласуется с данными ис-

следования (Яролиева, 2017), где потери витамина С в криопорошке из облепихи при растворении его в воде температурой 35–45° С составило 75%. По-видимому, незначительные потери витамина связаны с хорошей растворимостью криопорошков при незначительной температуре в течении непродолжительного времени.

Концентраты сухих напитков относятся к продуктам длительного хранения, поэтому такие показатели, как влажность и кислотность отвечают за качество и длительность хранения продукта.

Физико-химические показатели и содержание витамина С в составе напитка представлены в Таблице 3.

В дегустации приняли участие 85 студентов четвертого курса Нижегородского Института Пищевых Технологий и Дизайна.

Таблица 3

Физико-химические показатели концентратов сухих напитков на основе криопорошков (на 100 г сухого продукта)

Физико-химические показатели	В соответствии с ГОСТ не более, %	Рецептуры концентратов		
		На основе малины	На основе черноплодной рябины	На основе облепихи
Влажность, %	ГОСТ 15113.4–77 не более 4	3,84	3,76	3,79
Кислотность, см ³ раствора гидроокиси натрия концентрацией 1,0 моль/дм ³ на 100 см ³	ГОСТ 15113.5–77 не более 1,8	1,25	1,5	1,75
Витамин С, мг	ГОСТ 24556–89	43,5 ± 0,35	34,2 ± 0,24	49,2 ± 0,5

Примечание. Из «ГОСТ 15113.4–77. Концентраты пищевые. Методы определения влаги», 2022, Стандартинформ; «ГОСТ 15113.5–77. Концентраты пищевые. Методы определения кислотности», 2003, Стандартинформ; «ГОСТ 24556–89 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С», 2003, Стандартинформ.

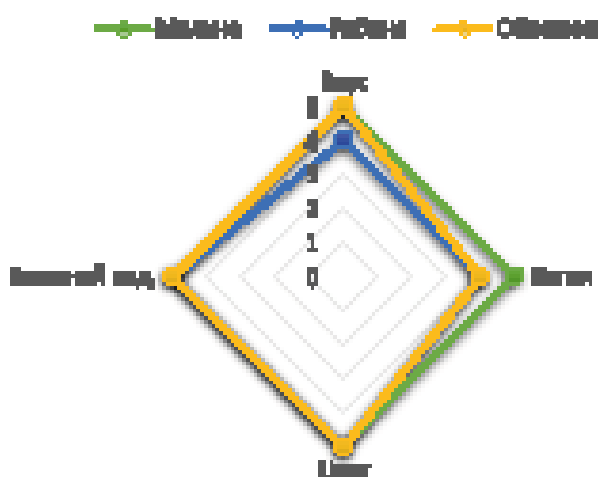
Таблица 4

Балловая оценка восстановленных напитков

Образец	Внешний вид	Цвет	Запах	Вкус	Общая оценка
	Оценка (1–5)	Оценка (1–5)	Оценка (1–5)	Оценка (1–5)	среди 85 чел. в (%)
Малина	5	5	5	5	100
Черноплодная рябина	5	4	5	4	75
Облепиха	5	5	5	5	90

Рисунок 3

Лепестковая диаграмма – балловая оценка качества концентратов сухих напитков



Для проведения эксперимента опытные образцы трех видов концентратов сухих напитков массой 12 г (1 порция) заливали 250 см³ питьевой воды температурой 40 ± 2 °С. Критерием оценки служил

внешний вид, вкус, запах и цвет готового продукта. Оценку проводили балльным методом. Результаты представлены в Таблице 4 и на Рисунке 3.

Самым предпочтительным продуктом, по мнению дегустаторов, оказался напиток с малиной: он набрал наивысшее количество голосов по всем показателям и не получил никаких замечаний.

На втором месте – напиток с облепихой. Так, десять респондентов не были удовлетворены его послевкусием: отмечено, что оно было кислым. Третье место получил напиток с рябиной черноплодной. Тридцать два дегустатора акцентировали свое внимание на наиболее значимых показателях – вкусе, послевкусии и аромате напитка. Однако, некоторым вкус и аромат показались недостаточно выраженными. Вероятно, это связано с недостаточным содержанием ароматизатора в рецептуре.

Учитывая, что концентраты сухих напитков получают по технологии сухого смешивания, без высокотемпературного воздействия, необходима оценка показателей безопасности. Полученные данные представлены в Таблице 5.

Таблица 5

Микробиологические и токсикологические исследования концентратов сухих напитков на основе криопорошков

Наименование показателя	Нормативный документ	Единица измерения	Значение показателя по НТД	Результаты испытаний		
				Рецептуры концентратов		
				№ 1 с малиной	№ 2 с рябиной	№ 3 с облепихой
Свинец	ГОСТ 26932–86	мг/кг	не более 5,0	менее 0,2	менее 0,2	менее 0,2
Мышьяк	ГОСТ 26930–86	мг/кг	не более 3,0	менее 0,1	менее 0,1	менее 0,1
Кадмий	ГОСТ 26933–86	мг/кг	не более 1,0	менее 0,1	менее 0,1	менее 0,1
Ртуть	ГОСТ 26927–86	мг/кг	не более 1,0	менее 0,1	менее 0,1	менее 0,1
ГХЦГ (α, β, γ изомеры)	ГОСТ 30349–96	мг/кг	не более 0,1	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено

Окончание Таблицы 5

Наименование показателя	Нормативный документ	Единица измерения	Значение показателя по НТД	Результаты испытаний		
				Рецептуры концентратов		
				№ 1 с малиной	№ 2 с рябиной	№ 3 с облепихой
ДДТ и его метаболиты	ГОСТ 30349–96	мг/кг	не более 0,1	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено
Гептахлор	ГОСТ 30349–96	мг/кг	не допускается	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено
Алдрин	ГОСТ 30349–96	мг/кг	не допускается	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено
КМАФАИМ	ГОСТ 10444, 15–94	КОЕ/г	не более 1×10^4	$5,9 \times 10^3$	$5,7 \times 10^3$	$5,9 \times 10^3$
БГКП	ГОСТ 31747–2012	г	в 0,1 не допускаются	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено
E.coli	ГОСТ 30726–2001	г	В 1,0 не допускаются	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено
Плесени, КОЕ/г, не более	ГОСТ 10444.12–2013	КОЕ/г	не более 100	менее 10	менее 10	менее 10
Дрожжи, КОЕ/г, не более	ГОСТ 10444.12–2013	КОЕ/г	не более 50	менее 5	менее 5	менее 5

Примечание. Из «ГОСТ 26932–86. Сырье и продукты пищевые. Методы определения свинца», 2010, Стандартинформ; «ГОСТ 26930–86. Сырье и продукты пищевые. Метод определения мышьяка», 2010, Стандартинформ; «ГОСТ 26933–86. Сырье и продукты пищевые. Методы определения кадмия», 2010, Стандартинформ; «ГОСТ 26927–86. Сырье и продукты пищевые. Методы определения ртути», 2010, Стандартинформ; «ГОСТ 30349–96. Плоды, овощи и продукты их переработки. Методы определения остаточных количеств хлорорганических пестицидов», 2008, Стандартинформ; «ГОСТ 10444.15–94. Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов», 2015, Стандартинформ; «ГОСТ 31747–2012. Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий)», 2012, Стандартинформ; «ГОСТ 30726–2001. Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий вида *Escherichia coli*», 2001, Стандартинформ; «ГОСТ 10444.12–2013. Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета количества дрожжей и плесневых грибов», 2013, Стандартинформ.

По результатам микробиологического исследования установлено, что представленные образцы концентратов сухих напитков полностью соответствуют нормативным требованиям. Отмечен незначительный рост микроорганизмов (КМАФАИМ) в исследуемых образцах. Количество дрожжей в 1 г продукта на конец срока годности, КОЕ, не изменялось во всех экспериментальных образцах. Бактерии группы кишечной палочки (Коли формы) в 0,1 г не обнаружены.

Полученные данные согласуются с другими исследователями. Так, по данным (Янковская, 2023) при разработке функциональных продуктов на основе криопорошков, микробиологические исследования соответствовали всем нормативным требованиям. По-видимому, это связано с тем, что криопорошки имеют низкую влажность, а технология их получения позволяет разрабатывать продукты, отличающиеся хорошими органолептическими свойствами, высокой пищевой ценностью

и безопасностью. На следующем этапе исследований планируется подобрать оборудование и отработать технологические режимы получения концентратов сухих напитков, с учетом использования в качестве основного сырья растительных криопорошков.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований были разработаны рецептуры концентратов сухих напитков на основе растительных криопорошков с учетом содержания функциональных ингредиентов в составе напитков с научно обоснованными полезными свойствами, доступностью сырья, высокими органолептическими показателями, отсутствием консервантов и красителей в составе продукта, возможности длительного хранения концентратов без изменения свойств и простоты в приготовлении напитка.

К другим преимуществам готового продукта можно отнести доступную стоимость сырья, а также минимальные затраты на его получение, хранение и транспортировку.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении исследований фирму «Сантевилль» (г. Нижний Новгород) и лабораторию «ФудТест» (г. Москва).

ЛИТЕРАТУРА

- Бакуменко, О. Е. (2013). *Технология обогащенных продуктов питания для целевых групп. Научные основы и технология*. М.: ДеЛи плюс.
- Быстрова, Е. А. (2018). Высокоэффективный способ переработки ягод брусники в технологиях порошкообразных полуфабрикатов. *Пищевая промышленность*, (4), 5–12.
- Гальперина, С. И. (1974). *Физиология человека*. М.: Высшая школа.
- Доронин, А. Ф., Соболева, Н. П., & Пахомова, Т. А. (2011). Комбинированные напитки на соевой основе. *Пищевая промышленность*, (8), 32–33.
- Егорова, С. В., Ахматзиаева, М. М., & Ростегаев, Р. С. (2018). Растительная пища будущего. В *Advanced science: Сборник статей III Международной научно-практической конференции* (т. 2, с. 134–137). Пенза: Наука и просвещение.
- Зверев, С. В., & Зверева, Н. С. (2006). *Функциональные зернопродукты*. М.: ДеЛи Принт.
- Касьянов, Г. И., Семенов, Г. В., Грицких, В. А., & Троянова, Т. Л. (2004). *Сушка сырья и производство сухих завтраков*. М.: МарТ.
- Коденцова, В. М. (2015). *Витамины*. М.: Медицинское информационное агентство.
- Крутошникова, А., & Угер, А. (1988). *Подслащивающие вещества в пищевой промышленности*. М.: Агропромиздат.
- Кухаренко, А. А., Богатырев, А. Н., Короткий, В. М., & Дашев, М. Н. (2008). Научные принципы обогащения пищевых продуктов микронутриентами. *Пищевая промышленность*, (5), 62–63.
- Ломачинский, В. В. (2010). *Разработка технологии плодовоовощных криопорошков и их использование в пищевой промышленности* [Кандидатская диссертация, Кубанский государственный технологический университет]. Краснодар, Россия.
- Ломачинский, В. В., & Касьянов, Г. И. *Технология получения плодовоовощных криопорошков*. Краснодар: Экоинвест.
- Мамиконова, О. А., Крутько, В. Н., & Потемкина, Н. С. (2009). Информационная структура и алгоритмы компьютерной системы «Питание для здоровья и долголетия». *Экология и безопасность жизнедеятельности*, (1), 121–129.
- Остриков, А. Н., Абрамов, О. В., & Рудометкин, А. С. (2004). *Экструзия в пищевых технологиях*. СПб.: Гиорд.
- Скурихин, В. А., Тутельян, В. А., & Скурихина, И. М. (2007). *Таблицы химического состава и калорийности российских продуктов питания*. М.: ДеЛи Принт.
- Спиричев, В. Б., Шатнюк, Л. Н., & Позняковский, В. М. (2005). *Обогащение пищевых продуктов витаминами и минеральными веществами: Монография*. Новосибирск: Сибирское университетское издательство.
- Харламова, О. А., & Кафка, Б. В. (1979). *Натуральные пищевые красители*. М.: Пищевая промышленность.
- Шатнюк, Л. Н., Степанова, Е. Н., Голубкина, Н. А., Сторчевая, Т. Р., & Поляков, В. А. (1987). *Производство витаминизированных безалкогольных напитков в СССР и за рубежом: Обзорная информация*. М.: АгроНИИТЭИПП.
- Янковская, В. С. (2023). *Теоретическое обоснование методологии формирования качества при разработке технологий функциональных структурированных молочных продуктов с криопорошками*. М.: Российский государственный аграрный университет.
- Яролиева, З. А. (2017). *Совершенствование технологии криопорошков из плодов и ягод, выращиваемых в предгорных районах Дагестана*. Краснодар: Кубанский государственный технологический университет.
- Hemila, H. (1997). Vitamin C intake and susceptibility to the common cold. *The British Journal of Nutrition*, 77(1), 59–72. <https://doi.org/10.1017/S0007114500002889>
- Nehring, P., & Krause, H. (1963). *Konserventechnisches Handbuch der Obst und Gemüseverwertungsindustrie*. Sindustrie. Vergal G. Hempel, Braunschweig.
- Valkonen, M. M., & Kuusi, T. (2019). Vitamin C prevents the acute atherogenic effects of passive smoking. *Mediterranean Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 28(3), 428–436. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5805947>

ВКЛАД АВТОРОВ

Щерба Ирина Владимировна: подготовка черновика рукописи.

Бакуменко Олеся Евгеньевна: концептуализация, создание рукописи и ее редактирование, научное руководство исследованием.

Бакуменко Полина Владимировна: проведение исследования, подготовка черновика рукописи.

REFERENCES

- Bakumenko, O. E. (2013). *Tekhnologiya obogashchennykh produktov pitaniya dlya tselevykh grupp. Nauchnye osnovy i tekhnologiya* [Technology of fortified foods for target groups. Scientific foundations and technology]. Moscow: DeLi plus.
- Bystrova, E. A. (2018). Vyskoeffektivnyi sposob pererabotki yagod brusniki v tekhnologiyakh poroshkoobraznykh polufabrikatov [A highly efficient way of processing cranberries in powdered semi-finished products technologies]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], (4), 5–12.
- Doronin, A. F., Soboleva, N. P., & Pakhomova, T. A. (2011). Kombinirovannye napitki na soevoi osnove [Soy-based combination drinks]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], (8), 32–33.
- Egorova, S. V., Akhmatziaeva, M. M., & Rostegaev, R. S. (2018). Rastitel'naya pishcha budushchego [Plant food of the future]. In *Advanced science: Cbornik statei III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Advanced science: Collection of articles of the 3rd International scientific and practical conference] (vol. 2, pp. 134–137). Penza: Nauka i prosveshchenie.
- Gal'perina, S. I. (1974). *Fiziologiya cheloveka* [Human physiology]. Moscow: Vysshaya shkola.
- Jankovskaja, V. S. (2023). *Teoreticheskoe obosnovanie metodologii formirovaniya kachestva pri razrabotke tehnologij funkcional'nykh strukturirovannykh molochnykh produktov s krioporoshkami* [Theoretical substantiation of the methodology of quality formation in the development of technologies for functional structured dairy products with cryopowders]. Moscow: Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet.
- Jarolieva, Z. A. (2017). *Sovershenstvovanie tehnologij krioporoshkov iz plodov i jagod, vyrashhivaemykh v predgornyyh rajonah Dagestana* [Improving the technology of cryopowders from fruits and berries grown in the foothills of Dagestan]. Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet.
- Kas'yanov, G. I., Semenov, G. V., Gritskikh, V. A., & Troyanova, T. L. (2004). *Sushka syr'ya i proizvodstvo sukhikh zavtrakov* [Drying of raw materials and production of breakfast cereals]. Moscow: MarT.
- Kharlamova, O. A., & Kafka, B. V. (1979). *Natural'nye pishchevye krasiteli* [Natural food dyes]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost'.
- Kodentsova, V. M. (2015). *Vitaminy* [Vitamins]. Moscow: Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo.
- Krutoshnikova, A., & Uger, A. (1988). *Podslashchivayushchie veshchestva v pishchevoi promyshlennosti* [Sweetening substances in the food industry]. Moscow: Agropromizdat.
- Kukharenko, A. A., Bogatyrev, A. N., Korotkii, V. M., & Dadashev, M. N. (2008). Nauchnye printsipy obogashcheniya pishchevykh produktov mikronutrientami [Scientific principles of food fortification with micronutrients]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], (5), 62–63.
- Lomachinskii, V. V. (2010). *Razrabotka tekhnologii plodovoshchnykh krioporoshkov i ikh ispol'zovanie v pishchevoi promyshlennosti* [Development of technology of fruit and vegetable cryopowders and their use in the food industry] [Candidate Dissertation, Kubanskii gosudarstvennyj tehnologicheskii universitet]. Krasnodar, Russia.
- Lomachinskii, V. V., & Kas'yanov, G. I. Tekhnologiya polucheniya plodovoovoshchnykh krioporoshkov [Technology of obtaining fruit and vegetable cryopowders]. Krasnodar: Ekoinvest.
- Mamikonova, O. A., Krut'ko, V. N., & Potemkina, N. S. (2009). Informatsionnaya struktura i algoritmy komp'yuternoi sistemy "Pitanie dlya zdorov'ya i dolgoletiya" [Information structure and algorithms of the computer system "Nutrition for health and longevity"]. *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Ecology and Life Safety], (1), 121–129.
- Ostrikov, A. N., Abramov, O. V., & Rudometkin, A. S. (2004). *Ekstruziya v pishchevykh tekhnologiyakh* [Extrusion in food technology]. S-Petersburg: Giord.
- Shatnyuk, L. N., Stepanova, E. N., Golubkina, N. A., Storchevaya, T. R., & Polyakov, V. A. (1987). *Proizvodstvo vitaminizirovannykh bezalkogol'nykh napitkov v SSSR i za rubezhom: Obzornaya informatsiya* [Production of fortified soft drinks in the USSR and abroad: Overview]. Moscow: AgroNIITEIPP.
- Skurikhin, V. A., Tutel'yan, V. A., & Skurikhina, I. M. (2007). *Tablitsy khimicheskogo sostava i kaloriinosti rossiiskikh produktov pitaniya* [Tables of chemical composition and calorific content of Russian food]. Moscow: DeLi Print.
- Spirichev, V. B., Shatnyuk, L. N., & Poznyakovskii, V. M. (2005). *Obogashchenie pishchevykh produktov vitaminami i mineral'nymi veshchestvami: Monografiya* [Fortification of food products with vitamins and minerals: Monograph]. Novosibirsk: Sibirskoe universitetskoe izdatel'stvo.
- Zverev, S. V., & Zvereva, N. S. (2006). *Funktsional'nye zernoprodukty* [Functional grain products]. Moscow: DeLi Print.
- Hemila, H. (1997). Vitamin C intake and susceptibility to the common cold. *The British Journal of Nutrition*, 77(1), 59–72. <https://doi.org/10.1017/S0007114500002889>
- Nehring, P., & Krause, H. (1963). *Konserventechnisches Handbuch der Obst und Gemüßeverwertungsindustrie*. Sindustrie. Vergal G. Hempel, Braunschweig.
- Valkonen, M. M., & Kuusi, T. (2019). Vitamin C prevents the acute atherogenic effects of passive smoking. *Mediterranean Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 28(3), 428–436. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5805947>

УДК 663.8

Создание функциональных кисломолочных продуктов на основе новых штаммов молочнокислых бактерий с высокими органолептическими показателями

М. С. Каночкина^{1,2}, М. Г. Шипарева¹, А. С. Билялова³, Н. Б. Смирнов¹

¹ Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью «Микробные нутриенты иммунокорректоры», г. Москва, Россия

³ ФИЦ питания и биотехнологии, г. Москва, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Каночкина Мария Сергеевна
E-mail: kanoch@yandex.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Каночкина, М.С., Шипарева, М.Г., Билялова, А.С., & Смирнов, Н.Б. (2023). Создание функциональных кисломолочных продуктов на основе новых штаммов молочнокислых бактерий с высокими органолептическими показателями. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 176-186. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.369>

ПОСТУПИЛА: 15.03.2023

ПРИНЯТА: 03.07.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: В статье рассматриваются современные проблемы раздела функционального питания и продуктов, способствующих профилактике дисбиотических состояний организма. Актуальным направлением является расширение функциональных свойств кисломолочных продуктов за счет скрининга новых штаммов заквасочных культур, оптимизации технологических приемов, в том числе подбора эффективных матриц-носителей для пробиотических микроорганизмов, и сохранении их жизнеспособности. При этом необходимые для профилактического действия уровни колониеобразующих единиц молочнокислых бактерий встречаются достаточно редко в пищевых продуктах, представленных на российском рынке, также необходимо обратить внимание на органолептические характеристики вновь создаваемых продуктов в связи с высокими титрами микроорганизмов, образующих молочную кислоту и другие подкисляющие pH метаболиты.

Цель: Создать образцы биопродукта с функциональными свойствами на основе молочнокислых бактерий с высокими органолептическими характеристиками, соответствующими требованиями ТР ТС 033/2013, и уровнем жизнеспособных клеток микроорганизмов не менее 10^{11} КОЕ/см³.

Материалы и методы: Объектом исследования были вышеуказанные образцы кисломолочных продуктов. При этом в первую очередь был произведен скрининг пробиотических штаммов из коллекции ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ», на основе отобранных штаммов изготовлены образцы кисломолочного пробиотического продукта по стандартной методике с использованием в качестве матрицы-носителя — молока пастеризованного, с массовой долей жира — 1,5%, далее были оценены органолептические свойства полученных образцов и уровень жизнеспособности клеток пробиотических микроорганизмов.

Результаты: Количество колониеобразующих единиц пробиотических микроорганизмов в приготовленных напитках составило от $2,8 \times 10^{12}$ до $1,5 \times 10^{13}$ КОЕ/см³, что является высокими значениями и способствует увеличению профилактического воздействия на макроорганизм. Лучшими органолептическими показателями обладали образцы 2407 (б), 6769, 2523, то есть в 2-х вариантах из 3-х использован штамм вида *Lactococcus lactis*, при этом все образцы соответствовали требованиям ТР ТС 033/2013.

Выводы: Получены образцы функциональных пробиотических напитков на основе 5 штаммов молочнокислых бактерий, разрешенных и предлагаемых к использованию в пищевой промышленности согласно СанПиН 2.3.2.1078-01. «Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов», с уровнем жизнеспособных клеток не ниже 10^{12} КОЕ/см³, что позволяет рассматривать образцы в качестве прототипов функциональных пищевых продуктов для применения в реальной практике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

микробиота кишечника, пробиотик, молочнокислые бактерии (МКБ), функциональный продукт, кисломолочный продукт, органолептические свойства, качество продукции, пищевая биотехнология

Creation of Functional Fermented Milk Products Based on New Strains of Lactic Acid Bacteria with High Organoleptic Characteristics

¹ Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russia

² Limited liability company «Microbial nutrients immunocorrectors», Moscow, Russia

³ Federal State Budgetary Institution of Science «Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety», Moscow, Russia

Marya S. Kanochkina^{1,2}, Marya G. Shipareva¹, Anastasia S. Bilyalova³, Nikolay B. Smirnov¹

CORRESPONDENCE:

Marya S. Kanochkina

E-mail: kanoch@yandex.ru

FOR CITATIONS:

Kanochkina, M.S., Shipareva, M.G., Bilyalova, A.S., & Smirnov, N.B. (2023). Creation of Functional Fermented Milk Products Based on New Strains of Lactic Acid Bacteria with High Organoleptic Characteristics. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 176-186. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.369>

RECEIVED: 15.03.2023

ACCEPTED: 03.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Background: The article deals with modern problems of functional nutrition and products that contribute to the prevention of dysbiotic conditions of the body. The current direction is to expand the functional properties of fermented milk products by screening new strains of starter cultures, optimizing technological techniques, including the selection of effective carrier matrices for probiotic microorganisms, and preserving their viability. At the same time, the levels of colony-forming units of lactic acid bacteria necessary for preventive action are quite rare in food products presented on the Russian market, it is also necessary to pay attention to the organoleptic characteristics of newly created products due to the high titers of microorganisms forming lactic acid and other pH-acidifying metabolites.

Purpose: The aim of the study is to create samples of a biological product with functional properties based on lactic acid bacteria with high organoleptic characteristics that meet the requirements of TR CU 033/2013, and the level of viable microbial cells of at least 10^{11} CFU/cm³.

Materials and Methods: The object of the study were the above samples of fermented milk products. At the same time, first of all, probiotic strains from the collection of ROSBIOTECH were screened, samples of fermented milk probiotic product were made on the basis of the selected strains according to the standard procedure using pasteurized milk with a mass fraction of fat – 1.5 % as a carrier matrix, then the organoleptic properties of the samples obtained and the level of cell viability were evaluated probiotic microorganisms.

Results: The number of colony-forming units of probiotic microorganisms in the prepared beverages ranged from 2.8×10^{12} to 1.5×10^{13} CFU/cm³, which is high values and contributes to an increase in the preventive effect on the macroorganism. Samples 2407 (b), 6769, 2523 had the best organoleptic characteristics, that is, in 2 variants out of 3, a strain of the species *Lactococcus lactis* was used, while all samples met the requirements of TR CU 033/2013.

Conclusion: Samples of functional probiotic drinks based on 5 strains of lactic acid bacteria, approved and offered for use in the food industry according to sanitary norms and rules 2.3.2.1078-01, were obtained. «Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products», with a level of viable cells not lower than 10^{12} CFU/cm³, which allows us to consider samples as prototypes of functional food products for use in real practice.

KEYWORDS

gut microbiota, probiotics, lactic acid bacteria, functional product, fermented milk product, organoleptic properties, product quality, food biotechnology

ВВЕДЕНИЕ

Современная наука о медицине и здоровьесбережении опирается на понятие оптимального питания, подразумевающее наличие в ежедневном рационе функциональных продуктов питания, способствующих профилактике заболеваний и улучшению самочувствия. Функциональные продукты создаются для восстановления микробиологического баланса человека, дисбиотических нарушений и повышения иммунитета. Наибольшей ценностью с точки зрения физиологии питания, обладают молочные продукты с функциональными свойствами (Trush et al., 2020; Zommiti et al., 2020). Увеличение функциональной составляющей этих продуктов из-за использования при производстве различных штаммов заквасочных и других микроорганизмов считается направлением, имеющим большие перспективы (Wang et al., 2021; Wang et al., 2012).

В этой связи пробиотические микроорганизмы все чаще включаются в пищевые продукты, чтобы обеспечить потребителю предполагаемую пользу для здоровья путем модулирования микробиома кишечника. Микробиота кишечника и/или взаимодействие между микробиотой и иммунной системой хозяина участвуют в патогенезе воспалительного заболевания кишечника (Abraham & Quigley, 2017). В США проведены исследования роли кишечной микробиоты в патогенезе функциональных расстройств кишечника при инфекционных заболеваниях и изучена клиническая эффективность бактерий рода *Lactobacillus*, *Lactococcus* и *Bifidobacterium* (Ringel-Kulka et al., 2011). По полученным данным в ходе двойного слепого плацебо-контролируемого клинического исследования пробиотических бактерий, при применении вышеуказанных бактериальных культур в течение 8-ми недель два раза в день в общей дозе не менее 2×10^{11} КОЕ/день достигается улучшение симптомов вздутия живота у пациентов, облегчение желудочно-кишечных симптомов и удовлетворенность лечением. Необходимо отметить, что такие значения содержания жизнеспособных МКБ встречаются достаточно редко в пищевых продуктах, представленных на российском рынке.

Технико-функциональные ограничения, такие как контроль жизнеспособности, препятствуют полному потенциальному применению пробиотических микроорганизмов в пищевой отрасли. В этом

контексте одной из основных проблем является обеспечение выживания пробиотических клеток при физических и химических воздействиях во время их приема и последующего прохождения через желудочно-кишечный тракт в кишечник или соответствующее увеличение дозы пробиотика. При этом, применяемые в фармацевтической отрасли технологии инкапсулирования (Centurion et al., 2021, Gao et al., 2021), «капсула в капсуле» (Venema et al., 2020), «рН чувствительных таблеток» (Jiang et al., 2017; Jalc et al., 2015), не могут использоваться при производстве продуктов питания.

В этой области исследования сосредоточены на улучшении традиционных методов культивирования и технологии получения пищевых пробиотических продуктов для достижения высокой жизнеспособности клеток, а также более длительного срока хранения. Основными направлениями могут быть использование высокопродуктивных штаммов МКБ и соответствующих матриц-носителей, оказывающих значительное влияние на качество пробиотических продуктов. Показано (Flach et al., 2018; Mozaffarian, 2019), что компоненты матрицы пищевого продукта, такие как белки, углеводы, изменяют эффективность и жизнеспособность пробиотиков. Кроме того, исследования *in vivo* выявили зависимость выживаемости пробиотических бактерий в желудочно-кишечном тракте от основного компонента продукта.

Одним из главных пунктов при создании биопрепаратов с функциональными свойствами остается подбор правильных штаммов МКБ и их последующая непрерывная селекция для максимально эффективного сквашивания молока. Представители индигенной микрофлоры, полученные из естественных источников, прошедшие стабилизирующий отбор, являются самыми подходящими для этих целей (Квасников & Нестеренко, 1975; Квасников & Нестеренко, 1966). Именно по этой причине нами были отобраны 5 штаммов из коллекции Российского биотехнологического университета (РОСБИОТЕХ), выделенные из коровьего молока. К современным технологиям, обеспечивающим видовую идентификацию, относят протеомный анализ, включающий в себя матрично-активированную лазерную десорбционную/ионизационную время пролетную масс-спектрометрию — MALDI-TOF MS (Duskova et al., 2012). На данный момент существуют технологии выделения бел-

ковых масс-спектров на уровне видов и подвидов микроорганизмов, это позволяет создать базис для применения масс-спектрометрии как метода идентификации и типирования микроорганизмов по белковому рибосомальному профилю (Jones et al., 2003; Ильина, 2009).

Цель данного исследования — создать образцы биопродукта с функциональными свойствами на основе МКБ с высокими органолептическими характеристиками, соответствующими требованиями ТР ТС 033/2013, и уровнем жизнеспособных клеток микроорганизмов не менее 10^{11} КОЕ/см³. Исследовательские задачи:

- (1) Провести скрининг штаммов МКБ из коллекции ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», подходящих для получения пробиотического продукта;
- (2) Изготовить образцы кисломолочного пробиотического продукта функционального назначения с использованием отобранных микроорганизмов.
- (3) Оценить уровень жизнеспособных клеток пробиотических микроорганизмов и органолептические показатели полученного продукта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научно-исследовательская работа проводилась на базе кафедры «Биотехнология и технология продуктов биоорганического синтеза» ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» и научно-исследовательской организации ООО «Микробные нутриенты иммунокорректоры».

Материалы

Субстраты, среды

В качестве жидкой среды для накопления микроорганизмов было использовано молоко пастеризованное, с массовой долей жира — 1,5%. В качестве плотной питательной среды для разделения отдельных колоний был использован MRS-агар для лактобактерий.

Штаммы

В качестве продуцентов пробиотических микроорганизмов использовались штаммы родов *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Lactobacillus* из коллекции ФГБОУ ВО РОСБИОТЕХ.

Методы и процедура исследования

Приготовление пищевого продукта (напитка)

В колбы объемом 500 см³ было добавлено 50 см³ молока коровьего, стерилизация осуществлялась в паровом автоклаве при 1,0 атм в течение 15 мин. Затем в колбу вносили 5 см³ суспензии суточных пробиотических микроорганизмов в стерильном молоке. Посевная доза микроорганизмов составила не менее 1×10^6 КОЕ/см³. Затем полученный напиток помещали в термостат для культивирования на 72 ч при температуре 30 ± 2 °C или 37 ± 2 °C в зависимости от используемого штамма микроорганизма и условий его оптимального роста.

Исследование органолептических показателей готового продукта

Для оценки качества и органолептических показателей была проведена оценка профильным методом с привлечением экспертов на кафедре «Биотехнология и технология продуктов биоорганического синтеза» ФГБОУ ВО РОСБИОТЕХ, а также методом потребительской оценки.

Исследование свойств готового продукта

pH продукта определяли по стандартной методике на pH-метре HANNA pH 211. Титруемую кислотность определяли по стандартной методике, согласно ГОСТ 3624–92. путем титрования пробы продукта 0,1 Н раствором едкого натра в присутствии фенолфталеина в качестве индикатора¹.

Анализ данных

Количественный подсчет МКБ осуществляли методом предельных разведений по стандартной методике, разведения повторяли до 10^{11} раз, из 3 последних проводили пересев на агаризован-

¹ ГОСТ 3624–92. (1992). *Молоко и молочные продукты: Титриметрические методы определения кислотности*. М.: Госстандарт.

ную среду MRS и культивировали при температуре $30 \pm 2^\circ\text{C}$ или $37 \pm 2^\circ\text{C}$ в зависимости от используемого штамма микроорганизма и условий его оптимального роста. Для количественного определения молочнокислых микроорганизмов в единице продукта, среднее значения числа выросших колоний умножали на степень разведения².

Эксперимент проводился в 3-х повторностях. Статистическую обработку результатов исследований проводили с применением методов математического анализа и определения среднего значения искомой величины из 3-х повторностей, среднеквадратичного отклонения и доверительного интервала. Использовали программный пакет Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для достижения поставленной в исследовании цели — создать образцы биопродукта с функциональными свойствами на основе МКБ с высокими органолептическими характеристиками, соответствующими требованиями ТР ТС 033/2013³, и уровнем жизнеспособных клеток микроорганизмов не менее 10^{11} КОЕ/см³ — необходимо провести скрининг коллекционных штаммов, способных к активному росту на молочных средах и относящихся к разным видам МКБ. В этой связи данная секция разбита на следующие тематические блоки: скрининг коллекционных штаммов, показатели КОЕ пробиотического биопродукта, органолептическая и потребительская оценка биопродукта.

Скрининг коллекционных штаммов

Было отобрано 5 штаммов микроорганизмов, относящихся к разным видам МКБ, соответствующих цели исследования и идентифицированных методом MALDI-TOF MS. Все отобранные штаммы являются облигатными представителями микрофлоры животных — выделены из коровьего молока. Наименование используемых штаммов представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Видовая идентификация отобранных микроорганизмов

№ штамма	Видовая принадлежность
6769	<i>Enterococcus faecium</i>
2407	<i>Lactococcus lactis</i>
2407 (6)	<i>Lactobacillus plantarum</i>
65062	<i>Lactococcus lactis</i>
2523	<i>Lactococcus lactis</i>

Многочисленные исследования (Battistini et al., 2018; Ouzari et al., 2002, Gaudu et al., 2019; Haghshenas et al., 2015; Nagaoka, 2019) показывают, что данные виды пробиотических микроорганизмов применяются для разработки инновационных синбиотических и пробиотических продуктов, при этом зафиксированы специфический вкус, текстура получаемого продукта и высокая пищевая ценность. Кроме того, вид *Lactococcus lactis* применяется для создания новейших медицинских и профилактических биопрепаратов с использованием цельных клеток микроорганизмов в качестве вектора доставки в реальном времени для введения терапевтических средств как против инфекционных, так и неинфекционных заболеваний (Song et al., 2017), что также обосновывает перспективность нашего выбора.

Необходимо отметить, что различные штаммы всех видов идентифицированных микроорганизмов используются в качестве пробиотических культур в пищевой промышленности, в том числе в виде комплексных заквасочных культур, и входят в перечень микроорганизмов, разрешенных и предлагаемых к использованию в пищевой промышленности согласно СанПиН 2.3.2.1078–01. «Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов», что подтверждает возможность их использования для изготовления функционального продукта.

² ГОСТ 33951–2016. (2016). *Продукты пищевые. Методы определения молочнокислых микроорганизмов*. М.: Стандартинформ.

³ ТР ТС 033/2013. (2013). *Технический регламент Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции»*. <https://docs.cntd.ru/document/499050562>

Показатели КОЕ пробиотического биопродукта

Пробиотические продукты были изготовлены стандартным методом сквашивания МКБ стерильного молока. При этом количество колониеобразующих единиц (далее — КОЕ) в готовом продукте имеет важное значение, поскольку определяет больший процент возможности пролиферации жизнеспособных клеток пробиотического микроорганизма в кишечнике после экстремальных условий желудка. Соответственно, при попадании МКБ в кишечник в жизнеспособном состоянии и достаточном количестве для пролиферации, они способны восстанавливать микрофлору макроорганизма.

Подсчет количества живых бактериальных клеток осуществлялся методом предельных разведений, данные по концентрации КОЕ/см³ в каждом из образцов напитка представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Количество колониеобразующих единиц пробиотического микроорганизма в приготовленных напитках

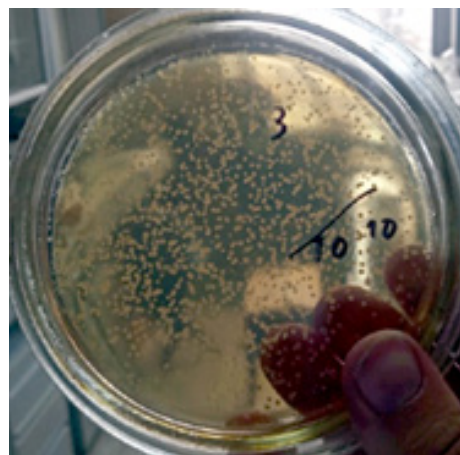
№ образца	Количество клеток, КОЕ/см ³
6769	$1,5 \times 10^{13}$
2407 (б)	$2,8 \times 10^{12}$
2407	$5,2 \times 10^{12}$
65062	$2,9 \times 10^{12}$
2523	$4,5 \times 10^{12}$

На Рисунке 1 представлен рост колоний на MRS-среде, высеванный с образца 2407 с разведения 10^{10} .

Данные показатели свидетельствуют об активном росте отобранных штаммов в молоке, наиболее высокие значения достигнуты при использовании образцов 2407, 2436 и 2523. Полученные результаты коррелируют с данными исследований (Sanders & Marco, 2012), в которых показано, что компоненты молока или полностью молочная основа, могут улучшить выживаемость пробиотиков в течение срока годности пищевых продуктов и повысить эффективность пробиотиков за счет увеличения их дозы. Необходимо отме-

Рисунок 1

Рост колоний штамма МКБ № 2407, разведение 10^{10}



тить, что на российском рынке пробиотических продуктов в основном представлены промышленными образцы с содержанием лакто и бифидобактерий — не более 10^9 КОЕ/см³. Всё это позволяет рассматривать отобранные новые штаммы микроорганизмов как пробиотики, потенциально пригодные для использования в пищевой промышленности.

Органолептическая и потребительская оценка биопродукта

Создание напитков с пробиотическими свойствами на основе отобранных МКБ требует соблюдения соответствия органолептических показателей идентификации продуктов переработки молока в соответствии с требованиями ТР ТС 033/2013⁴. Исследователи (Гусева и соавт., 2021; Яннаева & Солдатова, 2015) отмечают особенности органолептической оценки кисломолочной продукции и необходимость разработки специальных критериев. Все 5 вариантов напитков, с использованием различных отобранных культур микроорганизмов, использовали для проведения органолептической оценки по 5-балльной шкале с применением различных дескрипторов, разработанных на кафедре «Биотехнология и технология продуктов биоорганического синтеза» РОСБИОТЕХ для оценки функциональных кисломолочных напитков.

⁴ ТР ТС 033/2013. (2013). *Технический регламент Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции»*. <https://docs.cntd.ru/document/499050562>

Таблица 3

Шкала оценки качества

Дескриптор	Не воспринимается	Слабо	Довольно слабо	Средне	Довольно сильно	Сильно
	0	1	2	3	4	5

Положительные дескрипторы: молочный вкус, цвет, однородность.

Нейтральные дескрипторы: вязкость.

Отрицательные дескрипторы: пузырьки газа, комочки, разделение фаз.

Значения дескрипторов для оценки качества пробиотического продукта представлены в Таблице 3.

С целью установления характеристик изготовленных напитков была проведена органолептическая оценка указанных напитков методом открытой дегустации. Результаты оценки специфических характеристик изготовленных пробиотических напитков представлена в Таблице 4.

Экспертами было отмечено что образцы №2407 (б) и №2523 по своим свойствам наиболее соответствуют густому кефиру, и обладают удовлетворительными органолептическим показателям. Образец №6769 обладает наиболее приятными органолептическим показателями за исключением однородности.

Помимо экспертной дегустации проводилась также и потребительская оценка. На основании полученных данных по каждому образцу рассчитывалась средние значения желательности показателей:

цвет, вкус, запах, текстура, внешний вид. Оценка проводилась по 5-ти бальной шкале. В результате была составлена профильная диаграмма для образцов функционального напитка представленная на Рисунке 2.

Исходя из имеющихся данных лучшими органолептическими показателями обладали образцы 2407 (б), 6769, 2523, то есть в 2-х вариантах из 3-х использован штамм вида *Lactococcus lactis*. Проведенные в США исследования (Kleerebezem et al., 2020; Cavanagh et al., 2015; Cesselin et al., 2018) показывают, что этот вид пробиотического микроорганизма преимущественно используется в пищевой

Рисунок 2

Профильная диаграмма органолептических показателей полученных функциональных напитков

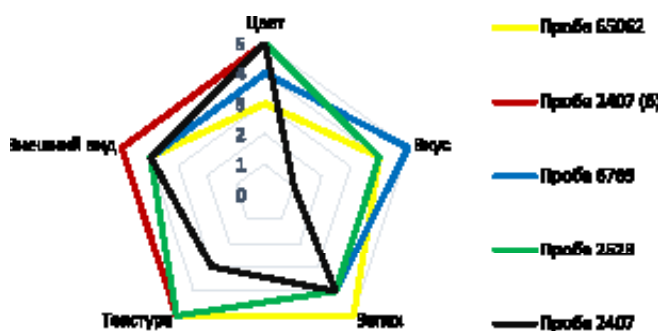


Таблица 4

Оценка специфических характеристик проб напитков

Характеристики	№ 65062	№ 2407 (б)	№ 6769	№ 2523	№ 2407
Молочный вкус	3	3	5	3	0
Цвет	4	5	3	3	2
Комочки	0	0	3	1	1
Вязкость	0	4	2	4	0
Разделение фаз	0	1	2	1	0
Однородность	5	5	2	4	3

Рисунок 3

Зависимость pH напитков от времени сквашивания

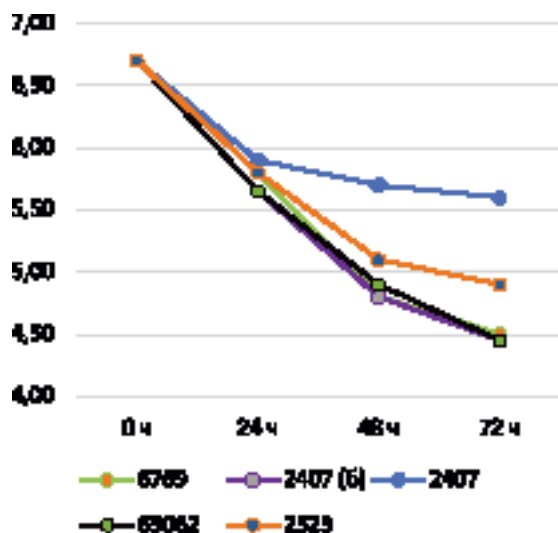
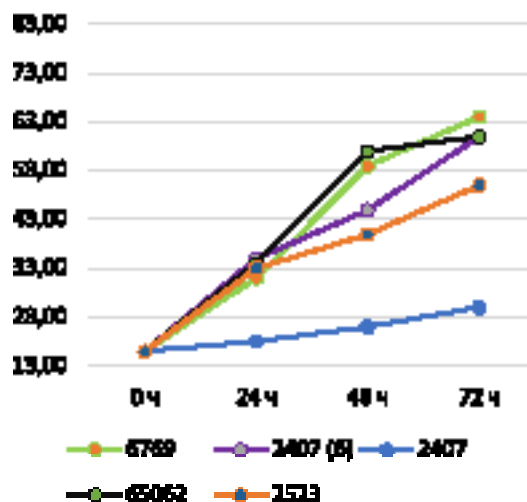


Рисунок 4

Зависимость активной кислотности (в градусах Тернера) от времени сквашивания



и биотехнологической промышленности из-за его способности в процессе ферментации производить молочную кислоту и соответствующий аромат в получаемых продуктах. Вышеуказанные данные подтверждают полученные нами результаты органолептической оценки напитков.

В готовых напитках измеряли также pH и титруемую кислотность, графики динамического изменения значений представлены на Рисунках 3 и 4.

Полученные данные свидетельствуют, что уже через 24 часа начинается падение pH, что соответствует закислению среды в процессе развития культур МКБ, и росту активной кислотности. При этом конечные значения для всех образцов отвечают требованиям ТР ТС 033/2013⁵.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований выявлены высокопродуктивные МКБ, способные активно расти на молочной среде и достигать уровня жизнеспособных клеток пробиотического микроорганизма не ниже 10^{12} КОЕ/см³. Получены образцы функци-

ональных пробиотических напитков на основе 5 штаммов молочнокислых бактерий. Произведена оценка физико-химических и органолептических свойств напитков, все образцы отвечают требованиям ТР ТС 033/2013⁶, однако наиболее приятными для потребителя органолептическими показателями обладают образцы 2407 (б), 6769, 2523.

Необходимо отметить ограничения исследования, которые могут влиять на выбор дальнейших шагов по коммерциализации полученных результатов: использование в скрининге только определенных оптимальных видов МКБ, молочная субстратная матрица без добавок и стандартные условия культивирования. Учитывая вышеуказанные параметры дальнейшие исследования могут быть направлены на подбор оптимальных условий культивирования и функциональную модификацию субстратной матрицы, а также изучение выживаемости отобранных штаммов микроорганизмов, показавших наилучшие результаты, в условиях, моделирующих все отделы желудочно-кишечного тракта: кислая среда в течение первых 4-х часов и щелочная далее, наличие соответствующих концентраций солей, желчных кислот, ферментов.

⁵ ТР ТС 033/2013. (2013). *Технический регламент Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции»*. <https://docs.cntd.ru/document/499050562>

⁶ Там же.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают подлинную благодарность за помощь в проведении исследований, организационную и методическую поддержку кафедре «Биотехнология и технология продуктов биоорганического синтеза» РОСБИОТЕХ и научно-исследовательской организации Обществу с ограниченной ответственностью «Микробные нутриенты иммунокорректоры».

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Каночкина Мария Сергеевна: концептуализация, разработка методологии исследования, научное

руководство исследованием, проведение исследования, создание рукописи и её редактирование

Шипарева Марья Герасимовна: валидация данных, создание черновика рукописи, курирование данных, работа с программным обеспечением, визуализация

Билялова Анастасия Сергеевна: проведение исследования, валидация данных, редактирование рукописи, создание черновика рукописи

Смирнов Николай Борисович: проведение исследования, создание черновика рукописи

ЛИТЕРАТУРА

- Гусева, Т. Б., Солдатова, С. Ю., & Караньян, О. М. (2021). Органолептическая оценка молочных консервов: Особенности проведения и интерпретации результатов. *Товаровед продовольственных товаров*, (10), 726–729. <https://doi.org/10.33920/igt-01-2110-01>
- Ильина, Е. Н. (2009). Прямое МАЛДИ масс-спектрометрическое профилирование бактериальных белков для индикации и характеристики патогенов. *Acta naturae*, (1), 115–121.
- Квасников, Е. И., & Нестеренко, О. А. (1966). *Некоторые вопросы систематики молочнокислых бактерий. Успехи микробиологии*. М.: Наука.
- Квасников, Е. И., & Нестеренко, О. А. (1975). *Молочнокислые бактерии и пути их использования*. М.: Наука.
- Яннаева, О. С., & Солдатова, С. Ю. (2015). Система оценки качества кисломолочной продукции на примере йогурта натурального. В *День науки: Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов, сборник материалов* (с. 298–301). Орехово-Зуево: Государственный гуманитарно-технологический университет.
- Abraham, B. P., & Quigley, E. M. (2017). Probiotics in inflammatory bowel disease. *Gastroenterology Clinics of North America*, 46(4), 769–782. <https://doi.org/10.1016/j.gtc.2017.08.003>
- Battistini, C., Gullón, B., Ichimura, E. S., Gomes, A. M. P., Ribeiro, E. P., Kunigk, L., Moreira, J. U. V., & Jurkiewicz, C. (2018). Development and characterization of an innovative symbiotic fermented beverage based on vegetable soybean. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(2), 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.08.006>
- Cavanagh, D., Fitzgerald, G. F., & McAuliffe, O. (2015). From field to fermentation: the origins of *Lactococcus lactis* and its domestication to the dairy environment. *Food Microbiology*, 47, 45–61. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.11.001>
- Centurion, F., Basit, A. W., Liu, J., Gaisford, S., Rahim, M. A., & Kalantar-Zadeh, K. (2021). Nanoencapsulation for probiotic delivery. *ACS Nano*, 15(12), 18653–18660. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c09951>
- Cesselin, B., Garrigues, C., Pedersen, M. B., Roussel, C., Gruss, A., & Gaudu, P. (2018). Task distribution between acetate and acetoin pathways to prolong growth in *Lactococcus lactis* under respiration conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(18), Article e01005–18. <https://doi.org/10.1128/AEM.01005-18>
- Duskova, M., Sedo, O., Ksicova, K., Zdrahal, Zb., & Karpiskova, R. (2012). Identification of lactobacilli isolated from food by genotypic methods and MALDI-TOF MS. *International Journal of Food Microbiology*, 159, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.07.029>
- Flach, J., van der Waal, M. B., van den Nieuwboer, M., Claassen, E., & Larsen, O. A. (2018). The underexposed role of food matrices in probiotic products: Reviewing the relationship between carrier matrices and product parameters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(15), 2570–2584. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1334624>
- Gao, Y., Wang, X., Xue, C., & Wei, Z. (2021). Latest developments in food-grade delivery systems for probiotics: A systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 8, Article 1640. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2001640>
- Gaudu, P., Yamamoto, Y., Jensen, P. R., Hammer, K., Lechardeur, D., & Gruss, A. (2019). Genetics of lactococci. *Microbiology Spectrum*, 7(4), Article 035. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.GPP3-0035-2018>
- Haghshenas B., Nami Y., Haghshenas M., Abdullah N., Rosli R., Radiah D., & Khosroushahi, A. Y. (2015). Bioactivity characterization of *Lactobacillus* strains isolated from dairy products. *Microbiology Open*, 4(5), 803–813. <https://doi.org/10.1002/mbo3.280>

- Jalc, D., Varadyova, Z., Mihalikova, K., & Laukova, A. (2015). Nutritional status of corn silage after probiotic conservation. *Journal of Applied Animal Research*, 43(2), 141–146. <https://doi.org/10.1080/09712119.2014.928629>
- Jiang, T., Li, H., Han, G. G., Singh, B., Kang, S., Bok, J., Kim, D., Hong, Z., Choi, Y., & Cho, C. (2017). Oral delivery of probiotics in poultry using PH-sensitive tablets. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27(4), 739–746. <https://doi.org/10.4014/jmb.1606.06071>
- Jones, J. J., Stump, M. J., Fleming, R. C., Lay, J. O., & Wilkins, C. L. (2003). Investigation of MALDI-TOF and FT-MS techniques for analysis of *Escherichia coli* whole cells. *Science Journal of Analytical Chemistry*, 75(6), 1340–1347. <https://doi.org/10.1021/ac026213j>
- Kleerebezem, M., Bachmann, H., van Pelt-KleinJan, E., Douwenga, S., Smid, E. J., Teusink, B., & van Mastrigt, O. (2020). Lifestyle, metabolism and environmental adaptation in *Lactococcus lactis*. *FEMS Microbiology Reviews*, 44(6), 804–820. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa033>
- Mozaffarian, D. (2019). Dairy foods, obesity, and metabolic health: The role of the food matrix compared with single nutrients. *Advances in Nutrition*, 10(5), 917S–923S. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz053>
- Nagaoka, S. (2019). Yogurt production. *Methods in Molecular Biology*, 1887, 45–54. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8907-2_5
- Ouzari, H., Cherif, A., & Mora, D. J. (2002). Autolytic phenotype of *Lactococcus lactis* strains isolated from traditional Tunisian dairy products. *Journal of Applied Microbiology*, 92(5), 812–820. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2002.01585.x>
- Ringel-Kulka, T., Palsson, O. S., Maier, D., Carroll, I., Galanko, J. A., Leyer, G., & Ringel, Y. (2011). Probiotic bacteria *Lactobacillus acidophilus* NCFM and *Bifidobacterium lactis* Bi-07 versus placebo for the symptoms of bloating in patients with functional bowel disorders: A double-blind study. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 45(6), 518–525. <https://doi.org/10.1097/MCG.0b013e31820ca4d6>
- Sanders, M. E., & Marco, M. L. (2010). Food formats for effective delivery of probiotics. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1, 65–85. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.080708.100743>
- Song, A. A., In, L. L. A., Lim, S. H. E., & Rahim, R. A. (2017). A review on *Lactococcus lactis*: From food to factory. *Microbial Cell Factories*, 16(1), Article 55. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0669-x>
- Trush, E. A., Poluektova, E. A., Beniashvilli, A. G., Shifrin, O. S., Poluektov, Y., & Ivashkin, V. T. (2020). The evolution of human probiotics: Challenges and prospects. *Probiotics Antimicrobial Proteins*, 12(4), 1291–1299. <https://doi.org/10.1007/s12602-019-09628-4>
- Venema, K., Verhoeven, J., Beckman, C., & Keller, D. (2020). Survival of a probiotic-containing product using capsule-within-capsule technology in an in vitro model of the stomach and small intestine (TIM-1). *Beneficial Microbes*, 11(4), 403–409. <https://doi.org/10.3920/BM2019.0209>
- Wang, J., Zhong, Z., Zhang, W., Bao, Q., Wei, A., Meng, H., & Zhang, H. (2012). Comparative analysis of the gene expression profile of probiotic *Lactobacillus casei* Zhang with and without fermented milk as a vehicle during transit in a simulated gastrointestinal tract. *Research in Microbiology*, 163(5), 357–365. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2012.04.002>
- Wang, Y., Wu, J., Lv, M., Shao, Z., Hungwe, M., Wang, J., Bai, X., Xie, J., Wang, Y., & Geng, W. (2021). Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12(9), Article 612285. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285>
- Zommiti, M., Chikindas, M. L., & Ferchichi, M. (2020). Probiotics-live biotherapeutics: A story of success, limitations, and future prospects-not only for humans. *Probiotics Antimicrobial Proteins*, 12(3), 1266–1289. <https://doi.org/10.1007/s12602-019-09570-5>

REFERENCES

- Guseva, T. B., Soldatova, S. Yu., & Karan'yan, O. M. (2021). Organolepticheskaya otsenka molochnykh konservov: osobennosti provedeniya i interpretatsii rezul'tatov [Organoleptic evaluation of canned milk: Features of conducting and interpreting the results]. *Tovarovod prodovol'stvennykh tovarov [Commodity Specialist of Food Products]*, (10), 726–729. <https://doi.org/10.33920/igt-01-2110-01>
- Il'ina, E. N. (2009). Pryamoe MALDI mass-spektrmetricheskoe profilirovanie bakterial'nykh belkov dlya indikatsii i kharakteristiki patogenov [Direct MALDI mass spectrometric profiling of bacterial proteins for indication and characterization of pathogens]. *Acta naturae [Journal Nature]*, (1), 115–121.
- Kvasnikov, E. I., & Nesterenko, O. A. (1966). *Nekotorye voprosy sistematiki molochnokislykh bakterii. Uspekhi mikrobiologii [Some questions of the systematics of lactic acid bacteria. Advances in microbiology]*. Moscow: Nauka.
- Kvasnikov, E. I., & Nesterenko, O. A. (1975). *Molochnokislye bakterii i puti ikh ispol'zovaniya [Lactic acid bacteria and ways of their use]*. Moscow: Nauka.
- Yannaeva, O. S., & Soldatova, S. Yu. (2015). Sistema otsenki kachestva kisломolochnoi produktsii na primere iogurta natural'nogo [A system for assessing the quality of fermented milk products on the example of natural yogurt]. In *Den' nauki: Obshcheuniversitetskaya nauchnaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov, sbornik materialov [The day of science: University-wide scientific conference of young scientists and specialists, collection of materials]* (pp. 298–301). Orehovo-Zuevo: Gosudarstvennyi gumanitarnotekhnologicheskii universitet.
- Abraham, B. P., & Quigley, E. M. (2017). Probiotics in inflammatory bowel disease. *Gastroenterology Clinics of North America*, 46(4), 769–782. <https://doi.org/10.1016/j.gtc.2017.08.003>

- Battistini, C., Gullón, B., Ichimura, E. S., Gomes, A. M. P., Ribeiro, E. P., Kunigk, L., Moreira, J. U. V., & Jurkiewicz, C. (2018). Development and characterization of an innovative symbiotic fermented beverage based on vegetable soybean. *Brazilian Journal of Microbiology*, *49*(2), 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.08.006>
- Cavanagh, D., Fitzgerald, G. F., & McAuliffe, O. (2015). From field to fermentation: the origins of *Lactococcus lactis* and its domestication to the dairy environment. *Food Microbiology*, *47*, 45–61. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.11.001>
- Centurion, F., Basit, A. W., Liu, J., Gaisford, S., Rahim, M. A., & Kalantar-Zadeh, K. (2021). Nanoencapsulation for probiotic delivery. *ACS Nano*, *15*(12), 18653–18660. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c09951>
- Cesselin, B., Garrigues, C., Pedersen, M. B., Roussel, C., Gruss, A., & Gaudu, P. (2018). Task distribution between acetate and acetoin pathways to prolong growth in *Lactococcus lactis* under respiration conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, *84*(18), Article e01005–18. <https://doi.org/10.1128/AEM.01005-18>
- Duskova, M., Sedo, O., Ksicova, K., Zdrahal, Zb., & Karpiskova, R. (2012). Identification of lactobacilli isolated from food by genotypic methods and MALDI-TOF MS. *International Journal of Food Microbiology*, *159*, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.07.029>
- Flach, J., van der Waal, M. B., van den Nieuwboer, M., Claassen, E., & Larsen, O. A. (2018). The underexposed role of food matrices in probiotic products: Reviewing the relationship between carrier matrices and product parameters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *58*(15), 2570–2584. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1334624>
- Gao, Y., Wang, X., Xue, C., & Wei, Z. (2021). Latest developments in food-grade delivery systems for probiotics: A systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *8*, Article 1640. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2001640>
- Gaudu, P., Yamamoto, Y., Jensen, P. R., Hammer, K., Lechardeur, D., & Gruss, A. (2019). Genetics of lactococci. *Microbiology Spectrum*, *7*(4), Article 035. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.GPP3-0035-2018>
- Haghshenas B., Nami Y., Haghshenas M., Abdullah N., Rosli R., Radiah D., & Khosroushahi, A. Y. (2015). Bioactivity characterization of *Lactobacillus* strains isolated from dairy products. *Microbiology Open*, *4*(5), 803–813. <https://doi.org/10.1002/mbo3.280>
- Jalc, D., Varadyova, Z., Mihalikova, K., & Laukova, A. (2015). Nutritional status of corn silage after probiotic conservation. *Journal of Applied Animal Research*, *43*(2), 141–146. <https://doi.org/10.1080/09712119.2014.928629>
- Jiang, T., Li, H., Han, G. G., Singh, B., Kang, S., Bok, J., Kim, D., Hong, Z., Choi, Y., & Cho, C. (2017). Oral delivery of probiotics in poultry using PH-sensitive tablets. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *27*(4), 739–746. <https://doi.org/10.4014/jmb.1606.06071>
- Jones, J. J., Stump, M. J., Fleming, R. C., Lay, J. O., & Wilkins, C. L. (2003). Investigation of MALDI-TOF and FT-MS techniques for analysis of *Escherichia coli* whole cells. *Science Journal of Analytical Chemistry*, *75*(6), 1340–1347. <https://doi.org/10.1021/ac026213j>
- Kleerebezem, M., Bachmann, H., van Pelt-Kleinjan, E., Douwenga, S., Smid, E. J., Teusink, B., & van Mastrigt, O. (2020). Lifestyle, metabolism and environmental adaptation in *Lactococcus lactis*. *FEMS Microbiology Reviews*, *44*(6), 804–820. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa033>
- Mozaffarian, D. (2019). Dairy foods, obesity, and metabolic health: The role of the food matrix compared with single nutrients. *Advances in Nutrition*, *10*(5), 917S–923S. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz053>
- Nagaoka, S. (2019). Yogurt production. *Methods in Molecular Biology*, *1887*, 45–54. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8907-2_5
- Ouzari, H., Cherif, A., & Mora, D. J. (2002). Autolytic phenotype of *Lactococcus lactis* strains isolated from traditional Tunisian dairy products. *Journal of Applied Microbiology*, *92*(5), 812–820. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2002.01585.x>
- Ringel-Kulka, T., Palsson, O. S., Maier, D., Carroll, I., Galanko, J. A., Leyer, G., & Ringel, Y. (2011). Probiotic bacteria *Lactobacillus acidophilus* NCFM and *Bifidobacterium lactis* Bi-07 versus placebo for the symptoms of bloating in patients with functional bowel disorders: A double-blind study. *Journal of Clinical Gastroenterology*, *45*(6), 518–525. <https://doi.org/10.1097/MCG.0b013e31820ca4d6>
- Sanders, M. E., & Marco, M. L. (2010). Food formats for effective delivery of probiotics. *Annual Review of Food Science and Technology*, *1*, 65–85. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.080708.100743>
- Song, A. A., In, L. L. A., Lim, S. H. E., & Rahim, R. A. (2017). A review on *Lactococcus lactis*: From food to factory. *Microbial Cell Factories*, *16*(1), Article 55. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0669-x>
- Trush, E. A., Poluektova, E. A., Beniashvilli, A. G., Shifrin, O. S., Poluektov, Y., & Ivashkin, V. T. (2020). The evolution of human probiotics: Challenges and prospects. *Probiotics Antimicrobial Proteins*, *12*(4), 1291–1299. <https://doi.org/10.1007/s12602-019-09628-4>
- Venema, K., Verhoeven, J., Beckman, C., & Keller, D. (2020). Survival of a probiotic-containing product using capsule-within-capsule technology in an in vitro model of the stomach and small intestine (TIM-1). *Beneficial Microbes*, *11*(4), 403–409. <https://doi.org/10.3920/BM2019.0209>
- Wang, J., Zhong, Z., Zhang, W., Bao, Q., Wei, A., Meng, H., & Zhang, H. (2012). Comparative analysis of the gene expression profile of probiotic *Lactobacillus casei* Zhang with and without fermented milk as a vehicle during transit in a simulated gastrointestinal tract. *Research in Microbiology*, *163*(5), 357–365. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2012.04.002>
- Wang, Y., Wu, J., Lv, M., Shao, Z., Hungwe, M., Wang, J., Bai, X., Xie, J., Wang, Y., & Geng, W. (2021). Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *12*(9), Article 612285. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285>
- Zommiti, M., Chikindas, M. L., & Ferchichi, M. (2020). Probiotics-live biotherapeutics: A story of success, limitations, and future prospects-not only for humans. *Probiotics Antimicrobial Proteins*, *12*(3), 1266–1289. <https://doi.org/10.1007/s12602-019-09570-5>

УДК 664.14:62.965

Оценка целесообразности применения кавитационных воздействий в производстве помадных конфет с тыквенной подваркой

Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности – филиал ФГБУН «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, г. Москва, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:
Зайцева Лариса Валентиновна
E-mail: lvz2360@mail.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:
данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Зайцева, Л.В., Пестерев, М.А., Малахова, А.С., Лаврухин, М.А., & Баженова, А.Е. (2023). Оценка целесообразности применения кавитационных воздействий в производстве помадных конфет с тыквенной подваркой. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 187-200. <https://doi.org/10.36107/spfr.2023.355>

ПОСТУПИЛА: 10.03.2023
ПРИНЯТА: 11.07.2023
ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



Л. В. Зайцева, М. А. Пестерев, А. С. Малахова, М. А. Лаврухин, А. Е. Баженова

АННОТАЦИЯ

Введение: Исследованиями, проведенными во Всероссийском научно-исследовательском институте кондитерской промышленности, было установлено, что использование инвертного сиропа, полученного в результате кавитационных воздействий, при производстве помадных конфет улучшает их структуру и замедляет процессы потери влаги при хранении.

Цель: изучено влияние кавитационных воздействий на химический состав тыквенной подварки и процессы влагопереноса в помадных конфетах с ее применением. Кавитационную обработку инвертного сиропа и тыквенной подварки проводили на лабораторной установке марки «Сиринкс 250-К».

Материалы и методы: Исследование физико-химических и микробиологических показателей тыквенной подварки и помадных конфет осуществляли стандартизированными методами. Определение β -каротина в подварке проводили спектрофотометрическим методом при длине волны 451 нм.

Результаты: Предложен способ получения тыквенной подварки при температуре 65 °С, позволяющий увеличить содержание β -каротина в подварке в 40 раз по сравнению с традиционной технологией. Установлено, что после кавитационной обработки тыквенной подварки содержание в ней β -каротина снижается в 3,4 раза, увеличивается содержание магния, кальция, и в особенности натрия (почти в 10 раз) относительно контроля. По-видимому, это связано с протеканием эрозионных процессов материала рабочей поверхности волновода в процессе кавитации. Кавитационная обработка подварки способствует улучшению ее микробиологических показателей. Дальнейшее применение тыквенной подварки в производстве помадных конфет сопровождается полной потерей в них β -каротина из-за высокой температуры уваривания помадной массы (95 °С).

Выводы: Использование тыквенной подварки, подвергнутой кавитационным воздействиям, способствует лучшему сохранению массовой доли влаги в конфетах. Значительная потеря β -каротина при проведении кавитации в приведенных условиях свидетельствует о необходимости изменения материала волновода, снижения температуры обработки подварки из мякоти тыквы, богатой термолабильными каротиноидами. Для оценки целесообразности использования кавитационных воздействий для гомогенизации других видов плодоовощного сырья необходимо проведение дополнительных исследований по сохранности в нем биологически активных веществ, что в свою очередь будет зависеть от условий и продолжительности кавитационных воздействий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

тыквенная подварка, кавитационные воздействия, β -каротин, помадные конфеты, массовая доля влаги, активность воды, хранение, микробиологические показатели

Assessment of Feasibility of Using Cavitation Treatment in the Production of Fondant Candies with Pumpkin Welding

All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry – branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

Larisa V. Zaitseva, Mikhail A. Pesterev, Anastasia S. Malakhova, Mikhail A. Lavrukhin, Alla E. Bazhenova

CORRESPONDENCE:

Larisa V. Zaitseva

E-mail: lvz2360@mail.ru

FOR CITATIONS:

Zaitseva, L.V., Pesterev, M.A., Malakhova, A.S., Lavrukhin, M.A., & Bazhenova, A.E. (2023). Assessment of Feasibility of Using Cavitation Treatment in the Production of Fondant Candies with Pumpkin Welding. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 187-200. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.355>

RECEIVED: 10.03.2023

ACCEPTED: 11.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Background: Studies conducted at the All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry have found that the use of invert syrup obtained as a result of cavitation effects in the production of fondant candies improves their structure and slows down the processes of moisture loss during storage.

Purpose: In this paper, the effect of cavitation treatment on the chemical composition of pumpkin welding and moisture transfer processes in fondant candies with its use is studied. Cavitation treatment of invert syrup and pumpkin welding was carried out on a laboratory installation of the brand "Syrinx 250-K".

Material and Methods: The study of physico-chemical and microbiological parameters of pumpkin welding and fondant candies was carried out by standardized methods. Determination of β -carotene in the weld was carried out by spectrophotometric method at a wavelength of 451 nm. A method for obtaining pumpkin welding at a temperature of 65 °C is proposed, which allows to increase the content of β -carotene in the welding by 40 times compared to traditional technology.

Results: It was found that after cavitation treatment of pumpkin welding, the content of beta-carotene in it decreases by 3.4 times, the content of magnesium, calcium, and especially sodium increases (almost 10 times) relative to the control. Apparently, this is due to the course of erosion processes of the material of the working surface of the waveguide during cavitation. Cavitation treatment of welding contributes to the improvement of its microbiological parameters. The further use of pumpkin welding in the production of fondant candies is accompanied by a complete loss of β -carotene in them due to the high processing temperature of the fondant mass (95 °C).

Conclusion: The use of pumpkin welding subjected to cavitation treatment contributes to the better preservation of moisture in sweets. A significant loss of β -carotene during cavitation under the studied conditions indicates the need to change the waveguide material, reduce the processing temperature of the pumpkin pulp, rich in thermolabile carotenoids. To assess the feasibility of using cavitation effects for the homogenization of other types of fruit and vegetable raw materials, it is necessary to conduct additional studies on the preservation of biologically active substances in it, which in turn will depend on the conditions and duration of cavitation effects.

KEYWORDS

pumpkin welding, cavitation effects, beta-carotene, fondant candies, mass fraction of moisture, water activity, storage, microbiological indicators

ВВЕДЕНИЕ

Помадная масса относится к гетерофазным системам, жидкая фаза в ней представлена насыщенным раствором сахарозы в присутствии патоки, а твердая фаза — различными по величине кристаллами сахарозы. Существенным недостатком помадной конфетной массы является потеря влаги при хранении, что приводит к увеличению содержания твердой фазы или черствению. Известно, что одним из способов уменьшения скорости влагопереноса в помадных конфетах является замена патоки на инвертный сироп¹. Внесение плодоовощной подварки в рецептуру помадных конфет способствует удержанию влаги в процессе хранения, а также позволяет существенно расширить ассортимент и увеличить вкусовую палитру этого сегмента кондитерских изделий. Содержание функциональных ингредиентов, таких как пищевые волокна, витамины, макро- и микроэлементы и другие биологически активные вещества, в продуктах переработки фруктов и овощей (Табаторович, 2018; Кираева & Kotenkova, 2019; Кожемяко и соавт., 2021) повышает пищевую ценность кондитерских изделий с их использованием, что соответствует положениям Федерального закона № 29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов»² и «Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года»³.

Помадные конфеты относятся к одному из любимых лакомств потребителей, благодаря их мягкой и нежной консистенции. Поэтому расширение их ассортимента, а также повышение качества помадных конфет за счет использования новых технологий при их производстве является актуальным. Качество гетерофазных пищевых систем зависит от их дисперсионных свойств. Для изменения свойств пищевых систем в промышленности используются различные физические воздействия: ультразвуковые, электрические и магнитные поля, СВЧ и т.п. Одним из таких воздействий является кавитационная обработка как исходного сырья, так и готового пищевого продукта (Ботвинникова & Красуля, 2015; Кондратенко с соавт., 2021; Пацюк с соавт.,

2020; Петров с соавт., 2017; Руденко с соавт., 2020; de Araujo et al., 2020; Qiu et al., 2020; Ulasevich et al., 2020; Cui & Zhu, 2020; Chen et al., 2020).

Процесс кавитации связан с образованием под действием ультразвука в жидкой фазе пузырьков (каверн), заполненных паром, газом или их смесью. Кавитационные пузырьки резко схлопываются после перехода в область повышенного давления, порождая сильные гидродинамические возмущения в жидкости и интенсивное излучение акустических волн. При этом в дисперсной системе происходит диспергирование твердых частиц, граничащих с кавитирующей жидкостью (Аксенова с соавт., 2015).

Применение кавитационной обработки для изменения реологических свойств гетерофазных пищевых сред имеет официальное разрешение в Российской Федерации и безусловно представляет интерес как с научной, так и с практической точки зрения.

Во ВНИИКП разработаны способы получения инвертного сиропа, а также обработки плодоовощного сырья, с применением кавитационных воздействий (Аксенова с соавт., 2013; Руденко и соавт., 2020). Проведенными нами ранее исследованиями было установлено, что использование инвертного сиропа, полученного в условиях кавитационных воздействий, при производстве помадных конфет способствует лучшему сохранению ими влаги, что препятствует их черствению в процессе хранения (Баженова с соавт., 2022). Представляет интерес продолжить исследования в этом направлении и изучить влияние кавитационной обработки плодоовощного сырья на процессы влагопереноса, протекающие в помадных конфетах при хранении.

В условиях проведения политики импортозамещения исследования, в первую очередь, должны быть направлены на использование отечественного сырья. Учитывая отнесение помадных конфет к недорогому сегменту кондитерских изделий, перспективным является использование при производстве помадных конфет продуктов переработки тыквы.

¹ Скобельская, З. Г., & Горячева, Г. Н. (2002). *Технология производства сахарных кондитерских изделий*: Учебник. М.: ПрофОбрИздат.

² ФЗ № 29-ФЗ. (2000). *О качестве и безопасности пищевых продуктов*. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=368625>

³ Распоряжение Правительства Российской Федерации 1364. (2016). Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 июня 2016 г. № 1364-п <http://static.government.ru/media/files/9JUDtBOPqmoAatAhvT2wJ8UPT5Wq8qIo.pdf>

Тыква является источником не только пищевых волокон, макро- и микроэлементов, но она также содержит высокие количества таких мощных антиоксидантов, как аскорбиновая кислота и β -каротин (Кондратенко В. В. & Кондратенко Т. Ю., 2019; Табаторович, 2018). Повышение в пищевом рационе содержания антиоксидантов, и в частности β -каротина, положительно влияет на снижение риска развития сердечно-сосудистых заболеваний, включая предотвращение инсульта (Сметнева с соавт., 2020; Koekkoek & van Zanten, 2016; Uesugi et al., 2017), повышает адаптационные свойства организма в неблагоприятных условиях, например, при повышенных химических нагрузках (Бакиров с соавт., 2016; Кираева & Kotenkova, 2019). Отмечена необходимость увеличения потребления антиоксидантов в период пандемий, к которым относится и новая коронавирусная инфекция COVID-19 (Тутельян с соавт., 2020). В исследованиях, проведенных ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», у населения Российской Федерации установлен дефицит в потреблении антиоксидантов, особенно у девочек, имеющих повышенную массу тела или страдающих ожирением, что снижает их сопротивляемость различным инфекциям (Бекова с соавт., 2019; Коденцова с соавт., 2018).

С учетом всех полезных свойств продукты переработки тыквы нашли применение в производстве кондитерских изделий (Бакина & Камоза, 2020; Зайцева и соавт., 2019; Majerska et al., 2019). Однако, возможность использования тыквенной подварки при производстве помадных конфет пока еще находится на стадии научных исследований (Баженова с соавт., 2022).

Включение в рецептуру помадных конфет тыквенной подварки позволит повысить их пищевую ценность. Исследование влияния кавитационной обработки тыквенной подварки на процессы влагопереноса, протекающие в помадных конфетах с ее включением, позволит установить целесообразность проведения этой обработки.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Специалистами института разработан способ получения кислого инвертного сиропа в условиях кавитационных воздействий. Раствор сахара с ли-

монной кислотой подвергают кавитации при температуре 85–90 °С в течение 60 мин. Нагретая смесь с помощью насоса поступает в камеру кавитационной обработки (реактор), где проходит через узкий зазор, образованный стенками трубопровода и ультразвуковым преобразователем, излучающим высокочастотные колебания. Совмещение гидродинамических и акустических воздействий способствует максимальному диспергированию частиц до 0,2–0,4 мкм с увеличением их количества и образованием пространственных структур. Этот процесс препятствует седиментации и кристаллообразованию. Инвертный сироп после кавитационной обработки быстро охлаждают до 60 °С для предотвращения образования оксиметилфурфурола. При этом, полученный инвертный сироп имеет практически однородную вязкую консистенцию с равномерной дисперсностью частиц (Аксенова с соавт., 2013).

Доказано, что использование инвертного сиропа, полученного в условиях кавитационных воздействий, в производстве мучных кондитерских изделий положительно влияет на их качество и технологичность процесса (Аксенова и соавт., 2013). Показана целесообразность использования этого инвертного сиропа при производстве сахаристых кондитерских изделий (Баженова и соавт., 2022; Пестерев & Акимов, 2021; Руденко и соавт., 2020).

Цель исследований — оценить целесообразность применения кавитационных воздействий при производстве помадных конфет путем исследования изменений химического состава тыквенной подварки и процессов влагопереноса в помадных конфетах. Задачи исследования: (1) разработать способ получения тыквенной подварки с сохранением в ней β -каротина; (2) исследовать физико-химические и микробиологические свойства тыквенной подварки, подвергнутой кавитационным воздействиям, и выработать с ней модельные образцы помадных конфет; (3) исследовать изменение массовой доли влаги и активности воды в модельных образцах помадных конфет с тыквенной подваркой, подвергнутой кавитационным воздействиям, в процессе хранения; (4) исследовать изменение микробиологических показателей в модельных образцах помадных конфет с тыквенной подваркой, подвергнутой кавитационным воздействиям, в процессе хранения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Объектами исследования являлись: тыквенная подварка из тыквы крупноплодной (*Cucurbita maxima*), полученная по традиционной технологии и по разработанному способу, с применением и без применения кавитационных воздействий; опытные образцы помадных конфет, приготовленных в лабораторных условиях с использованием тыквенной подварки, полученной с применением кавитационных воздействий. Контролем служил образец помадных конфет с тыквенной подваркой, полученной без применения кавитационных воздействий.

В работе было использовано следующее сырье: сахар белый ГОСТ 33222–2015⁴; молоко сгущенное ГОСТ 31688–2012⁵; масло сладко-сливочное ГОСТ 32261–2013⁶; подварка по ГОСТ 32741–2014⁷; вода питьевая по ГОСТ 51232–98⁸.

Методы

Органолептическую оценку контрольного и модельных образцов помадных конфет проводили в соответствии с ГОСТ 4570–2014⁹.

В контрольном и модельных образцах подварки и помадных конфет определяли:

- массовую долю влаги по ГОСТ 5900–2014¹⁰;
- активность воды (a_w) по ГОСТ ISO 21807–2015¹¹ («AquaLab 3TE», США);
- содержание макроэлементов (калия, натрия, магния, кальция) методом капиллярного электрофореза по ГОСТ 34414–2018¹² («Капель-105М», Россия);
- содержание органических кислот (щавелевая, винная, яблочная, лимонная) методом капиллярного электрофореза по ГОСТ 34123.1–2017¹³ («Капель-105М», Россия);
- количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов по ГОСТ 10444.15–94¹⁴;
- количество плесеней и дрожжей по ГОСТ 10444.12–2013¹⁵;
- количество спорообразующих мезофильных анаэробных бактерий по ГОСТ 32012–2012¹⁶.

Кавитационную обработку инвертного сиропа и тыквенной подварки проводили по технологии, разработанной в ВНИИКИ, на лабораторной установке марки «Сиринкс 250-К» (ООО «Астор-С, Россия) в условиях совмещения гидродинамического и акустического воздействий на дисперсные системы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Обработка осуществлялась ультразвуковым преобразователем с частотой колебаний 24 кГц и амплитудой колебаний 3–4 мкм. Мощность преобразователя ультразвуковых колебаний составляла 240 Вт (Аксенова & др., 2015).

⁴ ГОСТ 33222–2015. (2019). *Сахар белый. Технические условия*. М.: Стандартинформ.

⁵ ГОСТ 31688–2012. (2013). *Консервы молочные. Молоко и сливки сгущенные с сахаром. Технические условия*. М.: Стандартинформ.

⁶ ГОСТ 32261–2013. (2019). *Масло сливочное. Технические условия*. М.: Стандартинформ.

⁷ ГОСТ 32741–2014. (2014). *Полуфабрикаты. Начинки и подварки фруктовые и овощные. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ.

⁸ ГОСТ 51232–98. (1998). *Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества*. М.: Госстандарт России.

⁹ ГОСТ 4570–2014. (2015). *Конфеты. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ.

¹⁰ ГОСТ 5900–2014. (2019). *Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ*. М.: Стандартинформ.

¹¹ ГОСТ ISO 21807–2015. (2016). *Микробиология пищевой продукции и кормов. Определение активности воды*. М.: Стандартинформ.

¹² ГОСТ 34414–2018. (2018). *Изделия кондитерские. Методы определения массовой доли фруктового сырья. Часть 2. Определение макроэлементов*. М.: Стандартинформ.

¹³ ГОСТ 34123.1–2017. (2018). *Изделия кондитерские. Методы определения массовой доли фруктового и овощного сырья. Часть 1. Определение массовой доли органических кислот*. М.: Стандартинформ.

¹⁴ ГОСТ 10444.15–94. (2010). *Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов*. М.: Стандартинформ.

¹⁵ ГОСТ 10444.12–2013. (2014). *Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета количества дрожжей и плесневых грибов*. М.: Стандартинформ.

¹⁶ ГОСТ 32012–2012. (2014). *Молоко и молочная продукция. Методы определения содержания спор мезофильных анаэробных микроорганизмов*. М.: Стандартинформ.

Определение β -каротина в подварке проводили спектрофотометрическим методом на приборе «Specord — М — 40» (Германия) при длине волны 454 нм по методике МВИ №60–00334675–2017¹⁷.

Хранение модельных образцов помадных конфет осуществлялось в негерметичной упаковке климатической камере «Climacell 404» при контролируемых условиях: температура — 20 °С, относительной влажности окружающего воздуха — 40 %.

Оборудование

Гомогенизация мякоти тыквы осуществлялась на меланжере «Rawmid Dream Classic MDC-01» (Индия) с частотой вращения чаши 130 об/мин в течение 40 минут. Полученный тыквенный полуфабрикат использовали для получения тыквенной подварки.

Процедура

Исследования проводили в «Технологическом отделе» и «Отделе современных методов оценки качества» ВНИИКИП — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН. Изготовление контрольного и модельного образцов сливочных помадных конфет с плодовоовощной подваркой осуществлялось по рецептуре, представленной в Таблице 1.

Таблица 1

Рецептура сливочных помадных конфет с добавлением плодовоовощной подварки

Наименования сырья	Содержание сухих веществ, %	Расход сырья на 1 т готового продукта, кг	
		в натуре	в сухих веществах
Сахар белый	99,85	635,41	634,41
Молоко сгущенное	74,00	286,80	212,20
Инвертный сироп	80,00	17,00	13,60
Масло сладко-сливочное	84,00	32,00	26,90
Подварка плодовоовощная	69,00	72,00	49,70
Итого	—	1043,20	936,80
Выход	90,80	1000,00	908,00

По традиционной рецептуре в помадных конфетах с плодовоовощным сырьем используют крахмальную патоку. В исследованиях, проведенных ранее была показана эффективность полной замены крахмальной патоки на инвертный сироп, полученный в условиях кавитационных воздействий (Баженова и соавт., 2022). Произведенная замена позволила улучшить качество помадных конфет и способствовала сохранению ими свежести за счет более длительного удержания влаги. Поэтому в настоящей работе помадные конфеты вырабатывались с использованием инвертного сиропа, полученного в результате кавитационных воздействий.

Помадные конфеты получали следующим образом. Сахарный сироп уваривали с инвертным сиропом, полученным в результате кавитационных воздействий, до содержания сухих веществ 85 % при температуре 103–106 °С. Приготовление помадной массы включало в себя смешивание всех рецептурных компонентов: сахаро-инвертного сиропа, тыквенной подварки, масла сладко-сливочного, сгущенного молока, и уваривание их до содержания сухих веществ 85 % при температуре 95 °С. Полученную помадную массу охлаждали до 52 °С. Охлажденную смесь взбивали в течение 1,5–3 минут, затем проводили отливку в силиконовые формы. Длительность процесса выстаивания (структурообразования) помадных конфет — 40–60 минут.

Полученные образцы оценивали по органолептическим, физико-химическим, микробиологическим показателям и пищевой ценности.

Анализ данных

Обработку результатов исследований производили с применением статистического метода обработки экспериментальных данных, определяя средние значения вычисляемой величины на основе не менее трех повторных определений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Плодовоовощные подварки получают увариванием плодовой мякоти с сахаром до содержания сухих ве-

¹⁷ МВИ 060–00334675–2017. (2017). Методика определения массовой доли β -каротина в кондитерских изделиях. М.: Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова.

ществ 69%¹⁸. Температура кипения смеси при этом составляет около 100°C. Высокие температурные воздействия на плодоовощное сырье приводят к значительным потерям биологически активных веществ. Для пюре из тыквы высокие температурные воздействия приводят к потере, в первую очередь, содержащегося в нем β-каротина.

В связи с этим предложено готовить подварку при более низких температурах. По предлагаемому способу мякоть тыквы протирали на меланжере с получением тыквенного полуфабриката. Соотношение тыквенного полуфабриката к сахару составляло 1,29 : 1. Смесь уваривали до содержания сухих веществ 69%, при температуре 60–65 °С.

Исследование содержания β-каротина в подварках, полученных традиционным методом (при 100 °С) и по разработанному нами способу, показало, что в первом случае оно составило 0,05 мг/100 г, а во втором — 1,96 мг/100 г. Это свидетельствует о преимуществе предложенного нами способа получения тыквенной подварки по сравнению с традиционным методом. Сохранение β-каротина в подварке, полученной по разработанному нами способу, способствовало сохранению у нее более ярко выраженного оранжевого цвета (Рисунок 1).

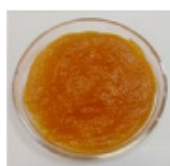
В тыквенной подварке, полученной по разработанному способу, исследовали микробиологические показатели в процессе хранения (Таблица 2). Далее подварку по разработанному способу подвергали кавитационным воздействиям и анализировали ее физико-химические и микробиологические показатели в сравнении с исходной подваркой (контроль). Результаты представлены в Таблице 3.

Рисунок 1

Внешний вид тыквенной подварки, полученной по традиционному и разработанному способам



Подварка тыквенная (традиционный метод)



Подварка тыквенная (разработанный способ)

Таблица 2

Микробиологические исследования тыквенной подварки, полученной по разработанному способу, в процессе хранения

Исследуемые показатели, КОЕ/г	Исход.	3 мес.	ТР ТС 021/2011
КМАФАнМ	3×10 ²	1×10 ²	5×10 ³
Плесени	0	20	50
Дрожжи	0	0	50
Спорообразующие мезофильные анаэробные бактерии	0	1×10	Не нормируется

Таблица 3

Физико-химические и микробиологические показатели тыквенной подварки, полученной разработанным способом, без применения (контроль) и с применением (модельный образец) кавитационных воздействий

Показатель	Тыквенная подварка	
	Контроль	Модельный образец
Массовая доля влаги, %	32,10	31,92
Активность воды (<i>a_w</i>)	0,85	0,84
β-каротин, мг/100 г	1,96	0,58
Массовая доля РВ, %	2,30	2,38
Массовая доля моно- и дисахаров (%):		
Фруктоза	0,79	0,86
Глюкоза	1,64	1,73
Сахароза	77,03	77,73
Макроэлементы (мг/100г):		
К	210,80	203,30
Na	1,17	11,00
Mg	8,70	10,30
Ca	43,20	51,00
Массовая доля органических кислот (%):		
Лимонная	0,09	0,05
Яблочная	0,10	0,02
Микробиологические показатели (КОЕ/г):		
Плесени	0	0
Дрожжи	0	0
КМАФАнМ	3 × 10 ²	9 × 10

¹⁸ Скобельская, З. Г., & Горячева, Г. Н. (2002). *Технология производства сахарных кондитерских изделий*: Учебник. М.: ПрофОбрИздат.

Помадные конфеты выработывали с использованием тыквенной подварки без применения (контроль) и с применением (модельный образец) кавитационных воздействий. Физико-химические и микробиологические показатели помадных конфет представлены в Таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Физическо-химические показатели помадных конфет с тыквенной подваркой, полученной по разработанному способу без применения (контроль) и с применением (модельный образец) кавитационных воздействий

Показатели	Помадные конфеты	
	Контроль	Модельный образец
Макроэлементы (мг/100 г):		
K	126,2	131,3
Na	39,6	49,0
Mg	12,6	10,9
Ca	89,2	88,7
Органические кислоты (%):		
Щавелевая	0,004	0,004
Винная	0,015	0,008
Яблочная	0,006	0,008
Лимонная	0,13	0,15
β-каротин	0	0

Таблица 5

Микробиологические показатели в помадных конфетах с тыквенной подваркой без применения (контроль) и с применением кавитационных воздействий (модельный образец) в процессе хранения

Часть конфеты	Показатели КОЕ/г	Помадные конфеты				Нормы ТР ТС 021/2011, не более
		Контроль		Модельный образец		
		Фон	29 сут	Фон	29 сут	
Корпус	КМАФАнМ	5×10	1×10 ²	1,6×10 ²	7,4×10 ²	5×10 ³
	Плесень	0	0	0	10	50
	Дрожжи	0	10	0	10	10
Внутренняя часть	КМАФАнМ	1,1×10 ²	1,1×10 ²	9×10	4,4×10 ²	5×10 ³
	Плесень	0	0	0	0	50
	Дрожжи	0	10	0	0	10

Контрольные и модельные образцы помадных конфет закладывали на хранение и анализировали в них массовую долю влаги и активность воды. Полученные результаты представлены на Рисунках 2–4.

Рисунок 2

Массовая доля влаги (%) в контрольном и модельном образцах помадных конфет

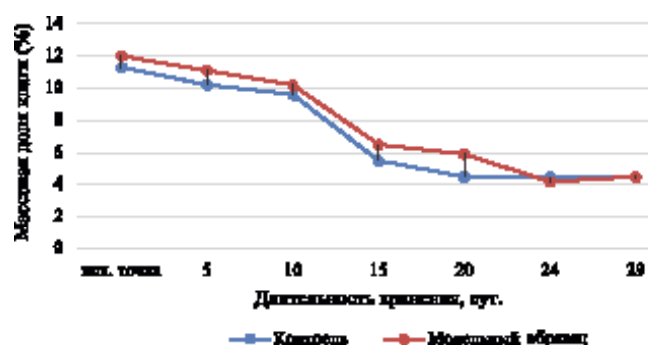


Рисунок 3

Активность воды (a_w) в корпусе помадных конфет в контрольном и модельном образцах

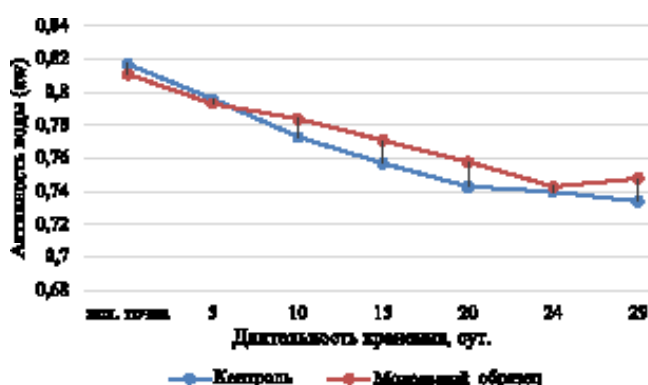
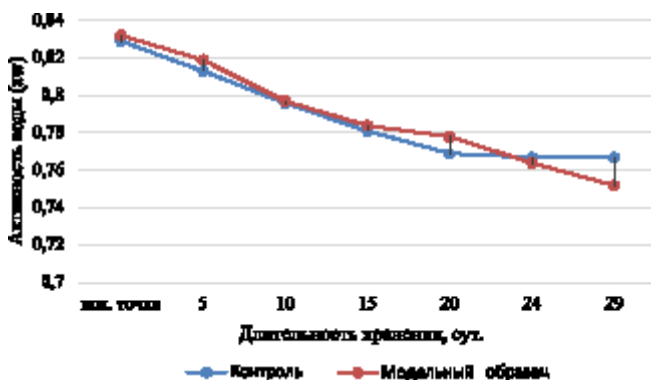


Рисунок 4

Активность воды (a_w) во внутренней части помадных конфет в контрольном и модельном образцах



В конце хранения помадные конфеты анализировали на микробиологическую обсемененность. Результаты представлены в Таблице 5.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приготовление тыквенной подварки при более низкой температуре способствовало сохранению содержащегося в ней β -каротина, его количество было выше почти в 40 раз, чем в подварке, приготовленной по традиционной технологии. Полученные данные согласуются с данными других исследователей по термолабильности β -каротина (Куречян и соавт., 2020; Тринеева, 2022), и в связи с этим обоснована необходимость снижения температурных режимов обработки пищевой продукции — источника этого антиоксиданта.

В настоящее время кавитация используется в пищевых технологиях для дезинфекции продукции, инактивации ферментов, дегидратации пищевых продуктов (Chen et al., 2020); для повышения дисперсности молока и продуктов его переработки (Potoroko et al, 2018; Ботвинникова & Красуля, 2015), эмульсий (Krasulya et al, 2018), повышения гомогенности структуры теста и улучшения его реологических свойств (Ulasevich et al., 2020), уменьшения размеров кристаллов в замороженной пищевой продукции (Qiu et al, 2020).

Использование кавитации применительно к продуктам переработки фруктов и овощей (соки, пюре) приводит к повышению в них редуцирующих веществ (Пацюк с соавт., 2020; Руденко с соавт., 2020). К сожалению авторами не было исследовано влияние кавитации на содержание каротиноидов в тыквенном пюре и морковном полуфабрикате.

Основываясь на положительных результатах применения кавитационной обработки для получения инвертного сиропа в качестве антикристаллизатора при производстве помадных масс (Баженова и соавт, 2022), решено было также подвергнуть кавитационной обработке тыквенную подварку, полученную разработанным нами щадящим способом. Проведенные исследования позволили установить, что подварка после кавитации имела улучшенные микробиологические показатели по сравнению с контролем (Таблица 3), что предполагает возможность более длительного срока ее годности. Однако, полученные преимущества в ходе дальнейшего процесса приготовления с ней помадных конфет нивелировались (Таблица 5).

Следует отметить, что микробиологические показатели тыквенной подварки и помадных конфет во всех случаях соответствовали всем требованиям ТР ТС 021/2011¹⁹ (Таблицы 2; 3; 5).

В исследованиях, проведенных нами по влиянию кавитационной обработки на химический состав тыквенной подварки было установлено увеличение содержания магния, кальция, и в особенности натрия (почти в 10 раз) относительно контроля. Полученные данные согласуются с исследованиями по влиянию кавитационной обработки на сок тыквы (Пестерев & Лаврухин, 2022). Это связано либо с протеканием эрозионных процессов материала рабочей поверхности волновода, сопутствующих процессу кавитации (Кондратенко с соавт, 2021), либо с высвобождением ионов металлов из внутриклеточной жидкости в результате частичного разрушения клеток в процессе кавитации (Пестерев & Лаврухин, 2022).

Впервые было исследовано влияние кавитационной обработки на сохранность каротиноидов в тыквенной подварке. Установлено, что разогрев рабочей поверхности волновода в лабораторной

¹⁹ ТР ТС 021/2011. (2021). О безопасности пищевой продукции. <https://docs.cntd.ru/document/902320560>

установке «Сиринкс 250-К», достигающий 90 °С, влияет на содержание термолабильного β-каротина в подварке, снижая его в 3,4 раза по сравнению с контролем, также несколько снизилось содержание органических кислот (Таблица 3). Интересно отметить, что результаты исследований по влиянию кавитации на сохранность биологически активных веществ, проведенных другими авторами, носят противоречивый характер. Сообщается, что кавитационная обработка муки из батата приводила к снижению содержания в ней фенольных соединений и вследствие этого ее антиоксидантной активности, что по мнению авторов было связано с процессами пиролиза или высвобождением гидроксильных радикалов, образующихся при кавитации (Cui & Zhu, 2020). Исследования, проведенные по применению кавитационной обработки к пульпе *Agasa-boi*, показали, наоборот, увеличение содержания в ней витамина С, фенольных соединений, флавоноидов и как следствие антиоксидантной активности (de Araujo et al., 2020).

Остальные физико-химические показатели (массовая доля влаги, активность воды, массовая доля сахарозы, массовая доля редуцирующих веществ, включая глюкозу и фруктозу) оставались практически неизменными в подварке, подвергнутой кавитационным воздействиям по сравнению с контролем (Таблица 3).

В процессе получения помадных конфет из-за высокой температуры уваривания помадной массы (95 °С) происходила полная потеря β-каротина, как в контрольном, так и модельном образцах. Отмеченное увеличение содержания ионов натрия в тыквенной подварке после кавитации сохранялось и в готовых помадных конфетах, содержание остальных макроэлементов и органических кислот в модельных образцах помадных конфет мало отличалось от контроля (Таблица 4).

Исследование потери влаги в процессе хранения в негерметичных условиях помадных конфет, полученных с тыквенной подваркой с применением кавитационных воздействий, позволило установить резкое снижение (в 2 раза) массовой доли влаги после 10 суток хранения, как в модельных образцах, так и контроле. В обоих случаях этот показатель вышел за оптимальные значения (10–12%), что свидетельствует о начале процесса черствения помадных масс через 10 суток после их

производства (Рисунок 2). К 15 суткам хранения процесс потери влаги практически прекращается, вероятно вследствие достижения равновесного состояния с окружающим воздухом. Следует отметить, что в модельных образцах массовая доля влаги была несколько выше, чем в контроле, но к 24 суткам хранения эта разница полностью исчезала.

Анализ активности воды в корпусе и во внутренней части помадных конфет в процессе их хранения позволил установить некоторое преимущество использования подварки после кавитации — в корпусах помадных конфет активность воды снижалась медленнее в модельных образцах по сравнению с контролем (10–20 сутки хранения). Однако, во внутренней части помадных конфет разницы между модельными образцами и контролем практически не наблюдалось (Рисунки 3, 4).

ВЫВОДЫ

Проведенные нами исследования подтвердили эффективность применения кавитационных воздействий для обеззараживания различных видов плодоовощного сырья (улучшение микробиологических показателей в тыквенной подварке).

Подварка после кавитационных воздействий, также как инвертный сироп, полученный в условиях кавитации, способствовала лучшему сохранению влаги помадными конфетами, хотя и в меньшей степени.

Значительная потеря β-каротина при проведении кавитации в приведенных условиях свидетельствует о необходимости изменения материала волновода, снижения температуры обработки подварки из мякоти тыквы, богатой термолабильными каротиноидами. Однако, для последующего применения тыквенной подварки при производстве помадных конфет этот аспект не имеет решающего значения вследствие полного разрушения бета-каротина в процессе получения помадной массы.

Для оценки целесообразности использования кавитационных воздействий для гомогенизации других видов плодоовощного сырья необходимо проведение дополнительных исследований по сохранности в нем биологически активных веществ, что в свою очередь будет зависеть от условий и продолжительности кавитационных воздействий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность М. А. Талейснику за концептуальную помощь в проведении исследований по получению тыквенной подварки с применением кавитационных воздействий.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Зайцева Лариса Валентиновна: концептуализация, методология и руководство исследованием, создание рукописи и ее рецензирование.

ЛИТЕРАТУРА

- Аксенова, Л. М., Кочетов, В. К., Лисицын, А. Б., Никольский, К. Н., Панфилов, В. А., Подхомотов, Н. В., Семёнова, А. А., & Талейсник, М. А. (2015). *Пищевые технологии будущего и нанопреобразования биополимеров*. Краснодар: Диапазон-В.
- Аксенова, Л. М., Талейсник, М. А., Герасимов, Т. В., & Кочетов В. К. (2013). Получение кислого инвертного сиропа с применением кавитационных способов обработки. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 57(3), 135–137. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2013-3-135-137>
- Баженова, А. Е., Баулина, Т. В., Осипов, М. В., & Пестерев, М. А. (2022). Получение помадных конфет с использованием кавитационных воздействий. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, (7), 235–245. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-7-235-245>
- Бакина, А.П., & Камоза, Т.Л. (2020). Перспективы использования пюре из мякоти тыквы и джема из ягод красной смородины при производстве зефира. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, (6), 207–214. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-6-207-214>
- Бакиров, А. Б., Бадамшина, Г. Г., Тимашева, Г. В., Каримова, Л. К., Валеева, Э. Т., Галимова, Р. Р., & Григорьева, Л. М. (2016). Применение антиоксидантного напитка у здоровых лиц, работающих в условиях химической нагрузки. *Вопросы питания*, (4), 82–87.
- Бекетова, Н. А., Павловская, Е. В., Коденцова, В. М., Вржесинская, О. А., Кошелева, О. В., Сокольников, А. А., & Строкова, Т. В. (2019). Обеспеченность витаминами детей школьного возраста с ожирением. *Вопросы питания*, (4), 66–74. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10043>
- Ботвинникова, В. В., & Красуля, О. Н. (2015). Формирование потребительских свойств кисломолочных напитков на основе эффектов ультразвука. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Пищевые и биотехнологии*, (4), 30–40.
- Зайцева, И. И., Шеламова, С. А., & Дерканосова, Н. М. (2019). Влияние выжимок из тыквы на процесс ферментации теста для крекера. *Техника и технология пищевых производств*, 49(3), 470–478. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-470-478>
- Коденцова, В. М., Вржесинская, О. А., Никитюк, Д. Б., & Тутельян, В. А. (2018). Витаминная обеспеченность взрослого населения Российской Федерации: 1987–2017 гг. *Вопросы питания*, 87(4), 62–68. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10043>
- Кожемяко, А. В., Сергеева, И. Ю., & Долголюк, И. В. (2021). Экспериментальное определение биологически активных соединений в выжимках свеклы и моркови, районированных в Сибирском регионе. *Техника и технология пищевых производств*, 51(1), 179–187. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-179-187>
- Кондратенко, В. В., & Кондратенко, Т. Ю. (2019). Особенности формирования сорбционных свойств пектиновых веществ из разных видов тыквы. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Пищевые и биотехнологии*, (4), 5–12.
- Кондратенко, В. В., Петров, А. Н., Пацюк, Л. К., Лукьяненко, М. В., & Симоненко, Е. С. (2021). О возможности применения коллапсирующей кавитации при производстве продуктов для детского питания. *Пищевая промышленность*, (6), 33–38. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.6.6.014>
- Курегян, А. Г., Степанова, Э. Ф., Печинский С. В., & Оганесян Э. Т. (2020). Модель стабилизаций субстанций каротиноидов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 55–66. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.345>
- Пацюк, Л. К., Федосенко, Т. В., & Кондратенко, В. В. (2020). Выявление кавитационной составляющей в общем приросте редуцирующих сахаров в результате инверсии сахарозы при ультразвуковом воздействии

- на овощные и фруктовые пюре. *Садоводство и виноградарство*, (5), 54–58. <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2020-5-54-58>
- Пестерев, М. А., & Акимов, А. И. (2021). Кавитационная обработка как инструмент формирования органолептических свойств кондитерских полуфабрикатов. *Пищевые системы*, 4(3S), 212–216. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-212-216>
- Пестерев, М. А., & Лаврухин, М. А. (2022). Создание полуфабрикатов с повышенным содержанием микронутриентов на основе плодоовощного сырья. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 66–73. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.376>
- Петров, А. Н., Шишкина, Н. С., Пацюк, Л. К., Алабина, Н. М., Борченкова, Л. А., & Глазков, С. В. (2017). Получение новых видов продуктов с применением кавитационной обработки. *Холодильная техника*, (8), 54–59. <https://doi.org/10.17816/RF99334>
- Руденко, О. С., Пестерев, М. А., Талейсник, М. А., Кондратьев, Н. Б., & Сакеллари, А. Д. (2020). Влияние кавитационной обработки плодоовощного сырья на органолептические показатели кондитерских изделий. *Все о мясе*, (5S), 304–308. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-304-308>
- Сметнева, Н. С., Погожева, А. В., Васильев, Ю. Л., Дыдыкин, С. С., Дыдыкина, И. С., & Коваленко, А. А. (2020). Роль оптимального питания в профилактике сердечно-сосудистых заболеваний. *Вопросы питания*, 89(3), 114–124. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10035>
- Табаторович, А. Н. (2018). Исследование химического состава и качества полуфабрикатов из тыквы для кондитерского производства. *Индустрия питания*, 3(1), 11–19. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2018-6-1-2>
- Тринеева, О. В. (2022). Биологически активные вещества плодов облепихи крушиновидной (*Hipporhae rhamnoides* L.) при хранении с применением различных способов консервации: обзор предметного поля. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 32–54. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.269>
- Тутельян, В. А., Никитюк, Д. Б., Бурляева, Е. А., Хотимченко, С. А., Батурич, А. К., Стародубова, А. В., Камбаров, А. О., Шевелева, С. А., & Жилинская, Н. В. (2020). COVID-19: Новые вызовы для медицинской науки и практического здравоохранения. *Вопросы питания*, 89(3), 6–13. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10024>
- Chen, C., Zhang, M., & Yang, C.-H. (2020). Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 63, Article 104953. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104953>
- Cui, R., & Zhu, F. (2020). Effect of ultrasound on structural and physicochemical properties of sweetpotato and wheat flours. *Ultrasonics sonochemistry*, 66, Article 105118. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105118>
- De Araujo, F. F., de Paulo Farias, D., Neri-Numa, I. A., Dias-Audibert, F. L., Delafiori, J., de Souza, F. G., Catharino, R. R., Kersul do Sacramento, C., & Pastore, G. M. (2020). Influence of high-intensity ultrasound on color, chemical composition and antioxidant properties of araca-boi pulp. *Food Chemistry*, 338, Article 127747. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127747>
- Koekkoek, W. A. C., & van Zanten, A. R. H. (2016). Antioxidant vitamins and trace elements in critical illness. *Nutrition in Clinical Practice*, 31(4), 457–474. <https://doi.org/10.1177/0884533616653832>
- Krasulya, O., Bogush, V., Potoroko, I., Tsiurlnichenko, L., Khmelev, S., & Anandan, S. (2018). Sonochemical effects on food emulsions. *Agronomy Research*, 16(S2), 1396–1404. <https://doi.org/10.15159/AR.18.101>
- Kupaeva, N. V., & Kotenkova, E. A. (2019). Search for alternative sources of natural plant antioxidants for food industry. *Food Systems*, 2(3), 17–19. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-3-17-19>
- Majerska, J., Michalska, A., & Figiel, A. (2019). A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products. *Trends in Food Science and Technology*, 88, 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.021>
- Potoroko, I., Kalinina, R., Fatkullin, V., Botvinnikova, O., Krasulya, U., Bagale, U., & Sonawane, S. H. (2018). Ultrasound effects based on simulation of milk processing properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 463–472. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.06.019>
- Qiu, L., Zhang, M., Chitrakar, B., & Bhandari, B. (2020). Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, Article 105230. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105230>
- Uesugi, S., Ishihara, J., Iso, H., Sawada, N., Takachi, R., Inoue, M., & Tsugane, S. (2017). Dietary intake of antioxidant vitamins and risk of stroke: The Japan public health center-based prospective study. *European Journal of Clinical Nutrition*, 71(10), 1179–1185. <https://doi.org/10.1038/ejcn2017.71>
- Ulasevich, S. A., Gusinskaia, T. A., Semina, A. D., Gerasimov, A. A., Kovtunov, E. A., Iakovchenko, N. V., Orlova, O. Yu., & Skorb, E. V. (2020). Ultrasound-assisted fabrication of gluten-free dough for automatic producing dumplings. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, Article 105198. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105198>

REFERENCES

- Aksenova, L. M., Kochetov, V. K., Lisitsyn, A. B., Nikol'skii, K. N., Panfilov, V. A., Podkhomutov, N. V., Semenova, A. A., & Taleisnik, M. A. (2015). *Pishchevye tekhnologii budushchego i nanopreobrazovaniya biopolimerov [Food technologies of the future and nano-transformation of biopolymers]*. Krasnodar: Diapazon-V.
- Aksenova, L. M., Taleisnik, M. A., Gerasimov, T. V., & Kochetov V. K. (2013). Poluchenie kislogo invertogo siropa s primeneniem kavitatsionnykh sposobov obrabotki [Production of acidic invert syrup using cavitation processing methods]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies]*, 57(3), 135–137. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2013-3-135-137>
- Bakina, A. P., & Kamoza, T. L. (2020). Perspektivy ispol'zovaniya pyure iz myakoti tykvy i dzhema iz yagod krasnoi smorodiny pri proizvodstve zefira [Prospects for the use of pumpkin pulp puree and red currant berry jam in the production of marshmallows]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]*, (6), 207–214. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-6-207-214>
- Bakirov, A. B., Badamshina, G. G., Timasheva, G. V., Karimova, L. K., Valeeva, E. T., Galimova, R. R., & Grigor'eva, L. M. (2016). Primenenie antioksidantnogo napitka u zdorovykh lits, rabotayushchikh v usloviyakh khimicheskoi nagruzki [The use of an antioxidant drink in healthy individuals working under chemical stress]. *Voprosy pitaniya [Nutrition Issues]*, (4), 82–87.
- Bazhenova, A. E., Baulina, T. V., Osipov, M. V., & Pesterev, M. A. (2022). Poluchenie pomadnykh konfet s ispol'zovaniem kavitatsionnykh vozdeistvii [Production of fondant candies using cavitation effects]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]*, (7), 235–245. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-7-235-245>
- Beketova, N. A., Pavlovskaya, E. V., Kodentsova, V. M., Vrzhesinskaya, O. A., Kosheleva, O. V., Sokol'nikov, A. A., & Strokova, T. V. (2019). Obespechennost' vitaminami detei shkol'nogo vozrasta s ozhireniem [Vitamin availability of obese school-age children]. *Voprosy pitaniya [Nutrition Issues]*, (4), 66–74. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10043>
- Botvinnikova, V. V., & Krasulya, O. N. (2015). Formirovanie potrebitel'skikh svoystv kislomolochnykh napitkov na osnove effektivnykh ul'trazvuka [Formation of consumer properties of fermented milk drinks based on ultrasound effects]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Pishchevye i biotekhnologii [Bulletin of the South Ural State University. Food and Biotechnology]*, (4), 30–40.
- Kodentsova, V. M., Vrzhesinskaya, O. A., Nikityuk, D. B., & Tutel'yan, V. A. (2018). Vitamnaya obespechennost' vzroslogo naseleniya Rossiiskoi Federatsii: 1987–2017 gg [Vitamin security of the adult population of the Russian Federation: 1987–2017]. *Voprosy pitaniya [Nutrition Issues]*, 87(4), 62–68. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10043>
- Kondratenko, V. V., & Kondratenko, T. Yu. (2019). Osobennosti formirovaniya sorbtsionnykh svoystv pektinovykh veshchestv iz raznykh vidov tykvy [Features of the formation of sorption properties of pectin substances from different types of pumpkin]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Pishchevye i biotekhnologii [Bulletin of the South Ural State University. Food and Biotechnology]*, (4), 5–12.
- Kondratenko, V. V., Petrov, A. N., Patsyuk, L. K., Luk'yanenko, M. V., & Simonenko, E. S. (2021). O vozmozhnosti primeneniya kollapsiruyushchei kavitatsii pri proizvodstve produktov dlya detskogo pitaniya [About the possibility of using collapsing cavitation in the production of baby food products]. *Pishchevaya promyshlennost' [Food Industry]*, (6), 33–38. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.6.6.014>
- Kozhemyako, A. V., Sergeeva, I. Yu., & Dolgolyuk, I. V. (2021). Eksperimental'noe opredelenie biologicheskii aktivnykh soedinenii v vyzhimkakh svekly i morkovi, raionirovannykh v Sibirskom regione [Experimental determination of biologically active compounds in beet and carrot pomace, zoned in the Siberian region]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Equipment and Technology of Food Production]*, 51(1), 179–187. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-179-187>
- Kuregyan, A. G., Stepanova, E. F., Pechinskii S. V., & Oganesyana E. T. (2020). Model' stabilizatsii substantsii karotinoidov [Model of stabilization of carotenoid substances]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya [Storage and Processing of Farm Products]*, (4), 55–66. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.345>
- Patsyuk, L. K., Fedosenko, T. V., & Kondratenko, V. V. (2020). Vyyavlenie kavitatsionnoi sostavlyayushchei v obshchem priroste redutsiruyushchikh sakharov v rezul'tate inversii sakharozy pri ul'trazvukovom vozdeistvii na ovoshchnye i fruktovye pyure [Identification of the cavitation component in the total increase of reducing sugars as a result of sucrose inversion under ultrasound exposure to vegetable and fruit purees]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo [Gardening and Viticulture]*, (5), 54–58. <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2020-5-54-58>
- Pesterev, M. A., & Akimov, A. I. (2021). Kavitatsionnaya obrabotka kak instrument formirovaniya organolepticheskikh svoystv konditerskikh polufabrikatov [Cavitation treatment as a tool for the formation of organoleptic properties of confectionery semi-finished products]. *Pishchevye sistemy [Food Systems]*, 4(3S), 212–216. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-212-216>
- Pesterev, M. A., & Lavrukhin, M. A. (2022). Sozdanie polufabrikatov s povyshennym soderzhaniiem mikronutrientov na osnove plodoovoshchnogo syr'ya [Creation of semi-finished products with a high content of micronutrients based on fruit and vegetable raw materials]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya [Storage and Processing of Farm Products]*, (4), 66–73. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.376>
- Petrov, A. N., Shishkina, N. S., Patsyuk, L. K., Alabina, N. M., Borchenkova, L. A., & Glazkov, S. V. (2017). Poluchenie

- novykh vidov produktov s primeneniem kavitatsionnoi obrabotki [Obtaining new types of products using cavitation treatment]. *Kholodil'naya tekhnika [Refrigeration Equipment]*, (8), 54–59. <https://doi.org/10.17816/RF99334>
- Rudenko, O. S., Pesterev, M. A., Taleisnik, M. A., Kondrat'ev, N. B., & Sakellari, A. D. (2020). Vliyanie kavitatsionnoi obrabotki plodovoovoshchnogo syr'ya na organolepticheskie pokazateli konditerskikh izdelii [The effect of cavitation processing of fruit and vegetable raw materials on the organoleptic characteristics of confectionery products]. *Vse o myase [All about Meat]*, (5S), 304–308. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-304-308>
- Smetneva, N. S., Pogozheva, A. V., Vasil'ev, Yu. L., Dydykin, S. S., Dydykina, I. S., & Kovalenko, A. A. (2020). Rol' optimal'nogo pitaniya v profilaktike serdechno-sosudistyykh zabolevaniy [The role of optimal nutrition in the prevention of cardiovascular diseases]. *Voprosy pitaniya [Nutrition Issues]*, 89(3), 114–124. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10035>
- Tabatorovich, A. N. (2018). Issledovanie khimicheskogo sostava i kachestva polufabrikatov iz tykvy dlya konditerskogo proizvodstva [Investigation of the chemical composition and quality of semi-finished pumpkin products for confectionery production]. *Industriya pitaniya [Food Industry]*, 3(1), 11–19. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2018-6-1-2>
- Trineeva, O. V. (2022). Biologicheski aktivnye veshchestva plodov oblepikhi krushinovidnoi (Hippophae rhamnoides L.) pri khraneni s primeneniem razlichnykh sposobov konservatsii: obzor predmetnogo polya [Biologically active substances of buckthorn buckthorn fruit (Hippophae rhamnoides L.) during storage using various conservation methods: review of the subject field]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya [Storage and Processing of Farm Products]*, (1), 32–54. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.269>
- Tutel'yan, V. A., Nikityuk, D. B., Burlyayeva, E. A., Khotimchenko, S. A., Baturin, A. K., Starodubova, A. V., Kambarov, A. O., Sheveleva, S. A., & Zhilinskaya, N. V. (2020). COVID-19: Novye vyzovy dlya meditsinskoi nauki i prakticheskogo zdravookhraneniya [COVID-19: New challenges for medical science and practical healthcare]. *Voprosy pitaniya [Nutrition Issues]*, 89(3), 6–13. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10024>
- Zaitseva, I. I., Shelamova, S. A., & Derkanosova, N. M. (2019). Vliyanie vyzhimok iz tykvy na protsess fermentatsii testa dlya krekerov [The effect of pumpkin pomace on the fermentation process of cracker dough]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Equipment and Technology of Food Production]*, 49(3), 470–478. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-470-478>
- Chen, C., Zhang, M., & Yang, C.-H. (2020). Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 63, Article 104953. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104953>
- Cui, R., & Zhu, F. (2020). Effect of ultrasound on structural and physicochemical properties of sweetpotato and wheat flours. *Ultrasonics sonochemistry*, 66, Article 105118. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105118>
- De Araujo, F. F., de Paulo Farias, D., Neri-Numa, I. A., Dias-Audibert, F. L., Delafiori, J., de Souza, F. G., Catharino, R. R., Kersul do Sacramento, C., & Pastore, G. M. (2020). Influence of high-intensity ultrasound on color, chemical composition and antioxidant properties of araca-boi pulp. *Food Chemistry*, 338, Article 127747. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127747>
- Koekkoek, W. A. C., & van Zanten, A. R. H. (2016). Antioxidant vitamins and trace elements in critical illness. *Nutrition in Clinical Practice*, 31(4), 457–474. <https://doi.org/10.1177/0884533616653832>
- Krasulya, O., Bogush, V., Potoroko, I., Tsirulnichenko, L., Khmelev, S., & Anandan, S. (2018). Sonochemical effects on food emulsions. *Agronomy Research*, 16(S2), 1396–1404. <https://doi.org/10.15159/AR.18.101>
- Kupaeva, N. V., & Kotenkova, E. A. (2019). Search for alternative sources of natural plant antioxidants for food industry. *Food Systems*, 2(3), 17–19. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-3-17-19>
- Majerska, J., Michalska, A., & Figiel, A. (2019). A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products. *Trends in Food Science and Technology*, 88, 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.021>
- Potoroko, I., Kalinina, R., Fatkullin, V., Botvinnikova, O., Krasulya, U., Bagale, U., & Sonawane, S. H. (2018). Ultrasound effects based on simulation of milk processing properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 463–472. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.06.019>
- Qiu, L., Zhang, M., Chitrakar, B., & Bhandari, B. (2020). Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, Article 105230. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105230>
- Uesugi, S., Ishihara, J., Iso, H., Sawada, N., Takachi, R., Inoue, M., & Tsugane, S. (2017). Dietary intake of antioxidant vitamins and risk of stroke: The Japan public health center-based prospective study. *European Journal of Clinical Nutrition*, 71(10), 1179–1185. <https://doi.org/10.1038/ejcn2017.71>
- Ulasevich, S. A., Gusinskaia, T. A., Semina, A. D., Gerasimov, A. A., Kovtunov, E. A., Iakovchenko, N. V., Orlova, O. Yu., & Skorb, E. V. (2020). Ultrasound-assisted fabrication of gluten-free dough for automatic producing dumplings. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, Article 105198. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105198>

УДК 007.52:631.171

Автоматизация управления процессами выращивания культур в тепличных комплексах вертикального типа

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Левоневский Дмитрий Константинович
E-mail: levonevskij.d@iias.spb.su

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Рябинов, А.В., Виноградов, М.С., Левоневский, Д.К., & Лоскутов, С.И. (2023). Автоматизация управления процессами выращивания культур в тепличных комплексах вертикального типа. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 201-213. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.381>

ПОСТУПИЛА: 15.11.2022

ПРИНЯТА: 02.07.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента № МК-5056.2022.1.6.



А. В. Рябинов, М. С. Виноградов, Д. К. Левоневский, С. И. Лоскутов

АННОТАЦИЯ

Введение: Современные методы и средства автоматизации технологических процессов в сельском хозяйстве и, в частности, в тепличных комплексах, являются предметом исследования многих научных коллективов, но многие решения носят частичный характер, т.е. обычно охватывают отдельные технологические параметры, либо позволяют осуществлять сбор данных о технологическом процессе (выполнять мониторинг), но не управлять процессами производства. Нередко решения рассчитаны в значительной мере на использование в ручном режиме или не предусматривают адаптивное управление параметрами теплицы. Такие решения не в полной мере удовлетворяют требованиям практики. Таким образом, необходимо повысить уровень автоматизации технологических процессов в вертикальных фермах за счет разработки методов, моделей и архитектуры адаптивного управления этими процессами.

Цель данной статьи – представить трехуровневую модульную архитектуру АСУ ТП современного тепличного комплекса, использующую в качестве интерфейса CAN-шину и характеризующуюся масштабируемостью, модульностью и возможностью охвата всех технологических процессов автоматического выращивания культур в теплицах.

Материалы и методы: В качестве объекта автоматизации рассмотрена теплица для вертикального выращивания микрозелени по технологии аэропоники низкого давления, оборудованная рядом инженерных систем. На основе исходных материалов и требований к такой системе разрабатывается трёхуровневая архитектура автоматизации. Оценивается реализуемость технологических процессов с использованием предложенных проектных и технических решений. В данной работе для этого используется критерий максимально допустимого времени реализации технологического процесса.

Результаты: Нижний уровень содержит датчики и исполнительные механизмы. Средний уровень содержит модули ввода и вывода, сбора данных, блоки управления. Верхний уровень представляет собой SCADA-систему, персональный компьютер, на котором развернут сервер, принимающий и агрегирующий информацию от модулей логики и сбора данных и предоставляющий пользователю графический интерфейс для управления процессами. Моделирование показывает способность системы на основе такой архитектуры соответствовать временным критериям, установленным для технологических процессов и взаимодействия с пользователями.

Выводы: Дальнейшая работа заключается в разработке спецификации на описываемые модули, формулировании требований к ним, выполнении проектирования, разработки, изготовления и испытаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

автоматизация сельского хозяйства, автоматизированные теплицы, автоматизированные системы управления технологическими процессами, киберфизические системы, умное производство

Automation of crop growing processes in vertical greenhouse complexes

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Russian Federation

Artem V. Ryabinov, Mikhail S. Vinogradov, Dmitry K. Levonevskiy, Svetoslav I. Loskutov

CORRESPONDENCE:

Levonevskiy Dmitry K.
E-mail: levonevskij.d@iias.spb.su

FOR CITATIONS:

Ryabinov, A.V., Vinogradov, M.S., Levonevskiy, D.K., & Loskutov, S.I. Automation of crop growing processes in vertical greenhouse complexes. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 201-213. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.381>

RECEIVED: 15.11.2022

ACCEPTED: 02.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The study was supported by Presidential Grant No. MK-5056.2022.1.6.



ABSTRACT

Background: Modern methods and means of automating technological processes in agriculture and, in particular, in greenhouse complexes, are the subject of research by many scientific teams, but many solutions are partial, i.e. usually cover individual technological parameters, or allow the collection of data about the technological process (monitoring), but not the management of production processes. Often solutions are designed largely for manual use or do not provide for adaptive control of greenhouse parameters. Such solutions do not fully satisfy the requirements of practice. Thus, it is necessary to increase the level of automation of technological processes in vertical farms through the development of methods, models and architecture for adaptive control of these processes.

Purpose: To present a three-level modular architecture of a process control system of a modern greenhouse complex, using a CAN bus as an interface and characterized by scalability, modularity and the ability to cover all technological processes of automatic crop cultivation in greenhouses.

Materials and Methods: A greenhouse for vertical cultivation of microgreens using low-pressure aeroponics technology, equipped with a number of engineering systems, is considered as an automation object. Based on the source materials and requirements for such a system, a three-level automation architecture is developed. The feasibility of technological processes using the proposed design and technical solutions is assessed. In this work, for this purpose, the criterion of the maximum permissible time for the implementation of the technological process is used.

Results: The lower level contains sensors and actuators. The middle level contains input and output modules, data acquisition, and control units. The top level is a SCADA system, a personal computer on which a server is deployed that receives and aggregates information from logic and data acquisition modules and provides the user with a graphical interface for managing processes. Simulation shows the ability of a system based on such an architecture to meet the timing criteria established for technological processes and interaction with users.

Conclusion: Further work consists of developing specifications for the described modules, formulating requirements for them, performing design, development, manufacturing and testing.

KEYWORDS

agricultural automation, automated greenhouses, automated process control systems, cyber-physical systems, smart manufacturing

ВВЕДЕНИЕ

Процесс выращивания культур в тепличных комплексах в том числе вертикальных фермах, требует поддерживать необходимые для этих культур микроклиматические условия — проветривание, температурный режим, освещение, полив и т.д. Требуется следить за микроклиматическими условиями в теплицах, так как даже кратковременное нарушение этих условий может привести к негативным последствиям, вплоть до гибели растений, что нанесет значительный ущерб предприятию. Операции, которые необходимо выполнять для поддержания микроклимата в теплице, определяются технологией выращивания той или иной культуры. Многие операции, такие как регулировка освещения, температуры, должны выполняться в соответствии с временным графиком, состоянием окружающей среды. Их ручное выполнение сопряжено с риском совершения ошибок из-за человеческого фактора (Kachanova & Levonevskiy, 2021). Напротив, автоматизация и интеллектуализация процессов сбора данных и управления выращиванием позволяют более точно управлять технологическими процессами и сделать их экономнее (Li et al., 2021; Cosman et al., 2019b). Это, в свою очередь, необходимое условие создания автоматизированных теплиц нового поколения (Гиш & Карпенко, 2016).

Перспективным направлением исследований и разработок является автоматизация управления технологическими процессами в теплицах. Это соответствует тренду Индустрии 4.0 (Schwab, 2017) и позволит создавать «умные теплицы» по аналогии с умными домами и производствами, способными не только автоматизировать технологические процессы, но и прогнозировать изменение внутренних параметров, адаптивно управлять автоматикой теплицы с использованием данных прогноза.

Современные системы автоматизации должны соответствовать определенным требованиям и отраслевым стандартам (Шишов, 2021). Архитектуры современных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) разделяются на три уровня: нижний — уровень поля; средний — уровень базовой автоматизации производственных процессов (контроллеры управления); верхний — уровень управления технологиями (SCADA-системы).

Нижний уровень содержит полевое оборудование: сенсоры, исполнительные устройства и их вспомогательные устройства, пульта управления. К задачам оборудования этого уровня относится измерение физических параметров и преобразование их в типовые виды электрических сигналов, получение управляющих сигналов от оборудования среднего уровня (контроллеров) и непосредственное управление технологическим процессом в соответствии с этими сигналами. Средний (управляющий) уровень формируется с помощью высокопроизводительных программируемых логических контроллеров с распределенной системой ввода-вывода. На верхнем уровне осуществляется централизованное управление и высокоуровневое управление технологическим процессом. В состав оборудования уровня входят рабочие места производственных операторов (АРМ) и серверы.

Важным требованием к АСУ ТП является модульность, при которой на среднем уровне происходит разделение управления на функциональные блоки (модули), каждый из которых отвечает за управление отдельным элементом процесса и соответствующим набором исполнительных механизмов. Более того, при проектировании систем автоматизации значительную роль играют интерфейсы, посредством которых модули соединяются друг с другом. При всем обилии проводных и беспроводных интерфейсов современные АСУ ТП в основном используют так называемые шинные интерфейсы (CAN, PROFIBUS), обеспечивающие таким системам масштабируемость и облегчающие обслуживание.

В данной работе предлагается трехуровневая модульная архитектура АСУ ТП современного тепличного комплекса, использующая в качестве интерфейса CAN-шину. Архитектура характеризуется масштабируемостью, модульностью и охватом всех технологических процессов выращивания культур в теплицах.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Системы и архитектуры

Существует ряд систем автоматизированного управления микроклиматом в закрытых тепличных комплексах. Например, Sivagami et al. (2018) представил автоматическую систему управления теплицей для снижения расхода воды при поли-

ве растений. Система круглосуточно отслеживает параметры микроклимата теплицы, в том числе влажность почвы, и в случае отклонения какого-либо параметра микроконтроллер управляет работой исполнительных механизмов для нормализации микроклимата. Предлагаемая система автоматического полива сочетает в себе капельный полив и распылитель, что позволило добиться экономии воды 48,78 % по сравнению с ручным поливом. Позже Sadek et al. (2023) представили интеллектуальную гидропонную и аэропонную систему для автоматизированных теплиц на основе технологии Интернета вещей (IoT), позволяющая повысить эффективность использования воды и энергии по сравнению с другими решениями. Известен и ряд других подходов, связанных с применением IoT в задаче управления теплицами (Maraveas et al., 2022).

Предложенная в Cosman et al. (2019a) система включает 3 датчика: освещенности, влажности и температуры. Такие системы используются в теплицах, где выращивают разные виды растений. С учетом этого авторы сформулировали правила, в соответствии с которыми на различных датчиках устанавливаются необходимые пороговые значения для поддержания здорового роста растений. Проведенные эксперименты доказали эффективность использования нечеткой логики для автоматизации системы орошения за счет снижения уровня водопотребления. С помощью разработанной системы удалось обеспечить поддержание температуры в теплице в пределах нормы. Для тех же показателей в Weldeasie et al. (2021) предложена система мониторинга и управления микроклимата в теплице, предусматривающая реакцию на недопустимые значения тех же показателей.

Система, представленная в Harivardhagini (2017), отличается от рассмотренной выше тем, что в нее дополнительно включена техническая возможность автоматического управления дверью с помощью инфракрасного датчика. Это дополнение позволяет предотвратить нарушения температурного режима внутри теплицы. Nicolosi et al. (2017) предложили адаптивную систему управления микроклиматом теплицы, которая одновременно использует нейронную сеть для прогнозирования состояния климата теплицы, а также подход нечеткой логики для управления скоростью воздушных потоков и температурой теплицы. Система реализована на базе инструментов Matlab. Его авторы пришли к выводу,

что согласованное управление скоростью воздушных потоков и температурой теплицы позволяет более эффективно использовать энергоресурсы.

Raj & Ananthi (2019) описывают автоматизированную систему сбора данных в теплице, использующую датчики температуры, влажности, влажности почвы и освещенности для отслеживания изменений параметров. Мониторинг осуществляется с помощью Google Cloud, а также с помощью СМС-информирования. Решение, предложенное в этой статье, не является надежным или расширяемым из-за используемых интерфейсов и протоколов. Нет возможности управлять параметрами, система выполняет только их мониторинг. Shah & Bhatt (2017) также предлагают систему мониторинга температуры, влажности воздуха и влажности почвы в теплице с использованием Arduino и Raspberry Pi, а также описывают программную архитектуру на основе облачных технологий. Akkaş & Sokullu (2017) рассматривают подход к мониторингу автоматизированных теплиц с использованием беспроводных сенсорных сетей.

Имеются также различные подходы к управлению технологическими процессами. Известны подходы к комплексному управлению освещением в автоматизированных теплицах (Chen et al., 2023), архитектуру системы автоматического управления температурой, влажностью воздуха и уровнями освещенности в теплице с помощью программируемого логического контроллера (Ko & Mon, 2014). Параметры регулируются с помощью реле, используются беспроводные интерфейсы связи. Однако предлагаемые системы не обеспечивают управление всеми параметрами, влияющими на процесс, в комплексе.

Технические решения

Gonzalez Perez & Calderon Godoy (2009) описывают систему автоматизации управления климатом (параметров температуры и влажности) теплицы. Реализована распределенная система управления на базе программируемого логического контроллера, подключенного к группе датчиков и исполнительных устройств по полевой шине PROFIBUS и децентрализованным периферийным станциям ET 200S. Несмотря на то, что используются решения промышленного уровня, а архитектура построена по трехуровневому принципу, данная система

охватывает лишь часть технологических процессов в теплице. Вопросы удалённого мониторинга рассматривают Aytekin & Levent (2016), рассматривая связку из микроконтроллера MSP430 с беспроводным сенсорным модулем Ez430-RF2500 для передачи сообщений с датчиков температуры и влажности.

Для передачи данных между контроллером и сервером в исследовании Ullah et al. (2018) использовалась технология GSM-GPRS, отличающаяся надёжностью и скоростью. Для удаленного мониторинга и анализа данных с датчиков, установленных в теплице, в предлагаемой системе используется концепция IoT, которая, по мнению ее авторов, является наиболее перспективной технологией подключения полевых устройств к беспроводному Интернету или к устройствам с дистанционным управлением (Tangarife & Díaz, 2017; Diaz & Carrera, 2019). Микроконтроллер ATmega328 управляет работой нагревателей, охладителей, диффузоров, ламп и водяных насосов для поддержания необходимого микроклимата для роста растений. Система была протестирована на небольшой вертикальной теплице. Проведенные эксперименты показали эффективность решения. Однако при тестировании системы точность управления параметрами окружающей среды оказалась невысокой из-за сложности оптимального позиционирования сенсорных элементов в пределах вертикальных тепличных комплексов. Этот эффект объясняется тем, что конструктивные особенности такого решения приводят к значительным отклонениям параметров микроклимата в различных точках теплиц.

Аналогичный набор параметров в исследовании Saha et al. (2017) также управляется микроконтроллером Atmega328. Основным отличием этой системы от рассмотренных выше является использование проводной инфраструктуры, что усложняет использование таких систем в тепличных комплексах. Подобные трудности характерны и для больших теплиц, несмотря на несомненные преимущества в скорости и стабильности связи между датчиками и модулями управления.

Таким образом, проблемы автоматизации технологических процессов в сельском хозяйстве и, в частности, в тепличных комплексах, являются предметом исследования многих научных коллективов, но многие решения носят частичный характер, т.е. обычно охватывают отдельные технологические

параметры, либо позволяют выполнять сбор данных, но не управлять процессами производства. При этом отсутствует открытый, целостный и комплексный подход к построению архитектуры АСУ ТП теплиц, в рамках которого: можно управлять всем технологическим процессом в теплице; архитектура является модульной, и возможно интегрировать существующие модули для управления отдельными параметрами и процессами; используются надежные коммуникационные интерфейсы и протоколы.

Существующие решения, рассчитанные в значительной мере на использование в ручном режиме или не предусматривающие адаптивный климат-контроль, не в полной мере удовлетворяют требованиям практики. Таким образом, необходимо повысить уровень автоматизации технологических процессов в вертикальных фермах за счет разработки методов, моделей и архитектуры адаптивного управления этими процессами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Для достижения указанной цели предлагается разработать архитектуру системы автоматизации технологических процессов в тепличных комплексах, удовлетворяющую следующим условиям:

- (1) используемые модули должны обеспечивать масштабируемость, расширяемость и модульность всей системы, позволяя устанавливать, удалять и заменять отдельные модули без влияния на процессы, не зависящие от них;
- (2) уровни архитектуры должны обеспечивать логическое разделение и минимизировать количество соединений между модулями, реализующими физические процессы, высокоуровневое управление и обработку потоков данных;
- (3) интерфейсы соединения должны обеспечивать быструю и надежную передачу данных, соответствующую требованиям технологических процессов в тепличных комплексах.

В качестве объекта автоматизации рассмотрим теплицу для вертикального выращивания микрозелени по технологии аэропоники низкого давления. Подобный объект должен быть оборудован следующими инженерными системами:

- (1) система досветки с помощью светодиодных фитоламп переменной яркости, обеспечивающая наряду с естественным освещением оптимальный уровень инсоляции для растений;
 - (2) система принудительной вентиляции, представляющая из себя набор приточных и вытяжных вентиляторов, заслонок с электроприводами;
 - (3) климатическая установка, представляющая из себя изолированный контур подачи подготовленного воздуха, охладитель воздуха, нагреватель воздуха, увлажнитель воздуха, одну или несколько заслонок с электроприводами;
 - (4) система испарительного охлаждения и доувлажнения (далее — СИОД), представляющая из себя насос высокого давления (далее — НВД), подключенный к водоснабжению и обеспечивающий подачу воды под высоким давлением на магистраль с набором туманообразующих форсунок;
 - (5) система полива, представляющая из себя насосы низкого давления, подключенные к поливному контуру, и обеспечивающая подачу питательного раствора;
 - (6) система зашторивания, представляющая из себя набор приводов для управления степенью зашторивания для ограничения поступающего естественного освещения.
 - вентилятор климатического контура (вкл/выкл, скорость вращения);
 - электроприводы заслонок климатической установки (% открытия).
- 2.2. Система принудительной вентиляции:
 - приточные вентиляторы (вкл/выкл, скорость вращения);
 - вытяжные вентиляторы (вкл/выкл, скорость вращения);
 - электроприводы заслонок системы принудительной вентиляции (% открытия).
 - 2.3. СИОД
 - насос высокого давления (вкл/выкл, скорость вращения двигателя, давление в системе, работа по циклам).
 - 2.4. Система досветки
 - фитолампы досветки (вкл/выкл, степень яркости, работа по циклам).
 - 2.5. Система полива
 - насос низкого давления (вкл/выкл, скорость вращения двигателя, работа по циклам).
 - 2.6. Система зашторивания
 - электропривод системы зашторивания (% открытия).

Сформулируем требования к системе автоматизации такого объекта, исходя из которых будет проектироваться архитектура АСУ ТП. Система автоматизации, разработанная для такого объекта, должна:

1. Обеспечить оперативный мониторинг и автоматическое управление для следующих технологических параметров:
 - температура воздуха;
 - влажность воздуха;
 - уровень освещенности;
2. Система должна обеспечить возможность автоматического и ручного управления следующими инженерными системами и включенными в них полевыми устройствами, а также мониторинг состояния этих систем и устройств:
 - 2.1. Климатическая установка:
 - охладитель воздуха (вкл/выкл, наличие воды в контуре);
 - увлажнитель воздуха (вкл/выкл, наличие воды в контуре);

Методы и инструменты

Исходя из требований к системе автоматизации, было принято решение о разработке модульной трехуровневой архитектуры. Датчики (температуры, влажности, освещенности, уровня, давления) и исполнительные устройства (реле, задатчики аналоговых сигналов) размещены на нижнем уровне. Модульность заключается в том, что на промежуточном уровне предполагается разделение функциональности системы по принципу управления отдельными технологическими процессами (например, поливом, освещением), за каждый из которых будет отвечать отдельное обособленное устройство (модуль).

Чтобы не ограничивать систему используемыми низкоуровневыми интерфейсами (наиболее распространены для датчиков интерфейсы 4–20 мА и 0–10 В, однако есть датчики, использующие в качестве интерфейса шину I2C или SPI), в архитектуру вклю-

ченые модули ввода и вывода в роли промежуточного интерфейса. Они считывают показания датчиков и передают их через интерфейс среднего уровня.

Поскольку многие технические процессы связаны с пересекающимися множествами показаний датчиков, используемых как входные данные, в качестве промежуточного интерфейса был выбран интерфейс CAN-шины. Использование этой шины позволяет значительно сократить количество кабельных соединений и надежно обеспечить связь каждого функционального модуля с каждым требуемым модулем ввода или вывода.

Процедура

Исследование строится следующим образом. На основе исходных материалов и требований к системе

автоматизации технологических процессов разрабатывается трёхуровневая система автоматизации. Модули системы распределяются по уровням, определяется состав и характер связи между ними. Затем оценивается реализуемость технологических процессов с использованием предложенных проектных и технических решений. В данной работе для этого используется критерий максимально допустимого времени реализации технологического процесса.

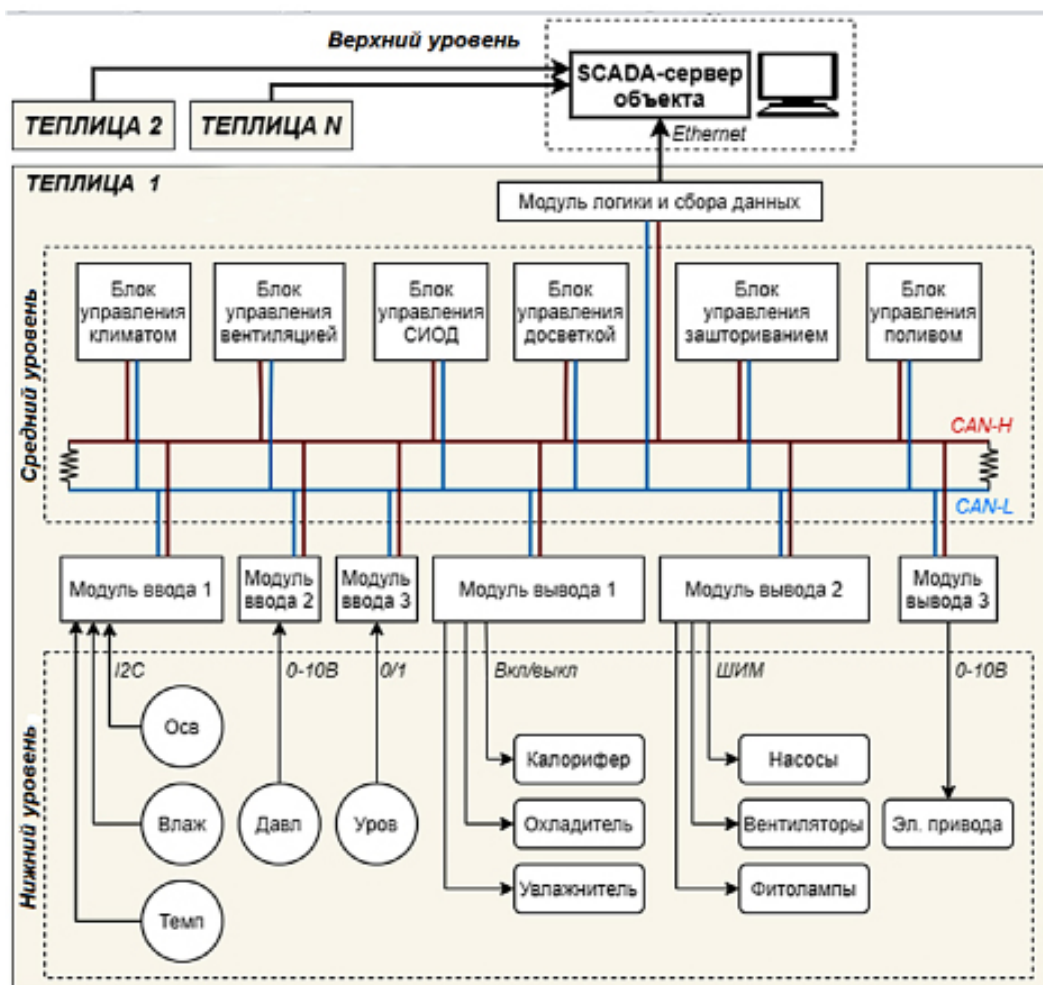
РЕЗУЛЬТАТЫ

Общее описание архитектуры

Блок-схема предлагаемой архитектуры представлена на Рисунке 1. Она разделяется на три уровня. Нижний уровень содержит датчики, исполнитель-

Рисунок 1

Архитектура системы управления технологическими процессами



ные механизмы, конечные аналоговые интерфейсы. Средний уровень включает в себя модули ввода и вывода, сбора данных, блоки управления. Верхний уровень предназначен для управления тепличными комплексами. Ниже приведём описание каждого уровня подробнее.

Нижний уровень

Для реализации технологического процесса на нижнем уровне необходимо оснастить систему следующими компонентами: датчики температуры воздуха; датчики влажности воздуха; датчики освещенности; датчики давления воды; датчик потока жидкости; датчики уровня; электромагнитные реле (для коммутации полевых устройств, подразумевающих двухпозиционный контроль, таких как калорифер); задатчики аналогового сигнала 0–10 В или 4–20 мА (для коммутации полевых устройств, подразумевающих аналоговый контроль, таких как заслонки); задатчики сигнала методом широтно-импульсной модуляции (далее — ШИМ) для управления полевыми устройствами, подразумевающими ШИМ-контроль, такими как лампы, насосы, вентиляторы. Возможность управления электроприводами с помощью аналогового сигнала 0–10 В обеспечивается тем, что электроприводы заслонок и штор оснащены соответствующей аппаратной обвязкой. Существуют готовые решения для теплиц и других индустрий, позволяющие принимать на вход как 0–5 В, 0–10 В, так и, к примеру, 4–20 мА.

Управлять двигателями переменного тока с помощью ШИМ невозможно напрямую. Однако общепринятой и широко распространенной практикой является использование при подключении электродвигателей частотных преобразователей с ШИМ-управлением. Такие преобразователи выполняют преобразование ШИМ-сигнала в частоту вращения двигателя, будь то электродвигатель насоса, вентилятора или любой другой трехфазный двигатель переменного тока. Поскольку такие преобразователи являются зачастую обязательными при установке электродвигателей (даже без ШИМ-контроля), на схеме они не указываются.

Средний уровень

Средний уровень необходим для обеспечения базовой автономной автоматизации (например, включения/выключения агрегатов по циклам и/или в зависимости от показаний датчиков), а также для подключения всех датчиков и исполнительных устройств к централизованной системе по CAN-шине. Предлагается архитектурное разделение системы на следующие управляющие модули (блоки) и спецификации соответствующих подсистем:

- (1) Модули аналогового и цифрового ввода-вывода. Представляют из себя переходные устройства-преобразователи для связи между нижним и средним уровнем. Предназначены для: i). обработки сигналов одного или нескольких подключенных к данному модулю датчиков и отправку полученных с этих датчиков данных по CAN-шине (модуль ввода), или наоборот ii). для обработки полученного по CAN-шине сообщения и преобразования его в соответствующий выходной сигнал (модуль вывода).
- (2) Блок управления климатом. Отвечает за контроль заданной температуры и влажности. В программу входит изменение уставки и гистерезиса, алгоритм управления. Получает информацию с датчиков температуры и влажности, уровня, потока жидкости; отправляет команды на включение/выключение охладителя, увлажнителя, изменение скорости вращения вентилятора климатического контура, открытие/закрытие заслонки климатического контура. Отвечает за безопасность работы данных устройств путем контроля наличия воды в их контурах при необходимости. Также обменивается информацией с блоком управления СИОД для изменения его циклов работы в случае необходимости.
- (3) Блок управления вентиляцией. Отвечает за управление воздухообменом теплицы. Отправляет команды на включение/выключение/изменение скорости приточного и вытяжного вентиляторов, изменение степени открытия заслонок вентиляции.
- (4) Блок управления СИОД. Отвечает за управление НВД СИОД, поддержание безопасности в системе (управление давлением в контуре), частоту работы СИОД. Получает информацию от датчика давления в магистрали НВД, отправляет команды на включение/выключение НВД, на изменение скорости вращения двигателя (ШИМ).

- (5) Блок управления досветкой. Отвечает за лампы досветки и/или зашторивание в тех или иных точках. В программу входит изменение уставки и гистерезиса, программы (день/ночь, имитация рассветов/закатов) работы фитоламп. Получает информацию от датчиков освещенности, отправляет команды на изменение яркости той или иной группы ламп (ШИМ). Также обменивается информацией с блоком управления зашториванием для изменения в случае необходимости степени зашторивания.
- (6) Блок управления системой зашторивания. Отвечает за управление системой зашторивания. Обменивается информацией с блоками управления климатом и управления досветкой. Отправляет команды на изменение степени открытия приводов штор.
- (7) Блок управления поливом. Отвечает за управление системой полива. В программу входит полив по циклам, изменение степени полива. Отправляет команды на включение/выключение поливных насосов, изменение скорости вращения двигателя (ШИМ).
- (8) Модуль логики и сбора данных. Является переходным устройством-мостом между средним и верхним уровнем. Получает и обрабатывает все данные со всех устройств CAN-шины, формирует и отправляет сообщения на верхний уровень по TCP/IP и в обратном направлении, производит логирование данных, хранит информацию о программах работы блоков управления, отправляет команды на изменение этих программ, осуществляет автоматическую диагностику системы, предоставляет отдельный сервисный пользовательский интерфейс для доступа к ручной диагностике и отладке устройств среднего и нижнего уровня.

Верхний уровень

В отличие от модуля логики и сбора данных, который является промежуточным устройством, обеспечивающим техническую возможность коммуникации между устройствами и уровнями системы, развёрнутая здесь система реализует высокоуровневое управление технологическими процессами и предназначена для взаимодействия с конечным пользователем. Верхний уровень включает в себя

персональный компьютер, на котором развернут сервер, получающий и агрегирующий информацию от модулей логики и сбора данных и предоставляющий пользователю графический интерфейс для мониторинга и управления технологическим процессом.

В рамках предложенного подхода возможно реализовать адаптивное управление производственным процессом, так как создаются условия для оперативного сбора данных и управления процессами в теплице, при котором используемые алгоритмы могут адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования системы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенная архитектура автоматизированной системы управления технологическими процессами для реализации в тепличных комплексах вертикальных гидропонных и аэропонных ферм включает датчики и исполнительные устройства на нижнем уровне, модули ввода-вывода, управления и сбора данных на промежуточном уровне, локальный сервер мониторинга на верхнем уровне. В отличие от ряда работ (Ko, 2014; Gonzalez Perez & Calderon Godoy, 2009), в предложенном решении обеспечивается управление полным набором параметров технологического процесса. Кроме того, этот набор параметров является расширяемым в силу модульности предложенной архитектуры и разделения её на логические уровни, что не в полной мере реализовано во многих разработках (Sivagami, 2018). Указанное разделение позволяет использовать облачные системы для полностью дистанционного управления производством, которое не поддерживается в некоторых решениях. За счёт многоуровневости архитектуры и использования шины CAN снижается количество связей между компонентами системы, что упрощает и удешевляет её по сравнению с решениями, подобными описанным у Saha & Bhatt (2017). В целом указанные преимущества обосновываются гибкостью использованных архитектурных решений, модульностью, используемыми технологиями связи.

Для количественной оценки полученных результатов необходимо проверить соответствие скорости выполнения процессов требованиям технологических процессов в тепличных комплексах. Для

выполнения моделирования учтём, что скорость передачи данных по протоколу CANopen с использованием CAN в качестве физического и канального уровня в OSI зависит от длины кабеля, как показано в Таблице 1.

Таблица 1

Скорость передачи данных в CAN

Скорость, кбит/с	Длина кабеля, м
1000	20
800	40
500	100
250	250
125	500
50	1000

Согласно сетевой стратегии Schneider Electric скорости 1 Мбит/с, 800 кбит/с, 500 кбит/с, 250 кбит/с и 125 кбит/с рекомендуются для решений по автоматизации на уровне машин и установок.¹ Длина CAN-шины в тепличных комплексах не превышает 250 м. Таким образом, при использовании выбранных технологий может быть обеспечена скорость не менее 250 кбит/с. В качестве примера рассмотрим аварийную ситуацию, когда необходимо срочно остановить насос в подсистеме СИОД из-за превышения давления. Соответствующий технологический процесс состоит из следующих этапов:

- (1) пакет с данными о давлении из модуля ввода поступает в модуль СИОД и модуль сбора данных;
- (2) модуль сбора данных отправляет указанный выше пакет на интерфейс;
- (3) модуль СИОД принимает решение об остановке насоса;
- (4) пакет аварийной остановки отправляется в модуль вывода и модуль сбора данных;
- (5) насос физически останавливается;
- (6) модуль сбора данных отправляет пакет подтверждения на указанный выше интерфейс.

С учетом скорости и размера CAN-пакета (10 байт), время передачи данных можно оценить как 0,00096

секунды. Процесс физической остановки насоса длится 0,5 секунды. Технологический процесс требует, чтобы все шаги выполнялись в течение 1 секунды. Таким образом, технологический лимит времени может быть соблюден при условии, что производительность программного обеспечения способна обрабатывать данные и принимать решения в течение необходимого интервала времени. Скорость передачи данных в пользовательский интерфейс также соответствует критерию 1 секунды, что обеспечивает администратору системы достаточный уровень управляемости².

ВЫВОДЫ

Данное исследование ставит целью повысить уровень автоматизации технологических процессов в вертикальных фермах. Эта цель достигается за счёт того, что разработанная архитектура позволяет управлять технологическим процессом, дистанционно выполнять его мониторинг, подключать и отключать модули, реализующие те или иные компоненты технологического процесса. Показано, что требования по времени к реализации процесса соблюдаются. Также предложенные решения позволяют использовать адаптивные и проактивные алгоритмы управления выращиванием культур (Zhang et al., 2023; Левоневский с соавт., 2023).

Областью применения полученных результатов является сельское хозяйство и, в частности, автоматизированные системы выращивания культур в тепличных комплексах. Ограничения при применении результатов состоят в первую очередь в протяжённости тепличных комплексов: при длине шины, превышающей 250 м, используемые технологии могут не обеспечить достаточную скорость передачи данных для соблюдения технологических процессов. За счёт использования функциональных модулей предлагаемая архитектура обеспечивает возможность сбора данных и управления всеми технологическими параметрами, такими как: микроклимат теплицы, полив, освещение, экранирование, вентиляция. Шина CAN используется в качестве основного коммуникационного интерфейса. За счёт многоуровневости и модульности архитектура соответствует современным от-

¹ What is the maximum cable length for a CANopen network? <https://www.se.com/ww/en/faqs/FA339840/>

² Response Times: The 3 Important Limits. <https://www.nngroup.com/articles/response-times-3-important-limits/>

раслевым требованиям к АСУ ТП, а за счет используемых интерфейсов надежна, легко расширяема и интегрируется в более сложные системы, такие как облачные системы мониторинга и управления. Модульность позволяет интегрировать сторонние решения в АСУ ТП.

Дальнейшие направления исследований заключаются в моделировании технологических процессов выращивания различных культур и экспериментальной оценке эффективности предложенных решений. Кроме того, для применения полученных результатов необходимо реализовать ряд практических задач. Во-первых, необходимо разработать спецификацию для описанных выше модулей, описать их функциональные характеристики и сформулировать функциональные и пользовательские требования к ним. Во-вторых, на основе этих требований предполагается выполнить проектирование, разработку и изготовление этих модулей. В-третьих, необходимо выполнить тестирование этих модулей и всей системы в лаборатории (например, в небольшой камерной теплице). Это позволит пе-

рейти к промышленному внедрению предложенных решений.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Рябинов Артём Валерьевич: концептуализация, разработка методологии исследования, проведение исследования, работа с программным обеспечением.

Виноградов Михаил Сергеевич: проведение исследования, подготовка черновика рукописи.

Левоневский Дмитрий Константинович: подготовка черновика рукописи, визуализация, проведение исследования, создание рукописи и её редактирование

Лоскутов Святослав Игоревич: проведение исследования, валидация данных, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование

ЛИТЕРАТУРА

- Гиш, Р. А., & Карпенко, Е. Н. (2016). Модернизация и совершенствование управления параметрами микроклимата — основа теплиц V поколения. *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, (9), Статья 129, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-123-129>
- Левоневский, Д. К., Рябинов, А. В., Жукова, Н. А., & Ковалевский, В. Э. (2023). Автоматизация выращивания агрокультур в стационарном компактном тепличном комплексе с контролируемым микроклиматом на базе гидропонной системы. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 11(1), Статья 029. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.029>
- Шишов, О. (2021). *Современные средства АСУ ТП*. М.: Инфра-Инженерия.
- Akkaş M. A., & Sokullu R. (2017). An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes. *Procedia Computer Science*, 113, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.300>
- Aytekin, S. A., & Levent, M. L. (2016). Greenhouse Automation using Wireless System. *International journal of engineering and computing*, 6, Article 2247850.
- Chen, X., Jiang, Z., Yang, J., Ren, J., Rao, Y., & Zhang, W. (2023). Data-driven decision support scheme for multi-area light environment control in greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, Article 108033, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108033>
- Cosman, S. I., Bilatiu, C. A., & Marțiș, C. S. (2019a). Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. In *2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)* (Article 18922639). Oradea, Romania. <https://doi.org/10.1109/EMES.2019.8795186>
- Cosman, S. I., Bilatiu, C. A., & Marțiș, C. S. (2019b). Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. In *2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)* (Article 18922639). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMES.2019.8795186>
- Diaz, P., & Carrera, R. (2019). IoT components for floriculture automation. In *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8988049>
- Gonzalez Perez, I., & Calderon Godoy, A. J. (2009). Greenhouse automation with programmable controller and decentralized periphery via field bus. In *2009 IEEE International Conference on Mechatronics* (Article 19353704). IEEE <https://dx.doi.org/10.1109/ICMECH.2009.4957160>
- Harivardhagini, S. (2017). LabVIEW based greenhouse automation. *CVR Journal of Science and Technology*, 13, 79–82.
- Kachanova, O., & Levonevskiy, D. (2021). Cloud-based architecture and algorithms for monitoring and control of an automated greenhouse complex. In *CoMeSySo 2021: Data*

- Science and Intelligent Systems, Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS)* (vol. 231, pp. 910–921). https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_76
- Ko, C. C., & Mon. S. S. (2014). Microcontroller based greenhouse automatic control system. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 3(5), 865–870.
- Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, Article 106558. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558>
- Maraveas, C., Piromalis, D., Arvanitis, K. G., Bartzanas, T., & Loukatos, D. (2022). Applications of IoT for optimized greenhouse environment and resources management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, Article 106993. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106993>
- Nicolosi, G., Volpe, R., & Messineo, A. (2017). An innovative adaptive control system to regulate microclimatic conditions in a greenhouse. *Energies* 10(5), Article 722. <https://doi.org/10.3390/en10050722>
- Raj, J. S., & Ananthi, J. V. (2019). Automation using IoT in greenhouse environment. *Journal of Information Technology*, 1, 38–47. <https://doi.org/10.36548/jitdw.2019.1.005>
- Sadek, N., Kamal, N., & Shehata, D. (In Press). Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 102341. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102341>
- Saha, T., Jewel, M. K. H., Mostakim, M. N., Bhuiyan, N. H., Ali, M. S., Rahman, M. K., Ghosh, H. K., Khalid Hossain, M. (2017). Construction and Development of an Automated Greenhouse System Using Arduino Uno. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*, 9(3), 1–8. <https://doi.org/10.5815/ijeeb.2017.03.01>
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Currency.
- Shah. N. P., & Bhatt. P. (2017): Greenhouse automation and monitoring system design and implementation. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(9), 468–471. <https://doi.org/10.26483/ijarcs.v8i9.4981>
- Sivagami, A., Hareeshvare, U., Maheshwar, S., & Venkatachalapathy, V. S. K. (2018). Automated irrigation system for greenhouse monitoring. *Journal of The Institution of Engineers*, 99(2), 183–191. <https://dx.doi.org/10.1007/S40030-018-0264-0>
- Tangarife, H. I., & Díaz, A. E. (2017). Robotic applications in the automation of agricultural production under greenhouse: A review. In *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)* (Article 17559075). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276478>
- Ullah, M. W., Mortuza, M. G., Humayun Kabir, M., & Ahmed, Z. U. (2018). Internet of things based smart greenhouse: Remote monitoring and automatic control. In *DEStech transactions on environment, energy and earth sciences*. (Article 27803). IEEE. <https://dx.doi.org/10.12783/dteees/iceee2018/27803>
- Weldeslasie, D. T., Assres, G., Gronli, T.-M., & Ghinea, G. (2021). Automated Climate Monitoring System: the Case of Greenhouse Industries in Ethiopia. *Internet of Things*, 15, Article 100426. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100426>
- Zhang, G., Zhang, L., Li, X., Gong, Z., & Dong, Y. (2023). An adaptive control method for the covers on the south roof of Chinese solar greenhouses: A case study of insulation blankets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, Article 107861. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107861>

REFERENCES

- Gish, R. A., & Karpenko, E. N. (2016). Modernizatsiya i sovershenstvovanie upravleniya parametrami mikroklimata — osnova teplits V pokoleniya [Modernization and improvement of microclimate parameters management is the basis of greenhouses of the 5th generation]. *Nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], (9), Article 129, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-123-129>
- Levonevskii, D. K., Ryabinov, A. V., Zhukova, N. A., & Kovalevskii, V. E. (2023). Avtomatizatsiya vyrashchivaniya agrokul'tur v statsionarnom kompaktnom teplichnom komplekse s kontroliruемым mikroklimatom na baze gidroponnoi sistemy [Automation of cultivation of agricultural crops in a stationary compact greenhouse complex with a controlled microclimate based on a hydroponic system]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology], 11(1), Article 029. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.029>
- Shishov, O. (2021). *Sovremennye sredstva ASU TP* [Modern automated process control systems]. Moscow: Infra-Inzheneriya.
- Akkaş M. A., & Sokullu R. (2017). An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes. *Procedia Computer Science*, 113, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.300>
- Aytekin, S. A., & Levent, M. L. (2016). Greenhouse Automation using Wireless System. *International journal of engineering and computing*, 6, Article 2247850.
- Chen, X., Jiang, Z., Yang, J., Ren, J., Rao, Y., & Zhang, W. (2023). Data-driven decision support scheme for multi-area light environment control in greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, Article 108033, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108033>
- Cosman, S. I., Bilatiu, C. A., & Marțiș, C. S. (2019a). Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. In *2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)* (Article 18922639). Oradea, Romania. <https://doi.org/10.1109/EMES.2019.8795186>
- Cosman, S. I., Bilatiu, C. A., & Marțiș, C. S. (2019b). Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. In *2019 15th International*

- Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)* (Article 18922639). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMES.2019.8795186>
- Diaz, P., & Carrera, R. (2019). IoT components for floriculture automation. In *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8988049>
- Gonzalez Perez, I., & Calderon Godoy, A. J. (2009). Greenhouse automation with programmable controller and decentralized periphery via field bus. In *2009 IEEE International Conference on Mechatronics* (Article 19353704). IEEE <https://dx.doi.org/10.1109/ICMECH.2009.4957160>
- Harivardhagini, S. (2017). LabVIEW based greenhouse automation. *CVR Journal of Science and Technology*, 13, 79–82.
- Kachanova, O., & Levonevskiy, D. (2021). Cloud-based architecture and algorithms for monitoring and control of an automated greenhouse complex. In *CoMeSySo 2021: Data Science and Intelligent Systems, Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS)* (vol. 231, pp. 910–921). https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_76
- Ko, C. C., & Mon. S. S. (2014). Microcontroller based greenhouse automatic control system. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 3(5), 865–870.
- Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, Article 106558. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558>
- Maraveas, C., Piromalis, D., Arvanitis, K. G., Bartzanas, T., & Loukatos, D. (2022). Applications of IoT for optimized greenhouse environment and resources management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, Article 106993. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106993>
- Nicolosi, G., Volpe, R., & Messineo, A. (2017). An innovative adaptive control system to regulate microclimatic conditions in a greenhouse. *Energies* 10(5), Article 722. <https://doi.org/10.3390/en10050722>
- Raj, J. S., & Ananthi, J. V. (2019). Automation using IoT in greenhouse environment. *Journal of Information Technology*, 1, 38–47. <https://doi.org/10.36548/jitdw.2019.1.005>
- Sadek, N., Kamal, N., & Shehata, D. (In Press). Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 102341. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102341>
- Saha, T., Jewel, M. K. H., Mostakim, M. N., Bhuiyan, N. H., Ali, M. S., Rahman, M. K., Ghosh, H. K., Khalid Hossain, M. (2017). Construction and Development of an Automated Greenhouse System Using Arduino Uno. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*, 9(3), 1–8. <https://doi.org/10.5815/ijieeb.2017.03.01>
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Currency.
- Shah. N. P., & Bhatt. P. (2017): Greenhouse automation and monitoring system design and implementation. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(9), 468–471. <https://doi.org/10.26483/ijarcs.v8i9.4981>
- Sivagami, A., Hareeshvare, U., Maheshwar, S., & Venkatachalapathy, V. S. K. (2018). Automated irrigation system for greenhouse monitoring. *Journal of The Institution of Engineers*, 99(2), 183–191. <https://dx.doi.org/10.1007/S40030-018-0264-0>
- Tangarife, H. I., & Díaz, A. E. (2017). Robotic applications in the automation of agricultural production under greenhouse: A review. In *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)* (Article 17559075). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276478>
- Ullah, M. W., Mortuza, M. G., Humayun Kabir, M., & Ahmed, Z. U. (2018). Internet of things based smart greenhouse: Remote monitoring and automatic control. In *DEStech transactions on environment, energy and earth sciences*. (Article 27803). IEEE. <https://dx.doi.org/10.12783/dteees/iceee2018/27803>
- Weldeslasie, D. T., Assres, G., Gronli, T.-M., & Ghinea, G. (2021). Automated Climate Monitoring System: the Case of Greenhouse Industries in Ethiopia. *Internet of Things*, 15, Article 100426. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100426>
- Zhang, G., Zhang, L., Li, X., Gong, Z., & Dong, Y. (2023). An adaptive control method for the covers on the south roof of Chinese solar greenhouses: A case study of insulation blankets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, Article 107861. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107861>

УДК: 633.11: 581.142:581.48: 621.373.8

Предпосевная оптическая обработка семян зерновых культур на примере озимой ржи «Фаленская 4»

¹ ООО «Научно-исследовательский институт «Агролазер»», г. Ижевск, Республика Башкортостан

² Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск, Республика Башкортостан

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Крылов Олег Николаевич

E-mail: olkrilov@rambler.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Крылов, О. Н., Киселев, М. М., Решетников, А. Е., & Абашева, О. Ю. (2023). Предпосевная оптическая обработка семян зерновых культур на примере озимой ржи «Фаленская 4». *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 214–230. <https://doi.org/10.36107/spfrp.2023.439>

ПОСТУПИЛА: 04.04.2023

ПРИНЯТА: 23.07.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



О. Н. Крылов¹, М. М. Киселев¹, А. Е. Решетников¹, О. Ю. Абашева²

АННОТАЦИЯ

Введение: В современных интенсивных технологиях растениеводства большое внимание уделяется химическим способам предпосевной обработки семян. При этом игнорируется отрицательное влияние такой обработки на энергию прорастания и всхожесть семян, что заставляет помимо протравителей ещё и применять дополнительно стимуляторы роста и развития растений. Альтернативное решение – применение когерентного излучения мощностью до 100 мВт. Ранее проведённые исследования на многих сельскохозяйственных культурах подтверждают стимулирующий эффект лазерного излучения (фотоактивации) на первоначальный рост и развитие растений. Однако дальнейшее влияние фотоактивации мало изучено. В данной работе показано развитие растений озимой ржи «Фаленская 4» после лазерной предпосевной обработки от всходов до уборки урожая.

Цель: Проверить ранее разработанную методику предпосевной оптической обработки семян, оценить эффективность такой обработки, подобрать наиболее оптимальные режимы, спроектировать оборудование на современной элементной базе, используя в качестве источников когерентного излучения полупроводниковые диоды.

Материалы и методы: Исследования реализовывались в 2018–2022 гг. в лаборатории ООО «НИИ «Агролазер» и на полях хозяйств Удмуртской Республики. В качестве материалов использовались семена озимой ржи «Фаленская 4». Источником когерентного излучения служила установка «Луч-5» с регулируемой мощностью излучателей. Экспозиции лазерной обработки устанавливались в соответствии с планом эксперимента. Контролем служили семена без лазерной предпосевной обработки.

Результаты: На момент уборки в вариантах с обработкой семян лазерным излучением отмечено, что (1) ранее разработанная методика предпосевной оптической обработки семян подтвердила свою эффективность – режимы такой обработки сохраняют свое влияние вне зависимости от состояния семян, места их происхождения. Эффект прироста урожайности озимой ржи «Фаленская 4» получен на одних и тех же режимах работы установки «Луч-5» вне зависимости от прочих факторов; (2) предпосевная лазерная обработка семян оказывает своё воздействие на весь период вегетации, отмечено существенное улучшение показателей развития растений начиная от посева и заканчивая уборкой; (3) растения озимой ржи после предпосевной лазерной обработки семян условия засухи переносят существенно лучше; (4) количество продуктивных стеблей возросло, что обеспечивает увеличением полевой всхожести семян, кущения в ходе развития растений и позволяет существенно снизить норму высева и, соответственно, затраты на производство продукции растениеводства; (5) как результат после предпосевной лазерной обработки семян увеличивается урожайность сельскохозяйственных культур. (6) увеличение урожайности культур без существенного роста затрат на возделывание ощутимо снижает затраты на производство продукции растениеводства.

Выводы: Полученные данные позволяют рекомендовать технологию предпосевной обработки, основанную на применении когерентного излучения, для семян озимой ржи «Фаленская 4» с целью увеличения урожайности сельскохозяйственных культур и снижения затрат на производство продукции растениеводства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

семена, озимая рожь «Фаленская 4», лазерная обработка, морфометрические показатели, урожайность, себестоимость производства

Pre-Sowing Optical Treatment of Seeds of Grain Crops on the Example of Winter Rye “Falenskaya 4”

¹ LLC «Research Institute “Agrolaser”», Izhevsk, Republic of Bashkortostan

² Udmurt State Agrarian University, Izhevsk, Republic of Bashkortostan

Oleg N. Krylov¹, Michail M. Kiselyov¹, Aleksandr E. Reshetnikov¹, Olga Yu. Abasheva²

CORRESPONDENCE:

Oleg N. Krylov

E-mail: olkriylov@rambler.ru

FOR CITATIONS:

Krylov, O. N., Kiselyov, M. M., Reshetnikov, A. E., & Abasheva, O. Yu. (2023). Pre-sowing optical treatment of seeds of grain crops on the example of winter rye “Falenskaya 4”. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 214-230. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.439>

RECEIVED: 04.04.2023

ACCEPTED: 23.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: In modern intensive technologies of the crop production, special attention is paid to chemical methods of the pre-sowing seed treatment. At the same time, the negative effect of such a treatment for the germination and the growth of seeds are ignored. So it is necessary to use plant growth and development stimulants additionally. The alternative solution method is the use of the coherent radiation with a power of up to 100 MW. Previously conducted studies of many agricultural crops confirm the stimulating effect of laser radiation (photo activation) for the initial growth and development of plants. However, the further effect of the photo activation has been little studied. This paper shows the development of winter rye plants «Falenskaya 4» after the laser pre-sowing treatment from the germination to harvesting.

Purpose: To develop and test the technique of the pre-sowing optical seed treatment, evaluate the effectiveness of such treatment, eliminate the effects associated with its instability, select the most optimal modes, design equipment on a modern element base using semiconductor diodes as sources of the coherent radiation.

Materials and Methods: The researches were carried out in 2018...2022 both in the laboratory of LLC «Research Institute «Agrolaser»» and in the fields of farms of the Udmurt Republic. Winter rye seeds «Falenskaya 4» provided by farms were taken as materials for these studies. The coherent radiation source was the Luch-5 installation with the adjustable power of the emitters. The exposure of the laser treatment was set in accordance with the experiment plan. Seeds without the laser pre-sowing treatment served as a control.

Results: At the time of the harvesting, the following was noted in the variants with the laser treatment of seeds: (1) Pre-sowing laser treatment retains its influence regardless of the condition of the seeds being processed, their place of the origin. The effect of the increase in the yield of winter rye «Falenskaya 4» was obtained on the same operating modes of the installation «Luch-5», regardless of other factors; (2) pre-sowing laser seed treatment has its effect on the entire growing season, there has been a significant improvement in plant development indicators from sowing to harvesting; (3) winter rye plants tolerate drought conditions significantly better after pre-sowing laser seed treatment; (4) the number of productive stems increased, which is provided by an increase in field germination of seeds, tillering during plant development and allows you to significantly reduce the seeding rate and, accordingly, the costs of the crop production; (5) as a result, after pre-sowing laser treatment of seeds, the yield of agricultural crops increases; (6) an increase in crop yields without a significant increase in cultivation costs significantly reduces the cost of the crop production.

Conclusion: The data obtained allow us to recommend the technology of pre-sowing treatment based on the use of coherent radiation for the seeds of winter rye “Falenskaya 4” in order to increase crop yields and reduce the cost of crop production.

KEYWORDS

seeds, winter rye “Falenskaya 4”, laser treatment, morphometric indicators, yield, production cost

ВВЕДЕНИЕ

В современных интенсивных технологиях растениеводства большое внимание уделяется химическим способам предпосевной обработки семян. При этом игнорируется отрицательное влияние такой обработки на энергию прорастания и всхожесть семян, что заставляет помимо собственно протравителей различного типа применять дополнительно стимуляторы роста и развития растений. Альтернативным методом решения в данном случае является применение когерентного оптического (лазерного) излучения (Инюшин с соавт., 1981; Долговых с соавт., 2007; Samiyaetal., 2020). Ранее проведённые исследования на многих сельскохозяйственных культурах подтверждают стимулирующий эффект лазерного воздействия на первоначальный рост и развитие растений (Умаров & Инюшин, 1991; Будаговский, 2007; Долговых с соавт., 2009а; Долговых с соавт., 2009б; Крылов, 2017; Якобенчук, 1989). Однако дальнейшее влияние фотоактивации мало изучено. В данной работе показано развитие растений озимой ржи «Фаленская 4» после лазерной предпосевной обработки от всходов до уборки урожая.

Метод предпосевной обработки семян зерновых культур оптическим когерентным излучением для повышения урожайности известен ещё с 70...80-х годов прошлого века. В те годы на базе армейских гелий-неоновых лазеров выпускались промышленные сельскохозяйственные установки (Рисунок 1). В них использовались дорогие, ненадежные и дефицитные газовые лазеры, не позволявшие регулировать мощность излучения в широком диапазоне. Эти установки использовались в хозяйствах до выработки короткого ресурса газовых лазеров. В ряде случаев сохранившееся подобное оборудование и в настоящее время применяют в исследовательских целях. Однако получаемые результаты достаточно часто оказываются крайне не стабильны. Начиная с 90-х годов 20-го века, преподаватели и студенты Удмуртского ГАУ занимаются исследованиями технологии предпосевной оптической (лазерной) обработки семян сельскохозяйственных культур (Акимов & Авраменко, 1991; Лекомцев с соавт., 2000; Долговых & Крылов, 2007; Чазова с соавт., 2009).

Рисунок 1

Установка «Львов-1 Электроника»



Цель данной работы — верифицировать ранее разработанную методику подбора режимов предпосевной оптической обработки семян, выбрать наиболее оптимальные режимы, оценить эффективность такой обработки, спроектировать оборудование на современной элементной базе, используя в качестве источников когерентного излучения полупроводниковые диоды^{1,2}. При этом необходимо учитывать особенности работы маломощных полупроводниковых лазерных диодов в устройствах предпосевной обработки. Так длина волны излучения и мощность излучения зависят от температуры кристалла и тока инжекции. Для стабилизации температуры маломощных лазеров в большинстве случаев достаточно пассивного теплоотвода (радиатора). Одновременно ток инжекции стабилизируется с использованием оптической обратной связи или датчика тока инжекции через усилитель на регулирующей элемент, в цепь которого включен лазер (Гусева & Киселев, 2017; Дородов с соавт., 2018; Гусева с соавт., 2013). При этом применение микроконтроллера (МК) для стабилизации тока инжекции, температуры и регулировки мощности излучения лазера значительно облегчает и упрощает использование лазера и позволяет управлять его излучением с сенсорного дисплея (Гусева & Киселев, 2019).

¹ Крылов, О. Н., Киселёв, М. М., & Салтыкова С. А. (2012). МПК А01С1/00. Устройство для предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур когерентным излучением. М.: Завьяловский.

² Долговых, О. Г., & Крылов, О. Н. (2009). Патент РФ № 2407264. Способ предпосевной обработки семян и устройство для его использования. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные эксперименты проводились в научно-исследовательском институте «Агролазер», опытно-промышленная проверка результатов выполнялась непосредственно на полях хозяйств Удмуртской Республики.

Материалы

В качестве материалов использовались семена, предоставленные непосредственно хозяйствами. Эти же семена использовались для посева в полях. Отбор семян по каким-либо критериям не производился, для посева на опытных и контрольных участках использовались семена непосредственно из бурта с зернотока.

Оборудование

В ходе полевых испытаний, начатых осенью 2018 года, использовалась установка «Луч-5»³ для оптической предпосевной обработки семян, разработанная авторами (Рисунок 2). В установке «Луч-5» заимствованы как элементы «Львов-1 Электроника» (в частности, способ развёртки луча лазера), так и основная идея — обработка семян в потоке. Неоценимую помощь при изготовлении оказал станко-ремонтный завод «ИжПРЭСТ».

Обработка семян ведется двумя лазерными диодами ML562G85 с длиной волны излучения 650 нм непосредственно на горизонтальном транспортере установки. При этом мощность диодов может быть выбрана в диапазоне от 20 до 100 мВт, скорость же ленты транспортера — 0,5...3,5 м/с. Диапазоны изменения мощности лазеров и скорости ленты определены исходя из результатов предыдущих работ и заданы конструктивно. Установка имеет цифровое управление и программный контроль параметров работы. Мощность диодов регулируется величиной проходящего через них тока, управление цепями питания микропроцессорное. Световой поток диодов распределяется по поверхности транспортера с помощью шестигранной зеркальной призмы с приводом от шагового двигателя.

Предварительная градуировка цепей питания диодов выполнялась с помощью измерителя мощности лазерного излучения LP1.

Методика

В сентябре 2018 года в поле (Рисунок 2) вблизи деревни Алгазы (ООО «Старозятцинское» Якшур-Бодьинского района Удмуртской Республики) озимой рожью «Фаленская-4» урожая 2018 года засеян опытный участок площадью 4 га. Закладывалось 13 опытных участков (Хартман, 1977) с различными режимами обработки (мощность излучателя, скорость ленты транспортера, норма высева) и одна контрольная делянка (Таблица 1), где использовались семена без предварительной предпосевной обработки. На всех участках применялась одна и та же агротехника выращивания. Семена во всех случаях предоставлялись хозяйством. Их обработка выполнялась непосредственно в поле перед посевом.

Наблюдения за развитием растений проводились 09.09.2018 года в фазе развития проростков (Рисунок 3), 19.10.2018 года в фазе кущения (Рисунок 4), 27.05.2019 года в фазе начала весенней вегетации (Рисунки 5, 6).

Рисунок 2

Установка для предпосевной обработки семян лазерным излучением



Примечание. Начало испытаний. ООО «Старозятцинское», обработка зерна в поле вблизи дер. Алгазы

³ Долговых, О. Г., & Крылов, О. Н. (2009). Патент РФ № 2407264. Способ предпосевной обработки семян и устройство для его использования. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

Таблица 1

План эксперимента с семенами озимой ржи «Фаленская-4» в полевой серии

Номер опыта	Порядок реализации	Фактор X_1 (скорость транспортёра, м/с)	Фактор X_2 (мощность излучателя, мВт)	Фактор X_3 (норма высева, кг/га)
1	6	1,568	100	240
2	7	1,568	20	240
3	8	1,568	100	200
4	9	1,568	20	200
5	10	2,404	60	240
6	1	0,801	60	240
7	11	2,404	60	200
8	2	0,801	60	200
9	12	2,404	100	220
10	3	0,801	100	220
11	13	2,404	20	220
12	4	0,801	20	220
13	5	1,568	60	220
Контроль	0	Не устанавливались		240

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты в ООО «Старозятцинское». Осенние наблюдения

Период конец августа-начало сентября 2018 года отличался локальной засухой — ясная сухая погода со среднесуточной температурой днем +15,4 °С, ночью +7,4 °С при отсутствии атмосферных осадков⁴. Так на территории Старых Зятцев по данным сайта www.gismeteo.ru в начале сентября 2018 года не отмечалось дней с осадками. При этом почвенный горизонт от недостатка влаги пересох, и семена высевались в сухую почву. В этих условиях влага, необходимая для развития растений, могла быть ими получена лишь в результате конденсации паров воды на поверхности почвы, что в большинстве случаев недостаточно для интенсивного развития растений. По существу на рисунке 3 в варианте «Контроль» именно эта ситуация и показана: се-

менам не хватает влаги для развития проростков, а потому многие из них не имеют даже признаков появления проростков. Иная ситуация с семенами, прошедшими лазерную предпосевную обработку. Большинство их через шесть дней после посева даже в условиях засухи имеют достаточно развитые проростки: пример — режимы Р1, Р3, Р5, Р7, Р8, Р9 и Р10 на Рисунке 3. Ускорение развития растений отмечается также и на иных культурах (Крылов с соавт., 2008; Крылов & Абашева, 2017).

Наблюдения за развитием растений проводились 09.09.2018 года в фазе развития проростков (Рисунок 3), 19.10.2018 года в фазе кущения (Рисунок 4).

В течение сентября⁵ — первой половины октября⁶ в районе Старых Зятцев отмечалось шесть дней с непродолжительными осадками. Соответственно количество осадков за этот период 2018 года не превысило 30 мм. По существу, не только всходы, но и дальнейшее развитие растений, проходи-

⁴ Дневник погоды в Старых Зятцах за Сентябрь 2018 г. <https://www.gismeteo.ru/diary/232991/2018/8/>

⁵ Дневник погоды в Старых Зятцах за Сентябрь 2018 г. <https://www.gismeteo.ru/diary/232991/2018/8/>

⁶ Дневник погоды в Старых Зятцах за Октябрь 2018 г. <https://www.gismeteo.ru/diary/232991/2018/9/>

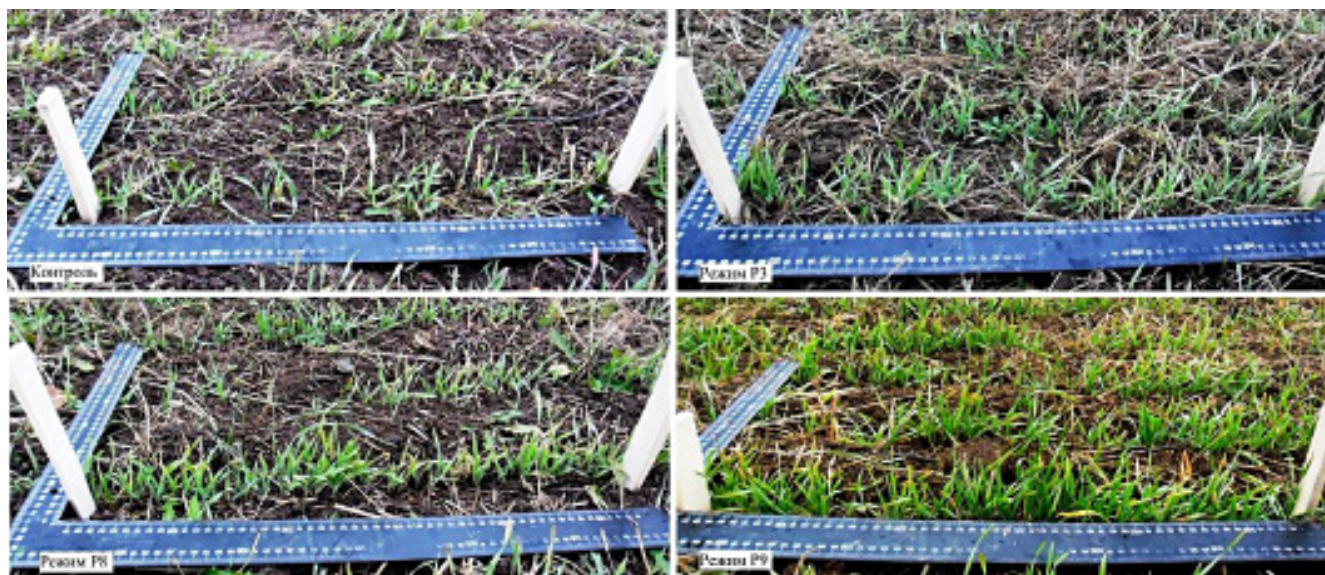
Рисунок 3

Состояние всходов озимой ржи «Фаленская 4» на «09» сентября 2018 года (ООО «Старозятцинское»)



Рисунок 4

Состояние всходов озимой ржи «Фаленская 4» на «19» октября 2018 года (ООО «Старозятцинское»)



ло при сильной нехватке влаги, что хорошо заметно на контрольной делянке (Рисунок 4).

При этом на 46 день растения, выросшие из семян после лазерной обработки, показали весьма хорошее развитие, как корневой системы, так и листово-

го аппарата. Сказанное можно проиллюстрировать данными, полученными 02.10.2018 года. Так средняя длина растений и её стандартное отклонение⁷ (Коняев, 1970; Коняев с соавт., 1975) для ряда режимов составили: «Контроль» — 57.9 мм и $\sigma = 13.5$, вариант P4—63.5 мм и $\sigma = 5.5$, вариант P6—69.9 мм

⁷ Доспехов, Б. А. (1985). *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. М.: Агропромиздат.

и $\sigma = 12.3$, вариант P8–73.1 мм и $\sigma = 4.4$, вариант P11–71.1 мм и $\sigma = 6.1$. Аналогичные эффекты описываются в работах Хэнаньского университета (Qui et al., 2017).

Хорошо заметно, что длина «лазерных» растений на 5–15 мм больше. Одновременно стандартное отклонение в вариантах P4, P8 и P11 в 2–3 раза меньше, нежели в контрольном варианте, что говорит о более высокой стабильности роста растений⁸ после лазерной предпосевной обработки семян. Даже при том, что визуальное ограничение для их развития, особенно в режиме P9 (Рисунок 4), является нехватка в растениях фосфора и калия, можно считать, что всходы озимой ржи после предпосевной лазерной обработки ушли под зиму более окрепшими и лучше подготовленными.

Результаты в ООО «Старозятцинское». Весенне-летние наблюдения

Осенний темп развития растений после лазерной обработки семян сохранился и весной 2019 года после перезимовки (Рисунки 5 и 6). Интенсивность развития растений, заложенная предпосевной обработкой семян еще осенью 2018 года, сохранилась и в течение лета. Летние условия в мае – августе

2019 года были достаточно благоприятными для развития растений. Количество осадков и среднесуточные температуры оказались весьма комфортными: май – осадки 76,1 мм, температура 20,3 °С; июнь – осадки 83,2 мм, температура 19,1 °С; июль – осадки 130,8 мм, температура 23,4 °С.

Результаты летнего развития растений показаны на снимках (Рисунки 7, 8), выполненных непосредственно в поле 11.06.2019 г. В большинстве вариантов лазерной предпосевной обработки семян ржи в снопах наблюдается увеличение числа растений, их длины и биологической массы. Одновременно хорошо заметно ускорение формирования колоса «лазерных» растений в сравнении с растениями с контрольных делянок. Уборка урожая на опытных участках проведена 30.08.2019 г. Результаты для ряда режимов обработки приведены в Таблице 2. Из таблицы исключены режимы P2, P4, P6 и P13, в которых влияние лазерного излучения оказалось сильно отрицательным. Причина – невозможность в данной статье привести подробный анализ такого влияния.

В большинстве вариантов с лазерной обработкой семян биологическая урожайность оказалась выше, нежели в контрольном варианте. Так прирост уро-

Таблица 2

Результаты уборки озимой ржи «Фаленская 4» (август 2019 года, ООО «Старозятцинское»)

Режим обработки	Биологическая урожайность (масса зерна, приведенная к 14 % влажности)		Количество продуктивных стеблей, шт/м ²	Масса 1000 зёрен, гр	Влажность, %	Продуктивность 1-го колоса	
	гр/м ²	прирост, %				гр	отклонение, %
Контроль	146,64		244,0	21,09	18,6	0,60	
P1	196,00	33,7 %	494,0	21,22	14,8	0,40	-34,0 %
P3	239,18	63,1 %	456,0	24,80	14,2	0,52	-12,7 %
P5	185,38	26,4 %	422,0	20,06	15,8	0,44	-26,9 %
P7	195,42	33,3 %	434,0	22,43	15,7	0,45	-25,1 %
P8	197,12	34,4 %	454,0	21,07	16,8	0,43	-27,8 %
P9	219,36	49,6 %	440,0	22,76	15,4	0,50	-17,0 %
P10	184,37	25,7 %	274,0	25,28	15,0	0,67	12,0 %
P12	191,70	30,7 %	530,0	21,65	16,1	0,36	-39,8 %

⁸ Там же.

жайности составил от 25,7% (режим P10) до 63,1% (режим P3).

Необходимо отметить увеличение количества продуктивных стеблей во всех приведенных вариантах предпосевной обработки семян в 1,2–2,0 раза, что уже обеспечивает прирост биологической урожайности. При этом данное увеличение хорошо совпадает с ростом коэффициента кущения растений, отмеченным в начале весны 2019 г.

Одной из особенностей лазерной обработки семян является ускорение созревания растений. Примером тому может служить снижение влажности убираемого зерна. Так в приведённых вариантах влажность зерна на контрольной делянке составила 18,6%. В случаях предпосевной обработки влажность зерна находилась в пределах от 14,2% (режим P3) до 16,8% (режим P8). По существу до 4,5% влаги растения теряют к моменту начала уборки,

что позволяет сэкономить до 45 кг печного топлива на каждой тонне убранных зерна.

Следующая особенность лазерной предпосевной обработки семян — увеличение массы 1000 зёрен в ряде режимов обработки. Так в варианте P3 такое увеличение составило 3,7 гр, в варианте P10—4,8 гр, в варианте P9—1,7 гр, что также обеспечивает увеличение урожайности. Кроме того, необходимо отметить снижение продуктивности 1-го колоса от 12% до 40% в сравнении с контролем во всех вариантах обработки, за исключением варианта P10. Причем такое снижение непосредственно связано, как уже отмечалось, с ростом количества продуктивных растений и стеблей. По существу, рост плотности растений в поле усиливает их конкуренцию в зоне питания, что снижает продуктивность 1-го колоса. Легко заметить, что в данном случае снижение продуктивности сильно коррелируется с количеством продуктивных стеблей в соответствующих режимах обработки.

Рисунок 5

Состояние растений (контроль, режимы P3, P8, P9) озимой ржи «Фаленская 4» на «27» мая 2019 года (ООО «Старозятинское»)

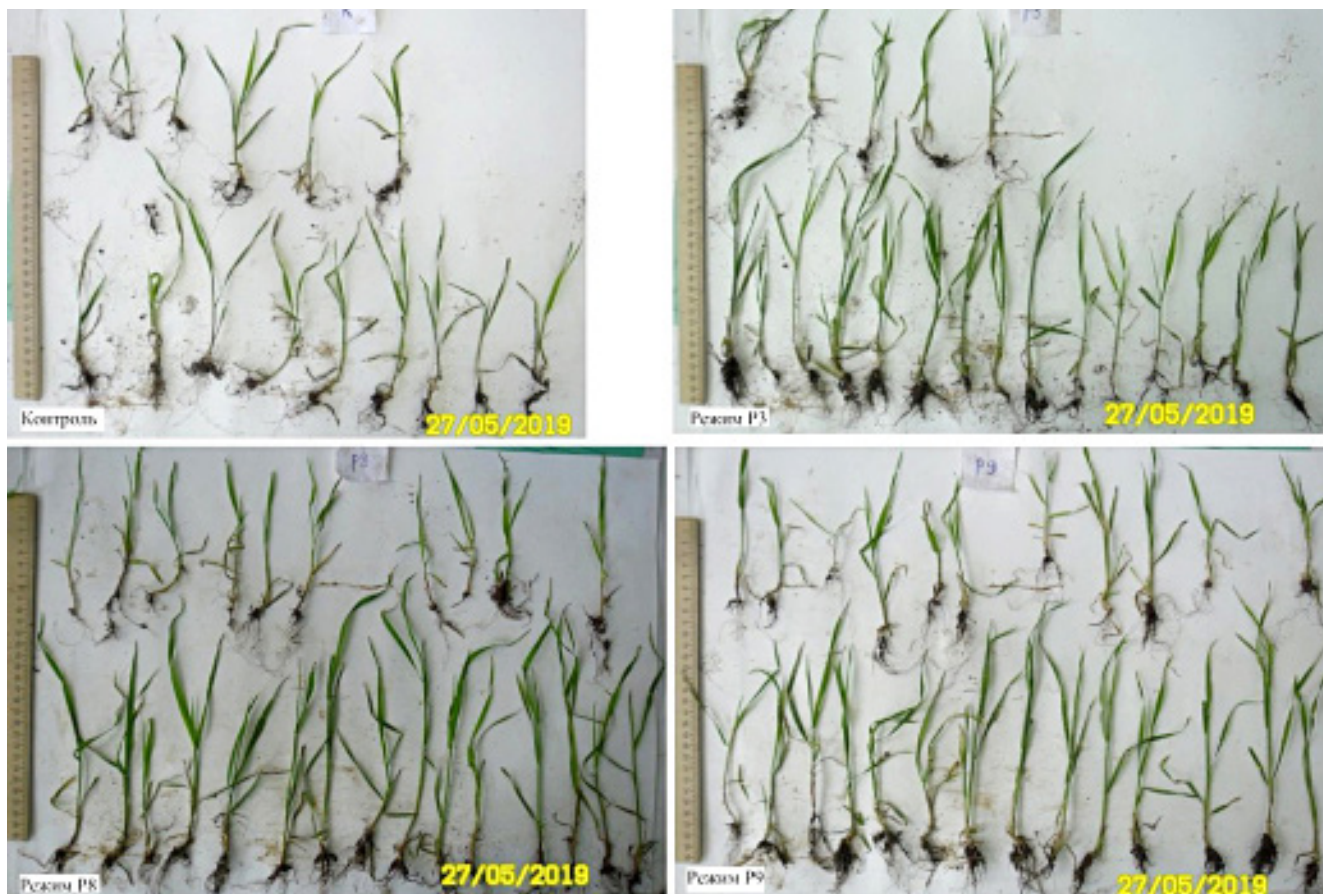


Рисунок 6

Состояние растений (контроль, режимы P1, P7, P12) озимой ржи «Фаленская 4» на «27» мая 2019 года (ООО «Старозятцинское»)

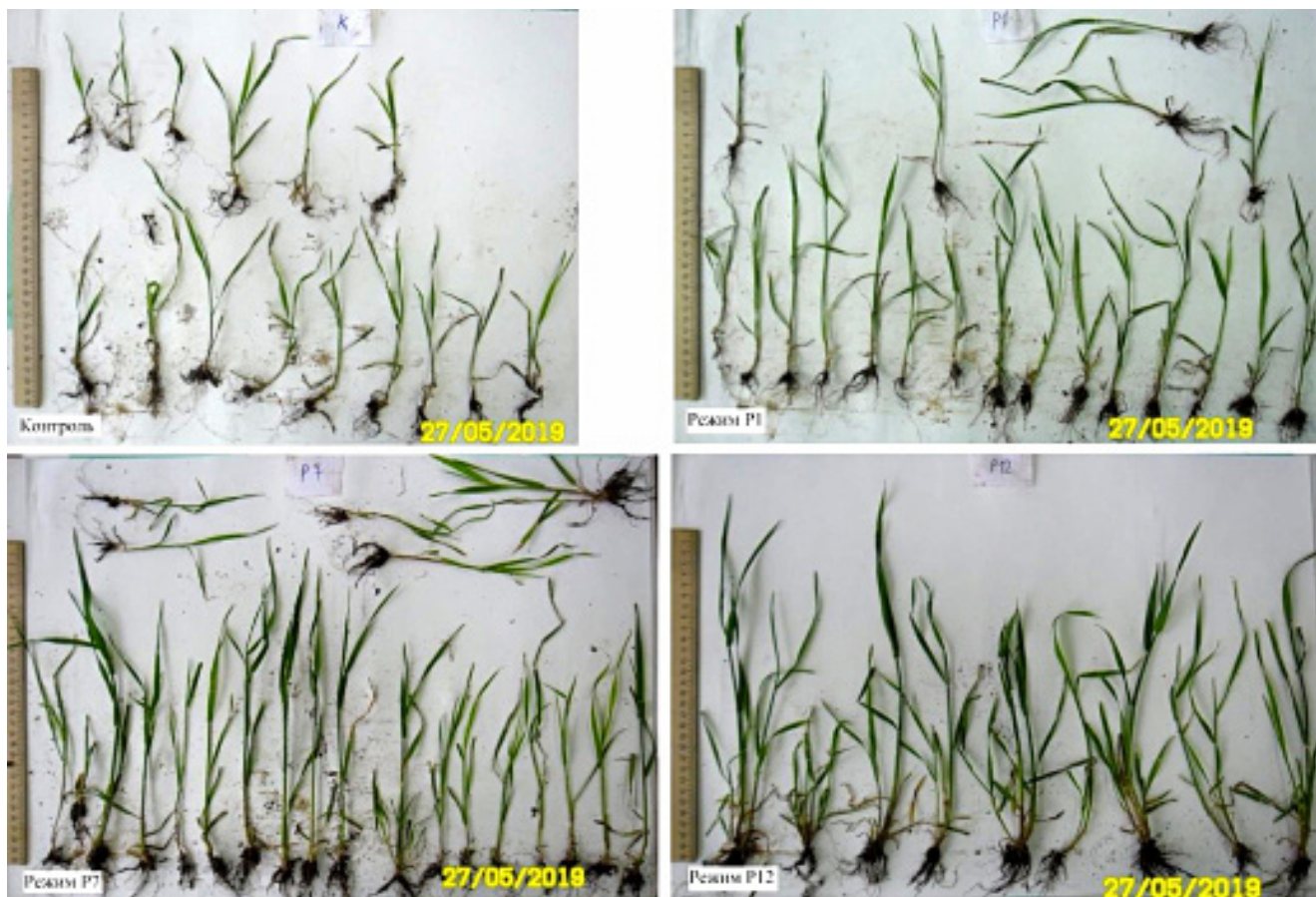


Рисунок 7

Состояние растений (контроль, режимы P3, P7, P8, P9) озимой ржи «Фаленская 4» на «11» июня 2019 года (ООО «Старозятцинское»)



Стой с деланки "Контроль" на всех снимках слева.

Рисунок 8

Состояние растений (контроль, режимы P1, P5, P10, P12) озимой ржи «Фаленская 4» на «11» июня 2019 года (ООО «Старозятцинское»)



Сноп с делитки "Контроль" на всех снимках слева.

На снимках, сделанных в поле 27.05.2019 года можно отметить существенно более мощное развитие растений (Рисунки 5, 6), а также большее количество растений на участках, засеянных семенами после лазерной обработки, вне зависимости от нормы высева (Таблица 2) семян. Можно также отметить и лучшую перезимовку таких растений. Другой особенностью стало увеличение коэффициента кущения растений озимой ржи в 1,5–2,0 раза, что особенно заметно в режиме P12 (Рисунок 6).

Результаты, полученные на севере Республики

В 2020–2021 годах в КФХ Снегирёва А.В. (Ярский р-н, север Удмуртии) в ходе обработки семян использованы результаты, полученные при работе с озимой ржи «Фаленская 4» в ООО «Старозятцинское». При этом ООО «Старозятцинское» расположено в 110 км южнее КФХ Снегирёва А.В.

Для предпосевной обработки семян ржи из таблицы 2 выбран режим P3 (скорость ленты транспортёра 1,568 м/с, мощность излучателя 100 мВт, норма высева 200 кг/га) с лучшим значением урожайности,

полученным на поле вблизи дер. Алгазы. При этом норма высева на контрольных участках соответствовала принятой в хозяйстве 220 кг/га.

Предпосевная обработка семян и сев выполнялась 24.08.2020 г. Осень 2020 года отличалась лучшими (в сравнении с 2018 годом) агроклиматическими условиям. Необходимо отметить и существенно более ранние сроки сева озимой ржи в КФХ Снегирёва А.В., нежели в Алгазах. Наблюдения за развитием растений озимой ржи «Фаленская-4» в данном случае выполнялись в фазе кущения (06.10.2020) и в фазе начала весенней вегетации (02.05.2021). В обоих случаях отмечается существенная разница в массе проб растений и их стеблей, снятых с контрольных и опытных делюнок. Так 06.10.2020 (Рисунок 9) для растений после лазерной предпосевной обработки средняя масса проб стеблей составила 49,5 гр., в контрольном варианте — 22,0 гр.

Аналогичную разницу можно отметить и для показателей средней массы 1-го стебля и средней длины стеблей. При этом количество растений в вариантах практически не отличалось, что может быть непосредственно связано со снижением нормы высева в сравнении с контролем.

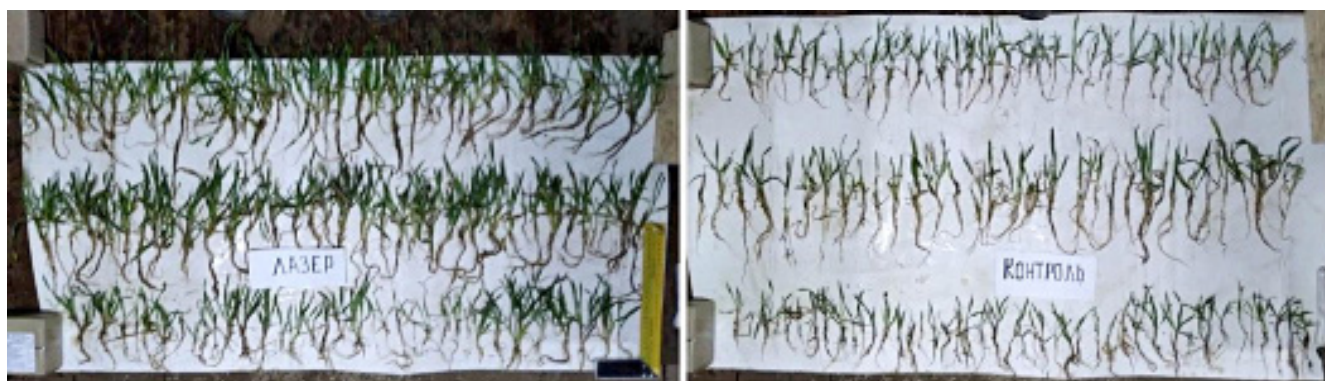
Рисунок 9

Состояние растений озимой ржи «Фаленская 4» на «06» октября 2020 года (КФХ Снигирёва А.В., Ярский р-н)



Рисунок 10

Состояние растений озимой ржи «Фаленская 4» на «02» мая 2021 года (КФХ Снигирёва А.В., Ярский р-н)



Подобная ситуация сохранилась и в начале весенней (Рисунок 10) вегетации (02.05.2021). Так разница в массе проб стеблей оказалась трехкратной (15,1 гр. в контроле против 45,6 у растений после лазерной обработки). Близкая разница имеется и для массы проб растений — 23,5 гр. в контроле против 67,2 у растений после лазерной обработки семян.

Говоря о развитии растений в фазе весенне-летней вегетации, необходимо упомянуть об агроклиматических условиях весны-лета 2021 г. Так, в мае⁹ среднее значение температуры воздуха составило днём +20 °С, ночью +10 °С. Осадки выпадали 4 дня: 01.05, 21.05, 22.05 и 30.05. По существу необходимо отметить, что в начале весенней вегетации, как и осенью 2018 года, наблюдалась нехватка влаги.

Ситуация усугубилась в июне-июле. Осадки в виде слабого дождя в июне¹⁰ выпадали 6 дней, в июле — 9 дней. При этом средние дневные температуры составили в июне +24 °С, в июле — +23 °С. Средние ночные температуры в эти же месяцы достигали +13 °С. По существу агроклиматические условия весны-лета 2021 года оказались близки к засухе.

С учетом агроклиматических условий лета 2021 года уборка экспериментальных участков на полях КФХ Снигирёва А.В. выполнялась 28.07.2021 года. На рисунке 11 показаны снопы озимой ржи, снятые с контрольных и опытных делянок непосредственно перед уборкой.

Для снопов с опытных делянок можно отметить как увеличение длины растений, так и мощности снопа

⁹ Дневник погоды в Пудеме за Май 2021 г. <https://www.gismeteo.ru/diary/233024/2021/5/>

¹⁰ Дневник погоды в Пудеме за Июнь 2021 г. <https://www.gismeteo.ru/diary/233024/2021/6/>

Рисунок 11

Состояние растений озимой ржи «Фаленская 4» на «28» июля 2021 года (КФХ Снегирёва А.В., Ярский р-н)



и количества растений в нем. Следует заметить, что, как и в ООО «Старозятцинское», растения озимой ржи после лазерной предпосевной обработки семян условия засухи переносят существенно лучше. Одновременно следует ожидать повышения урожайности таких растений. Структура урожая озимой ржи «Фаленская 4» в КФХ Снегирёва А.В. приведена в Таблице 3.

В варианте предпосевной обработки «Лазер» все приведённые параметры структуры оказались выше, нежели в контрольном варианте. Причем в ряде случаев существенно выше. Аналогичные результаты получены в Удмуртском ГАУ (Долговых с соавт., 2009а). В случае же с КФХ Снегирёва

А.В. для растений, выросших из обработанных лазером семян, наблюдается: (1) увеличение количества продуктивных стеблей в 2 раза; (2) увеличение массы 1000 семян на 1,2 гр. и продуктивности 1-го колоса на 0,16 гр.; (3) увеличение биологической урожайности зерна с 11,7 до 30,7 ц/га.

Применение предпосевной лазерной обработки семян озимой ржи в практической деятельности сельскохозяйственных организаций Удмуртской Республики позволит существенно повысить (Абашева & Лопатина, 2014) устойчивость развития зерновой отрасли и экономическую эффективность производства озимой ржи. Так, при расчете по минимальной цене продажи 8 тысяч рублей за 1 тонну

Таблица 3

Структура урожая озимой ржи «Фаленская 4» на «28» июля 2021 года (КФХ Снегирёва А.В., Ярский р-н)

Режим	Количество стеблей, шт/м ²	Количество продуктивных стеблей, шт/м ²	Средняя высота снопов, см	Масса снопа, гр/м ²	Влажность, %
Контроль	357,7	252,8	77,5	458,6	17,7
Лазер	596,5	491,6	117,7	1118,1	17,6
Прирост над контролем, %	66,80 %	94,50 %	51,80 %	143,80 %	-0,80 %

Режим	Масса зерна со снопа с пересчетом на 14 % влажности, гр/м ²		Биологическая урожайность, ц/га		Масса 1000 семян, гр	Продуктивность 1-го колоса, гр
	Среднее	σ	Средняя	σ		
Контроль	117,2	28,9	11,7	2,9	21,3	0,46
Лазер	307,1	46,5	30,7	4,6	22,5	0,62

зерна ржи¹¹ (Алексеева с соавт., 2022), только снижение затрат на семена¹² (в расчете на площадь посева в 2022 году — 55,9 тыс. га) с учетом страхового фонда составит 10,56 млн. рублей. Средний прирост урожайности по результатам опытов позволит получить на всей площади прирост валового сбора даже по нижней границе показателей в размере 35,3 тысяч тонн, дополнительная выручка составит 282,4 млн. рублей. Общий экономический эффект — 292,96 млн. рублей. Необходимо отметить, что вне зависимости от географических координат эффективность лазерной предпосевной обработки вполне сопоставима. По существу подобранные ранее режимы одинаково эффективны и в том, и в другом случае.

При этом наблюдается интенсификация развития растений уже на самых начальных стадиях их роста. Так растения, выросшие из семян после лазерной обработки, показали весьма хорошее развитие как корневой системы, так и листового аппарата. И в Алгазах (ООО «Старозятцинское»), и у КФХ Снигирёва А.В. отмечается существенная разница в массе проб растений и их стеблей, снятых с контрольных и опытных делянок. Так разница в массе проб стеблей осенью 2020 года в поле у КФХ Снигирёва А.В. оказалась трехкратной. При этом стандартное отклонение в вариантах с лазерной обработкой семян в 2–3 раза меньше, нежели в контрольных вариантах, что говорит о более высокой стабильности роста растений после лазерной предпосевной обработки семян.

Набранный осенний темп развития растений после лазерной обработки семян в обоих случаях сохраняется и весной после перезимовки. Нужно также отметить и лучшую перезимовку таких растений, существенно более мощное их развитие в ходе весенней вегетации.

Одновременно в случае с ООО «Старозятцинское» фиксировалось большее количество растений на участках, засеянных семенами после лазерной обработки, вне зависимости от нормы высева семян. Однако на полях КФХ Снигирёва А.В. количество растений в лазерном и контрольном вариантах практически не отличалось, что непосредственно

связано со снижением и более оптимальным выбором нормы высева в сравнении с контролем.

Одной из особенностей лазерной обработки семян является ускорение созревания растений. Примером тому может служить снижение влажности убираемого зерна, наблюдаемое в Алгазах (ООО «Старозятцинское»). В хозяйстве Снигирёва А.В. данный эффект отмечен не был прежде всего из-за весьма засушливого лета 2021 года.

Анализируя биологическую урожайность, полученную в поле как в Алгазах, так и у Снигирёва А.В. необходимо отметить следующее. В вариантах лазерной предпосевной обработки семян ржи в снопах наблюдается увеличение числа растений, их длины и биологической массы. Одновременно хорошо заметно ускорение формирования колоса «лазерных» растений в сравнении с растениями с контрольных делянок, фиксируется увеличение количества продуктивных стеблей в вариантах предпосевной обработки семян в 1,2–2,0 раза. При этом данное увеличение хорошо совпадает с ростом коэффициента кущения растений. Следующая особенность лазерной предпосевной обработки семян — увеличение массы 1000 зёрен в ряде режимов обработки. Так для КФХ Снигирёва А.В. такое увеличение массы 1000 семян составило 1,2 гр., для ООО «Старозятцинское» — 4,2 гр. (режим P10 табл. 2). Столь существенная разница опять же связана с засушливым летом 2021 года.

В работах с КФХ Снигирёва А.В. для растений, выросших из обработанных лазером семян, получено увеличение продуктивности 1-го колоса на 0,16 гр., что характерно для лазерной предпосевной обработки. Однако в Алгазах для таких растений зафиксировано снижение продуктивности 1-го колоса от 12% до 40% в сравнении с контролем. Причина здесь — высокие нормы высева семян в ряде режимов лазерной обработки. По существу, рост плотности растений в поле усиливает их конкуренцию в зоне питания, что снижает продуктивность 1-го колоса. Легко заметить, что в данном случае снижение продуктивности сильно коррелируется с количеством продуктивных стеблей в соответствующих режимах обработки.

¹¹ *Агро-содружество. Цены на зерно. Аналитический обзор.* (2023). <https://agrosod.ru/analytics/>

¹² *Zerno.Ru. Сев озимых в РФ по областям* (2023). <https://zerno.ru/node/16063> (дата обращения: 14.04.2023).

Для снопов с опытных делянок можно отметить как увеличение длины растений, так и мощности снопа и количества растений в нем. Следует заметить, что, и в ООО «Старозятцинское», и в поле КФХ Снигирёва А.В., растения озимой ржи после лазерной предпосевной обработки семян условия засухи переносят существенно лучше. Показанные особенности развития растений после лазерной предпосевной обработки семян обеспечивают существенный прирост биологической урожайности. В большинстве вариантов с лазерной обработкой семян биологическая урожайность оказалась выше, нежели в контрольном варианте. В случае с КФХ Снигирёва А.В. отмечено увеличение урожайности зерна с 11,7 до 30,7 ц/га (на 162%), в поле у деревни Алгазы зафиксирован прирост с 14,7 23,9 ц/га (на 63%).

ВЫВОДЫ

Работы, выполненные с озимой рожью «Фаленская 4» в хозяйствах Якшур-Бодьинского и Ярского районов, позволяют сделать следующие выводы. Ранее разработанная методика предпосевной оптической обработки семян подтвердила свою эффективность — режимы предпосевной лазерной обработки сохраняют свое влияние вне зависимости от состояния обрабатываемых семян, места и сроков их происхождения. Эффект прироста урожайности озимой ржи «Фаленская 4» получен на одних и тех же режимах работы установки «Луч-5» вне зависимости от прочих факторов. Аналогичный эффект отмечается также на иных зерновых культурах.

Предпосевная лазерная обработка семян оказывает своё воздействие на весь период вегетации растений, отмечено существенное улучшение показателей развития растений начиная от посева и заканчивая уборкой. Данный эффект хорошо заметен при длительных сроках вегетации, характерных для озимых культур. Растения озимой ржи после предпосевной лазерной обработки семян условия засухи переносят существенно лучше. При этом улучшается устойчивость развития растений в неблагоприятных погодных условиях. Количество продуктивных стеблей озимой ржи возросло на 87% в 2019 и 95% в 2021 годах, что по существу обеспечивается увеличением полевой всхожести семян, кущения в ходе развития растений. Как результат после предпосевной лазерной обработки

семян увеличивается урожайность сельскохозяйственных культур. Зафиксирован прирост урожайности на 63% в 2019 и 162% в 2021 годах. При этом появляется возможность существенно снизить норму высева семенного материала и, соответственно, затраты на производство продукции растениеводства. Увеличение же урожайности сельскохозяйственных культур без существенного роста затрат на возделывание ощутимо снижает затраты на производство продукции растениеводства.

Полученные результаты могут быть использованы как в сельскохозяйственных предприятиях в ходе предпосевной обработки семян, так и исследователями организациями при разработке технологий оптической обработки семян зерновых культур.

Дальнейшие направления исследований оптической предпосевной обработки могут быть посвящены как собственно отработке режимов работы установки «Луч-5» для иных сортов и культур, так и использованию в процессе обработки иных спектров лазерного излучения — прежде всего синего и зелёного.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Олег Николаевич Крылов: концептуализация, разработка методологии исследования, проведение исследования, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование.

Михаил Михайлович Киселев: проведение исследования, подготовка черновика рукописи.

Александр Егорович Решетников: подготовка черновика рукописи, визуализация, проведение исследования, работа с программным обеспечением.

Ольга Юрьевна Абашева: Проведение исследования, валидация данных, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование.

ЛИТЕРАТУРА

- Абашева, О. Ю., & Лопатина, С. А. (2014). Обоснование перспектив развития сельскохозяйственной организации на основе современных методов планирования. *Наука Удмуртии*, (3), 55–61.
- Акимов, В. И., & Авраменко, Н. Р. (1991). Световая стимуляция семян огурца в защищенном грунте. В *Вузовская наука — сельскохозяйственному производству: Материалы XXIV научно-производственной конференции* (с. 161). Ижевск: ИжСХИ.
- Алексеева, Н. А., Абашева, О. Ю., & Редников, В. Л. (2022). Экономико-статистические аспекты повышения эффективности использования сельскохозяйственных земель. *Modern Economy Success*, (3), 45–51.
- Будаговский, А. В. (2007). *Совершенствование электро-технологических лазерных методов обработки семян и растений [Кандидатская диссертация, Мичуринский государственный аграрный университет]*. М., Россия.
- Гусева, Н. В., & Киселев, М. М. (2017). Измерение доли интерференционной полосы фазовым методом. В *Научно-обоснованные технологии интенсификации сельскохозяйственного производства: Материалы Международной научно-практической конференции* (с. 245–247). Ижевск: Удмуртский государственный аграрный университет.
- Гусева, Н. В., Киселев, М. М., Дородов, П. В., Михеев, Г. М., & Морозов, В. А. (2013). Измерение плотности ВЧ и СВЧ энергии методом лазерной интерференционной термометрии. *Инженерный вестник Дона*, (1), 6–8.
- Гусева, Н. В., & Киселев, М. М. (2019). Разработка устройства для управления и стабилизации мощности излучения полупроводникового лазера. В *Аграрная наука — сельскохозяйственному производству: Материалы Международной научно-практической конференции* (т. 2, с. 236–239). Ижевск: Удмуртский государственный аграрный университет.
- Долговых, О. Г., & Красильников, В. В., Крылов, О. Н., & Газтдинов, Р. Р. (2009а). Формирование структуры урожайности при выращивании зерновых культур с использованием лазерных технологий в Удмуртии. В *Резервы экономического роста предприятий и организаций: Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции* (с. 44–47). Ижевск: Удмуртский государственный аграрный университет.
- Долговых, О. Г., Крылов, О. Н., & Красильников, В. В. (2009б). Применение когерентного излучения при возделывании зерновых. *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*, (1), 7–11.
- Долговых, О. Г., & Крылов, О. Н. (2007). Лазер и качество семян. В *Quality assurance of products, safety of production and environment: Proceedings of the contributions* (с. 44–45). Братислава: AlumniPress.
- Долговых, О. Г., Крылов, О. Н., Кузнецов, С. И., & Соловьев, А. И. (2007). Влияние предпосевной обработки семян кресс-салата и укропа когерентным излучением на развитие растений. В *Вавиловские чтения — 2007: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 120-й годовщине со дня рождения академика Николая Ивановича Вавилова* (с. 163–167). Саратов: Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова.
- Дородов, П. В., Гусева, Н. В., Киселев, М. М., & Михеев, Г. М. (2018). О методе смещения интерференционной картины током инъекции полупроводникового лазера. *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*, (2), 91–98.
- Инюшин, В. М., Ильясов, Г. У., & Федорова, Н. Н. (1981). Луч лазера и урожай. Алма-Ата: Кайнар.
- Коняев, Н. Ф. (1970). Математический метод определения площади листьев растений. *Доклады Всесоюзная академия сельскохозяйственных наук имени Ленина*, (9), 5–6.
- Коняев, Н. Ф., Житов, В. В., & Коняева, М. А. (1975). Формулы площади листьев некоторых сортов томата. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*, (5), 103–105.
- Крылов, О. Н., & Абашева, О. Ю. (2017). Цикличность производства овощей и эффективность тепличного хозяйства. *Овощи России*, (2), 92–96.
- Крылов, О. Н. (2017). Влияние предпосевной лазерной обработки семян на развитие и рост рассады огурца черес F1. *Овощи России*, (3), 42–48.
- Крылов, О. Н., Долговых, О. Г., & Альков, Н. К. (2008). Возможности лазерной обработки семян огурца. В *Научный потенциал — аграрному производству: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 450-летию вхождения Удмуртии в состав России* (с. 36–41). Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.
- Лекомцев, П. Л., Колесников, С. А., Долговых, О. Г., & Крылов, О. Н. (2000). О предпосевной обработке семян овощных культур лазерным излучением. В *Энергосбережение в сельском хозяйстве: к 70-летию ВИЭСХ: Труды 2-й Международной научно-технической конференции* (ч. 2, с. 328–329). М.: Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства.
- Умаров, Х. Т., & Инюшин, В. М. (1991). *Биофизические и физиологические показатели роста сельскохозяйственных культур под действием гелий-неонового лазера*. Ташкент: ФАН.
- Хартман, К. (1977). *Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов*. М.: Мир.
- Чазова, И. Ю., Осипов, А. К., Долговых, О. Г., Кондратьев, Д. В., & Крылов, О. Н. (2009). *Технико-экономическое*

обоснование внедрения новых технологий в овощеводстве закрытого грунта: Монография. Ижевск: КнигоГрад.

Якобчук, В. Ф. (1989). Эффективность светолазерного облучения семян. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, (4), 123–128.

Samia, M. S., Aftab, S., & Younus, A. (2020). Effect of low power laser irradiation on bio-physical properties of wheat seeds.

Information Processing in Agriculture, 7(3), 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.12.003>

Qiu, Z., Yuan, M., He, Y., Li, Y., & Zhang, Y. (2017). Physiological and transcriptome analysis of He-Ne laser pretreated wheat seedlings in response to drought stress. *Scientific REPOrTS*, 7, Article 6108. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06518-z>

REFERENCES

- Abasheva, O. Yu., & Lopatina, S. A. (2014). Obosnovanie perspektiv razvitiya sel'skokhozyaistvennoi organizatsii na osnove sovremennykh metodov planirovaniya [Substantiation of prospects for the development of an agricultural organization based on modern planning methods]. *Nauka Udmurtii [Udmurtia Science]*, (3), 55–61.
- Акимов, В. И., & Авраменко, Н. Р. (1991). Svetolazernaya stimulatsiya semyan ogurtsa v zashchishchennom grunte [Light laser stimulation of cucumber seeds in protected ground]. In *Vuzovskaya nauka — sel'skokhozyaistvennomu proizvodstvu: Materialy XXIV nauchno-proizvodstvennoi konferentsii [Higher Education science — agricultural production: Materials of the 24th scientific and production conference]* (p. 161). Izhevsk: IzhSKhI.
- Alekseeva, N. A., Abasheva, O. Yu., & Rednikov, V. L. (2022). Ekonomiko-statisticheskie aspekty povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya sel'skokhozyaistvennykh zemel' [Economic and statistical aspects of increasing the efficiency of agricultural land use]. *ModernEconomySuccess*, (3), 45–51.
- Budagovskii, A. V. (2007). *Sovershenstvovanie elektrotekhnologicheskikh lazernykh metodov obra-botki semyan i rastenii [Improvement of electrotechnological laser methods of seed and plant treatment]* [Candidate Dissertation, Michurinskii gosudarstvennyi ag-rarnyi universitet]. Moscow, Russia.
- Chazova, I. Yu., Osipov, A. K., Dolgovykh, O. G., Kondrat'ev, D. V., & Krylov, O. N. (2009). *Tekhni-ko-ekonomicheskoe obosnovanie vnedreniya novykh tekhnologii v ovoshchevodstve zakrytogo grunta: Monografiya [Feasibility study of the introduction of new technologies in indoor vegetable growing: Monograph]*. Izhevsk: KnigoGrad.
- Dolgovykh, O. G., & Krasil'nikov, V. V., Krylov, O. N., & Gaztdinov, R. R. (2009a). Formirovanie struktury urozhainosti pri vyrashchivani zernovykh kul'tur s ispol'zovaniem lazernykh tekhnologii v Udmurtii [Formation of the yield structure in the cultivation of grain crops using laser technologies in Udmurtia]. In *Rezervy ekonomicheskogo rosta predpriyatii i organizatsii: Sbornik statei IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [The reserves of economic growth of enterprises and organizations: Collection of articles of the 4th All-Russian scientific and practical conference]* (pp. 44–47). Izhevsk: Udmurtskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet.
- Dolgovykh, O. G., & Krylov, O. N. (2007b). Lazer i kachestvo semyan [Laser and seed quality]. In *Quality assurance of products, safety of production and environment: Proceedings of the contributions [Ensuring product quality, production safety and the environment: Materials of reports]* (pp. 44–45). Bratislava: AlumniPress.
- Dolgovykh, O. G., Krylov, O. N., & Krasil'nikov, V. V. (2009). Primenenie kogerentnogo izlucheniya pri vozdeystvii zernovykh [The use of coherent radiation in the cultivation of cereals]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskii gosudarstvennyi agro-inzhenernyi universitet imeni V. P. Goryachkina" [Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "V. P. Goryachkin Moscow State Agroengineering University"]*, (1), 7–11.
- Dolgovykh, O. G., Krylov, O. N., Kuznetsov, S. I., & Solov'ev, A. I. (2007). Vliyanie predpsevnoi obrabotki semyan kress-salata i ukropa kogerentnym izlucheniem na razvitie rastenii [The effect of pre-sowing treatment of watercress and dill seeds by coherent radiation on plant development]. In *Vavilovskie chteniya — 2007: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 120-i godovshchine so dnya rozhdeniya akademika Nikolaya Ivanovicha Vavilova [Vavilov Readings — 2007: Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 120th anniversary of the birth of Academician Nikolai Ivanovich Vavilov]* (pp. 163–167). Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni N. I. Vavilova.
- Dorodov, P. V., Guseva, N. V., Kiselev, M. M., & Mikheev, G. M. (2018). O metode smeshcheniya inter-ferentsionnoi kartiny tokom inzhetskii poluprovodnikovogo lazera [On the method of displacement of the interference pattern by the injection current of a semiconductor laser]. *Vestnik Izhevskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii [Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy]*, (2), 91–98.
- Guseva, N. V., & Kiselev, M. M. (2017). Izmerenie doli interferentsionnoi polosy fazovym me-todom [Measurement of the interference fringe fraction by the phase method]. In *Nauchno-obosnovannye tekhnologii intensivatsii sel'skokhozyaistvennogo proiz-vodstva: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Science-based technologies of intensification of agricultural production: Materials of the International*

- scientific and practical conference] (pp. 245–247). Izhevsk: Udmurtskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet.
- Guseva, N. V., & Kiselev, M. M. (2019). Razrabotka ustroystva dlya upravleniya i stabilizatsii moshchnosti izlucheniya poluprovodnikovogo lazera [Development of a device for controlling and stabilizing the radiation power of a semiconductor laser]. In *Agrarnaya nauka – sel'skokhozyaistvennomu proizvodstvu: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Agricultural Science – agricultural production: Materials of the International scientific and practical conference]* (vol. 2, pp. 236–239). Izhevsk: Udmurtskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet.
- Guseva, N. V., Kiselev, M. M., Dorodov, P. V., Mikheev, G. M., & Morozov, V. A. (2013). Izmerenie plotnosti VCh i SVCh energii metodom lazernoi interferentsionnoi termometrii [Measurement of RF and microwave energy density by laser interference thermometry]. *Inzhe-nernyi vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, (1), 6–8.
- Inyushin, V. M., Il'yasov, G. U., & Fedorova, N. N. (1981). *Luch lazera i urozhai [Laser beam and harvest]*. Alma-Ata: Kainar.
- Khartman, K. (1977). *Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Planning an experiment in the study of technological processes]*. Moscow: Mir.
- Konyaev, N. F. (1970). Matematicheskii metod opredeleniya ploshchadi list'ev rastenii [A mathematical method for determining the area of plant leaves]. *Doklady Vsesoyuznaya akademiya sel'skokhozyaistvennykh nauk imeni Lenina [Reports of the All-Union Academy of Agricultural Sciences named after Lenin]*, (9), 5–6.
- Konyaev, N. F., Zhitov, V. V., & Konyaeva, M. A. (1975). Formuly ploshchadi list'ev nekotorykh sortov tomata [Formulas for the leaf area of some tomato varieties]. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki [Siberian Bulletin of Agricultural Science]*, (5), 103–105.
- Krylov, O. N. (2017). Vliyanie predposevnoi lazernoi obrabotki semyan na razvitie i rost rassady ogurtsa tseres F1 [The effect of pre-sowing laser seed treatment on the development and growth of cucumber seedlings ceres F1]. *Ovoshchi Rossii [Vegetables of Russia]*, (3), 42–48.
- Krylov, O. N., & Abasheva, O. Yu. (2017). Tsiklichnost' proizvodstva ovoshchei i effektivnost' tep-lichnogo khozyaistva [The cyclical nature of vegetable production and the efficiency of greenhouse farming]. *Ovoshchi Rossii [Vegetables of Russia]*, (2), 92–96.
- Krylov, O. N., Dolgovykh, O. G., & Al'kov, N. K. (2008). Vozmozhnosti lazernoi obrabotki semyan ogurtsa [The possibilities of laser treatment of cucumber seeds]. In *Nauchnyi potentsial – agrarnomu proizvodstvu: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 450-letiyu vkhozhdeniya Udmurtii v sostav Rossii [Scientific potential – agricultural production: Materials of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 450th anniversary of the entry of Udmurtia into Russia]* (pp. 36–41). Izhevsk: Izhevskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaistvennaya akademiya.
- Lekomtsev, P. L., Kolesnikov, S. A., Dolgovykh, O. G., & Krylov, O. N. (2000). O predposevnoi ob-rabotke semyan ovoshchnykh kul'tur lazernym izlucheniem [About pre-sowing treatment of vegetable seeds by laser radiation]. In *Energoberezhenie v sel'skom kho-zyaistve: k 70-letiyu VIESKh: Trudy 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Energy Saving in Agriculture: to the 70th Anniversary of RES: Proceedings of the 2nd International scientific and technical conference]* (part 2, pp. 328–329). Moscow: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut elektrifikatsii sel'skogo khozyaistva.
- Umarov, Kh. T., & Inyushin, V. M. (1991). *Biofizicheskie i fiziologicheskie pokazateli rosta sel'-skokhozyaistvennykh kul'tur pod deistviem gelii-neonovogo lazera [Biophysical and physiological indicators of crop growth under the action of a helium-neon laser]*. Tashkent: FAN.
- Yakobenchuk, V. F. (1989). Effektivnost' svetolazernogo oblucheniya semyan [The effectiveness of laser irradiation of seeds]. *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki [Bulletin of the Russian Agricultural Science]*, (4), 123–128.
- Samiya, M. S., Aftab, S., & Younus, A. (2020). Effect of low power laser irradiation on bio-physical properties of wheat seeds. *Information Processing in Agriculture*, 7(3), 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.12.003>
- Qiu, Z., Yuan, M., He, Y., Li, Y., & Zhang, Y. (2017). Physiological and transcriptome analysis of He-Ne laser pretreated wheat seedlings in response to drought stress. *Scientific REPOrTS*, 7, Article 6108. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06518-z>

УДК 634.11: 663.813

Яблочные выжимки как источник функциональных пищевых ингредиентов: обзор предметного поля

¹ ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи, г. Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³ ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», г. Москва, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Коденцова Вера Митрофановна

E-mail: kodentsova@ion.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Коденцова, В.М., Рисник, Д.В., Серб, Е.М., Абрамова, И.М., Туршатов, М.В., & Соловьев, А.О. (2023). Яблочные выжимки как источник функциональных пищевых ингредиентов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 231-242. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.430>

ПОСТУПИЛА: 25.12.2022

ПРИНЯТА: 15.06.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.06.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках поисковых научных исследований по теме № FGMF-2023-0004.



В. М. Коденцова¹, Д. В. Рисник², Е. М. Серб³, И. М. Абрамова³, М. В. Туршатов³, А. О. Соловьев³

АННОТАЦИЯ

Введение: Яблочные выжимки представляют собой побочный продукт, образующийся при производстве соков. Масса яблочных выжимок в зависимости от способа производства сока и используемой аппаратуры может составлять от 28 до 60% от массы исходного сырья.

Цель: В данной обзорной статье представлен анализ возможности использования яблочных выжимок в качестве функционального компонента пищевых продуктов.

Материалы и методы: Обзор существующей по проблеме литературы за последние годы осуществляли по базам данных РИНЦ, Pubmed и в системах Google Scholar. Были проанализированы данные по содержанию биологически активных веществ в яблочных выжимках, а также количеству, вводимому в различные пищевые продукты, а также проведена оценка возможности обогащения рациона биологически активными веществами, исходя из норм физиологической потребности организма в пищевых волокнах.

Результаты: По своей сути яблочные выжимки представляют собой концентрат пищевых волокон, содержащий значительное количество природных антиоксидантов (фенольные соединения), связанных с углеводной матрицей. В отношении организма человека яблочные выжимки сочетают в себе свойства двух типов веществ – пищевых волокон и антиоксидантов. В технологическом отношении яблочные выжимки являются функциональным ингредиентом, обладающим влаго- и маслоудерживающей способностью, улучшают текстуру, повышают антиоксидантную активность продукта.

Выводы: Введение яблочных выжимок в рецептуру обеспечивает не только улучшение технологических свойств хлеба и мучных кондитерских изделий (кексы, печенье, бисквиты, крекеры), молочных ферментированных (йогурты), мясных (сосиски, колбасы, мясорубленные изделия), экструдированных и других продуктов, вызывая некоторое потемнение конечного продукта, но и повышает пищевую ценность за счет увеличения содержания пищевых волокон и антиоксидантных свойств продукта. Включение яблочных выжимок в рацион крыс с высоким содержанием жира и сахарозы приводит к улучшению липидного профиля сыворотки крови, препятствует повышению массы тела. Яблочная выжимка является функциональным, экономичным и полезным ингредиентом в рецептуре пищевых продуктов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

яблочные выжимки, пищевые волокна, природные антиоксиданты, фенольные соединения, пищевые продукты

Apple Pomace as a Functional Food Ingredient: Scoping Review

¹ Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety

² Lomonosov Moscow State University

³ All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety"

Vera M. Kodentsova¹, Dmitry V. Risnik², Elena M. Serba³,
Irina M. Abramova³, Mikhail V. Turshatov³, Alexander O. Solovyev³

ABSTRACT

Introduction: Apple pomace is a by-product formed during juice production. The weight of apple pomace, depending on the method of juice production and the equipment used, can range from 28 to 60% of the weight of the original raw material.

Purpose: This review article presents an analysis of the possibility of using apple pomace as a functional component of food products.

Materials and Methods: A review of the existing literature on the issue over recent years was conducted using the RINC, Pubmed databases and the Google Scholar system. Data on the content of biologically active substances in apple pomace and the quantity introduced into various food products were analyzed, as well as an assessment of the possibility of enriching the diet with biologically active substances based on the standards of physiological need of the body in dietary fibers.

Results: In essence, apple pomace is a concentrate of dietary fibers containing a significant amount of natural antioxidants (phenolic compounds) bound to the carbohydrate matrix. In terms of the human body, apple pomace combines the properties of two types of substances – dietary fibers and antioxidants. Technologically, apple pomace is a functional ingredient with moisture and oil retention capacity, improving texture and increasing the antioxidant activity of the product.

Conclusion: Incorporating apple pomace into the recipe not only improves the technological properties of bread and flour confectionery products (cakes, cookies, biscuits, crackers), dairy fermented products (yogurts), meat products (sausages, salami, minced meat products), extruded and other products, causing some darkening of the final product, but also enhances the nutritional value due to the increased content of dietary fibers and antioxidant properties of the product. Including apple pomace in the diet of rats with high fat and sucrose content leads to an improvement in the blood serum lipid profile and prevents weight gain. Apple pomace is a functional, economical, and beneficial ingredient in food product recipes.

KEYWORDS

apple squeezes, dietary fiber, natural antioxidants, phenolic compounds, food products.

CORRESPONDENCE:

Vera M. Kodentsova

E-mail: kodentsova@ion.ru

FOR CITATIONS:

Kodentsova, V.M., Risnik, D.V., Serba, E.M., Abramova, I.M., Turshatov, M.V., & Solovyev, A.O. (2023). Apple pomace as a source of functional food ingredients. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 231-242. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.430>

RECEIVED: 25.12.2022

ACCEPTED: 15.06.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The study was carried out as part of exploratory scientific research on topic No. FGMF-2023-0004.



ВЕДЕНИЕ

При производстве соков, яблочных напитков образуется побочный продукт — яблочные выжимки. Ежегодно образуется несколько миллионов тонн яблочных выжимок с тенденцией к росту, причем, чаще всего, они представляют собой отходы или используется в качестве корма для животных (Antonic et al., 2020). Масса яблочных выжимок в зависимости от способа производства сока и используемой аппаратуры может составлять от 28 до 60 % от массы исходного сырья (Волобуева с соавт., 2016; Шахрай с соавт., 2020). Яблочные выжимки содержат большое количество пищевых волокон, а также более 60 различных фенольных соединений и, таким образом, имеют широкие перспективы для применения в пищевой промышленности.

В конце прошлого столетия была сформулирована концепция антиоксидантных пищевых волокон. Согласно этой концепции, антиоксидантные пищевые волокна можно охарактеризовать как концентрат пищевых волокон, который содержит значительное количество природных антиоксидантов, связанных посредством ионных, ковалентных или водородных связей с углеводной матрицей, что обеспечивает дополнительные преимущества антиоксидантов со свойствами клетчатки, регулируя высвобождение биоактивных соединений из матриц и всасывание в желудочно-кишечном тракте (Angulo-López et al., 2023; Shahidi & Hossain, 2023). Впервые этот термин был применен в отношении виноградной выжимки. Критериями отнесения к антиоксидантным пищевым волокнам считается высокое содержание пищевых волокон (около 50 % в пересчете на сухую массу, а также наличие присущих компоненту антиоксидантных и антирадикальных свойств, оцениваемых по способности ингибировать окисление липидов, сопоставимой с 200 мг витамина Е, а также способности поглощать свободные радикалы в реакции взаимодействия с хромоген-радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (DPPH), эквивалентной 50 мг витамина Е (измеряется с помощью DPPH) (Angulo-López et al., 2023). Выжимки многих фруктов можно считать функциональным ингредиентом в отношении как продукта, так и организма, поскольку он улучшает пищевые качества пищи; они могут увеличить влагоудерживающую способность, маслоудерживающую способность, эмульгирование и/или гелеобразование; улучшать текстуру, сенсорные характеристики, продлевать срок

годности, повышать антиоксидантную активность (Calicet et al., 2022). К функциональным пищевым ингредиентам относят физиологически активные вещества, с известными физико-химическими характеристиками, для которых выявлены и научно обоснованы полезные для сохранения и улучшения здоровья свойства, установлена суточная физиологическая потребность. Функциональный ингредиент проявляет свое действие при внесении в продукт в количествах, обеспечивающих существенный вклад в потребление того или иного пищевого вещества. Добавление незначительных количеств функционального ингредиента к пищевому продукту, улучшив технологические параметры, не всегда позволяет рассматривать его в качестве дополнительного источника дефицитных в питании населения нутриентов. Другими словами, один натуральный компонент сочетает в себе свойства двух типов веществ.

Цель обзора предметного поля — оценка возможности использования яблочных выжимок в качестве функционального компонента пищевых продуктов. В соответствии с поставленной целью были охарактеризованы данные по химическому составу яблочных выжимок, применению их в технологических целях и для повышения пищевой ценности пищевой продукции, а также представлены результаты доклинических исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Базы данных и временные рамки

Обзор литературы по существующей проблеме за последние годы осуществляли по базам данных РИНЦ, Pubmed, Scopus, Web of Science. Поиск источников был ограничен периодом с 2016 по 2023 гг в связи с развитием современных методов определения биологических веществ и накоплением данных, касающихся пищевой ценности и использования в пищевой промышленности яблочных выжимок.

Критерии включения и исключения источников

Отбор источников для анализа реализовывался, по ключевым словам: яблочные выжимки, пищевые волокна, природные антиоксиданты, феноль-

ные соединения, пищевые продукты. Ключевыми словами для осуществления поиска в иностранной литературе являлись: apple pomace, dietary fiber, natural antioxidants, phenolic compounds, food products.

Критерии включения:

- (1) статья написана в период с 2016–2023 год;
- (2) статьи соответствуют теме исследования;
- (3) типами анализируемых статей являются оригинальные исследовательские работы, опубликованные в научных журналах, материалах конференций различных уровней, а также монографии, посвященные тематике исследования

Критерии исключения:

- (1) Исследования, не соответствующие теме данного обзора: не содержащие сведения о пищевой ценности яблочных выжимок, не содержащие данных о влиянии их введения на свойства пищевых продуктов или эффективности употребления в пищу или корм животных;
- (2) исследования, изданные не на русском или английском языках;
- (3) жанр статьи — не соответствующий указанным жанрам по критериям включения;
- (4) содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Процедура исследования

Была разработана и протестирована стратегия поиска с использованием ряда баз данных, чтобы добиться междисциплинарного охвата. К ним относятся: РИНЦ, PubMed. Выполнены все поиски по состоянию на 20 марта 2023 года. После этого ключевые слова при поиске в базах данных скорректированы. Результаты ограничены публикациями с 2016 г. по настоящее время.

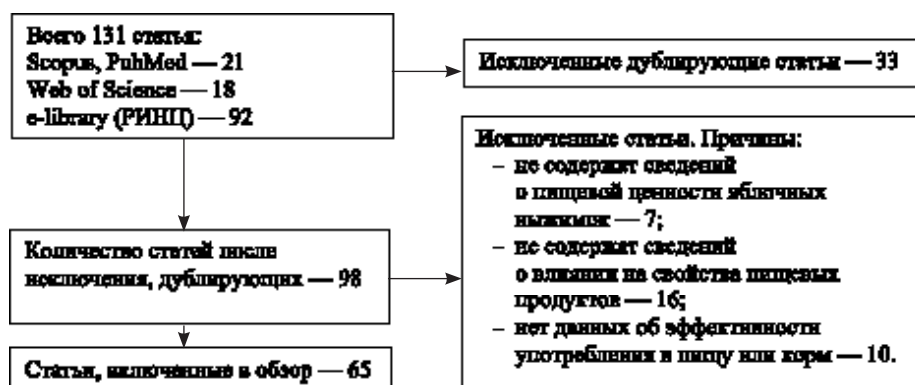
Анализ данных включал как количественные (т. е. частоты и проценты), так и качественные (т. е. тематический анализ) методы. Впоследствии каждое из утверждений, описывающих состав и функциональные свойства яблочных выжимок, которые были извлечены из включенных статей, были классифицированы с использованием созданного списка. Во время категоризации извлеченных утверждений, если утверждение не относилось к уже существующей в списке категории, добавлялась новая категория. Если из одной записи были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Анализ и систематизация данных

Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали протокол PRISMA и составлена схема проведения исследования (Рисунок 1).

Рисунок 1

Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA



Примечание. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation, 2018 (<https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M18-0850>). In the public domain.

Таблица 1

Пример извлечения данных из статей, включенных в обзор (Тимакова, 2020)

№	Заглавие	Автор и год	Сведения о пищевой ценности яблочных выжимок	Влияние на свойства пищевых продуктов	Эффективность употребления в пищу или корм
1	Оценка качества пшеничного хлеба, обогащенного натуральным яблочным сырьем	Тимакова, Р. Т. (2020).	–	Добавление в рецептуру хлеба порошкообразных выжимок яблок разных помологических сортов в дозе 7,5 % от массы муки улучшало пористость хлеба, повысило содержание растворимых пищевых волокон	–

Извлечение и анализ данных

Для анализа источников и поиска ответов на рассматриваемые вопросы, такие как: влияние добавления яблочных выжимок на свойства пищевых продуктов, определить их положительное или негативное влияние на качественные характеристики продуктов питания, выбирали данные из статей, соответствующих критериям включения и вносили их в Таблицу 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пищевая ценность яблочных выжимок

Состав яблочных выжимок зависит от производственного процесса, сорта яблок и года сбора урожая. 100 г свежих яблочных выжимок содержит

0,7 % белка, 1,3 % жира, 2,5 % пектиновых веществ, 1,8 % клетчатки, 0,9 % органических кислот, 22 мг витамина С, 15 мг катехинов, 45,5 мг флавонолов (Перфилова, 2017).

Вследствие высокого содержания влаги яблочная выжимка подвержена порче микробами, а также окислению полифенолов, что приводит к ухудшению качества и потемнению продукта. Для предотвращения этих процессов сразу после производства яблочную выжимку высушивают с использованием конвекционной сушки горячим воздухом, низкотемпературной вакуумной сушки, сублимационной сушки или микроволновой сушки.

В Таблице 2, представлен примерный состав сухой яблочной выжимки отечественного и импортного производства.

Содержание пищевых и биологически активных веществ (полифенольные соединения) по дан-

Таблица 2

Пищевая ценность 100 г сухой яблочной выжимки в пересчете на сухое вещество

Показатель	Отечественного производства	Импортного производства	Показатель	Диапазон, мг
Влага, г	10	4–10	Натрий, мг	2–200
Жир, г	-	0,26–8,49	Калий, мг	449–873
Белок, г	-	1,2–6,9	Кальций, мг	50–470
Зола, г	-	0,5–4,29	Фосфор, мг	50–950
Фруктоза, г	15–24	11,5–49,8	Магний, мг	20–182

Показатель	Отечественного производства	Импортного производства	Показатель	Диапазон, мг
Глюкоза, г	10–18	2,5–22,7	Железо, мг	2,4–23
Пищевые волокна, г	12–25	26,8–82,0	Цинк, мг	0,22–1,5
Нерастворимые пищ. волокна, г	–	18,4	Медь, мг	0,11–0,22
			Марганец, мг	0,61–0,9
Пектин, г	2,5–5,5	3,5–14,3	Антиоксидантная активность, г-экв. Trolox	0,77
Яблочная кислота, г	–	0,05–3,28		
Полифенольные соединения (в пересчете на галловую кислоту), мг	210–280	289–840		–

Примечание: Из «Конструирование продуктов питания профилактического назначения, корректирующих макро- и микроэлементный статус питания человека», Т. Г. Причко, М. Г. Германова, Т. Л. Смелик, 2017, *Научные труды Государственного научного учреждения Северо-Кавказского зонального научно-исследовательского института садоводства и виноградарства Российской академии сельскохозяйственных наук*, (12), 169–173. Copyright 2017 by Северо-Кавказского зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства Российской академии сельскохозяйственных наук; «Разработка фруктово-овощного повидла с повышенным содержанием биологически активных веществ», Т. Г. Причко, Н. В. Дрофичева, 2022, *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, (1), 25–28 (<http://doi.org/10.26297/0579–3009.2022.1.5>). Copyright 2022 by Известия высших учебных заведений; «Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis», by J. E. Angulo-López, A. C. Flores-Gallegos, J. A. Ascacio-Valdes, J. C. Contreras Esquivel, C. Torres-León, X. Rúelas-Chácon, C. N. Aguilar, 2023, *Foods*, 12(1), Article 159 (<http://doi.org/10.3390/foods12010159>). Copyright 2023 by MDPI; «Natural polyphenol recovery from apple, cereal, and tomato-processing by-products and related health-promoting properties», by K. Szabo, L. Mitrea, L. F. Călinoiu, B. E. Teleky, G. A. Martău, D. Plamada, M. S. Pascuta, S.-A. Nemeş, R.-A. Varvara, D. C. Vodnar, 2022, *Molecules*, 27(22), Article 7977 (<https://doi.org/10.3390/molecules27227977>). Copyright 2022 by MDPI.

ным литературы варьирует в широком диапазоне, что в значительной мере зависит от сорта яблок. Содержание растворимых пищевых волокон в сухой яблочной выжимке достигает 40%, общее содержание полифенольных соединений в 1 г — 5,5–8,4 мг в пересчете на галловую кислоту (Erinle & Adewole, 2022).

Преобладающими семействами фенольных соединений в яблочной выжимке являются дигидрохалконы, процианидины, флаван-3-ол-мономеры, флавонолы, антоцианидины и гидроксикоричные кислоты. Типичными соединениями являются флоризин (15 мг/100 г сухого веса) из семейства дигидрохалконов, хлорогеновая кислота (около 20 мг/100 г сухого веса) из семейства гидроксикоричных кислот и эпикатехин из семейства флаван-3-ол-мономеров (Pollini et al., 2021), которые обладают выраженным действием при диабете, онкологических, сердечнососудистых и нейрокогнитивных заболеваниях (Szabo et al., 2022). В лио-

филизированной яблочной выжимке содержание в 100 г сухого вещества составляет $5 \pm 0,9$ г кофейной кислоты, 2140 ± 40 мг транс-коричной кислоты и 237 ± 3 мг кверцетин-3- β -D-глюкозида (Vlad et al., 2022).

Использование яблочной выжимки в технологических целях

Использование яблочной выжимки при изготовлении различных видов пищевых продуктов реализуется преимущественно в качестве альтернативного источника пищевых волокон (Таблица 3).

Сенсорная оценка показала, что при увеличении содержания яблочной выжимки в пшеничном хлебе вплоть до 5% он сохраняет благоприятную текстуру, цвет, общий вид, вкус и запах (Skinner et al., 2018a). Добавление в рецептуру хлеба порошкообразных выжимок яблок разных помолологических

Таблица 3

Влияние добавления яблочной выжимки в различные виды пищевых продуктов на технологические параметры и пищевую ценность

Продукт	Доза яблочной выжимки	Технологические параметры	Пищевая ценность
Мучные изделия			
Торт бисквитный, кекс	5–32 %	Объем↓, влагоудерживающая способность↑	ПВ↑, ФС↑, АС↑
Печенье	5–50 %	Твердость↓	ПВ↑, гликемический индекс↓
Хлеб	1–15 %	Пористость↑**, Объем↓	ПВ↑, ФС↑, АС↑, белок↓, крахмал↓
Экструдированные зерновые снеки	10–30 %	–	ПВ↑, ФС↑, АС↑, белок↓, крахмал↓
Мясные продукты			
Куриная котлета	10–20 %*	Жесткость↑	ПВ↑, АС↑
Куриные сосиски	3–9 %	Твердость↑	Жир↓
Котлеты говяжьи	2–8 %	Текстура↑, выход продукта↑	ПВ↑, ФС↑
Итальянская салями	7–14 %	–	АС↑
Молочные продукты			
Йогурт	1–5 %	Вязкость↑, твердость↑, стабильность↑, время ферментации↓	АС↑

Примечание: Условные обозначения: ПВ – пищевые волокна, ФС – фенольные соединения, антиоксидантная способность – АС, * – влажные выжимки, ** – при одновременном увеличении в 2–3 раза количества дрожжей и предварительном замачивании свежемороженых яблочных выжимок в смеси растительного масла и воды с температурой 28–30 °С, ↑ – увеличение, ↓ – уменьшение.

Из «Оценка качества пшеничного хлеба, обогащенного натуральным яблочным сырьем», Р. Т. Тимакова, 2020, *Научный журнал ИТМО. Процессы и аппараты пищевых производств*, (2), 22–28 (<http://doi.org/10.17586/2310-1164-2020-10-2-21-28>). Copyright 2020 by ИТМО; «Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis», by B. Antonic, S. Jancikova, D. Dordevic, B. Tremlova, 2020, *Journal of Food Science*, 85(10), 2977–2985 (<http://doi.org/10.1111/1750-3841.15449>). Copyright 2020 by MDPI; «Ultrasound-assisted extraction and characterization of polyphenols from apple pomace, functional ingredients for beef burger fortification», by L. Pollini, F. Blasi, F. Ianni, L. Grispoli, S. Moretti, A. Di Veroli, L. Cossignani, B. T. Cenci-Goga, 2022, *Molecules*, 27(6), Article 1933 (<https://doi.org/10.3390/molecules27061933>). Copyright 2022 by MDPI; «Importance of insoluble-bound phenolics to the antioxidant potential is dictated by source material», by F. Shahidi, A. Hossain, 2023, *Antioxidants*, 12(1), Article 203 (<https://doi.org/10.3390/antiox12010203>). Copyright 2023 by MDPI; «Apple pomace consumption favorably alters hepatic lipid metabolism in young female Sprague-Dawley rats fed a western diet», by R. C. Skinner, D. C. Warren, S. N. Lateef, V. A. Benedito, J. C. Tou, 2018, *Nutrients*, 10(12), Article 1882 (<https://doi.org/10.3390/nu10121882>). Copyright 2018 by MDPI; «A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace», by R. C. Skinner, J. C. Gigliotti, K. M. Ku, J. C. Tou, 2018, *Nutrition Reviews*, 76(12), 893–909 (<https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy033>). Copyright 2018 by MDPI; «Selected physico-chemical, nutritional, antioxidant and sensory properties of wheat bread supplemented with apple pomace powder as a by-product from juice production», by V. Valková, H. Ďuranová, M. Havrlentová, E. Ivanišová, J. Mezey, Z. Tóthová, L. Gabríny, M. Kačániová, 2022, *Plants*, 11(9), Article 1256 (<https://doi.org/10.3390/plants11091256>). Copyright 2022 by MDPI; «Functionality and storability of cookies fortified at the industrial scale with up to 75 % of apple pomace flour produced by dehydration», by S. Zlatanović, A. Kalušević, D. Micić, J. Laličić-Petronijević, N. Tomić, S. Ostojić, S. Gorjanovi, 2019, *Foods*, 8(11), Article 561 (<https://doi.org/10.3390/foods8110561>). Copyright 2019 by MDPI; «Impact of apple pomace powder on the bioactivity, and the sensory and textural characteristics of yogurt», by L. Popescu, T. Ceșco, A. Gurev, A. Ghendov-Mosanu, R. Sturza, R. Tarna, 2022, *Foods*, 11(22), Article 3565 (<https://doi.org/10.3390/foods11223565>). Copyright 2022 by MDPI.

сортов в дозе 7,5 % от массы муки улучшало пористость хлеба, повысило содержание растворимых пищевых волокон (Тимакова, 2020). Показано, что введение порошка яблочных выжимок или свежеморожененных яблочных выжимок в рецептуру хлеба взамен части пшеничной хлебопекарной муки высшего сорта стимулирует и сокращает процесс брожения теста, улучшает пористость и вкусовые свойства хлеба (Ковалева с соавт., 2020).

В пшеничном хлебе с добавлением 10 % яблочной выжимки по сравнению с контролем в 4,27 раза увеличилось содержание полифенольных соединений и в 1,7 раз — антиоксидантная способность. И хотя сенсорная оценка не обнаружила существенных различий по всем тестируемым признакам, при этом происходило существенное уменьшение объема батона (482 см³ против 610 см³) (Valková et al., 2022).

Негативное влияние яблочных выжимок на качество хлеба, проявляющееся в уменьшении объема и изменении цвета (потемнение), зависит от их количества, добавленного в рецептуру, и используемых сортов яблок. По мнению некоторых авторов, введение в рецептуру 10 % яблочных выжимок является оптимальным, обеспечивающим сохранение приемлемых физических и сенсорных свойств батончиков из пшеничной муки (Valková et al., 2022).

Недавний метаанализ 25 исследований по влиянию включения сухих яблочных выжимок на изменение цвета продуктов растительного происхождения показал, что изделия с добавлением яблочных выжимок были темнее контрольных изделий, за исключением хлеба, содержащего 10 % яблочных выжимок, при этом статистически значимо в хлебе увеличилось общее содержание пищевых волокон (Antonic et al., 2020).

Наряду с хлебом имеется опыт добавления муки из яблочных выжимок в торты, кексы, печенье, бисквиты, крекеры и экструдированные продукты (Antonic et al., 2020). Содержание пищевых волокон в тортах, приготовленных из смеси пшеничной муки с добавлением 25 % яблочной выжимки, увеличилось до 14,2 % по сравнению с 0,47 % в изделиях, изготовленных из пшеничной муки по традиционной рецептуре (Skinner et al., 2018b).

Порошок яблочной выжимки добавляли также в мясные изделия (куриные котлеты, колбаса

(3–6 %), говяжьих (6 %) и куриных сосиски (3, 6, 9 %) для улучшения технологических параметров (реологические свойства, стабильность эмульсии, увеличение срока хранения за счет антиоксидантных и антимикробных свойств полифенольных соединений), а также с целью повышения потребления пищевых волокон (Antonic et al., 2020). Включение 1–2 % яблочных выжимок, обработанных амилазой для удаления крахмала, содержащих 60 % пищевых волокон, в рецептуру куриных сосисок позволило снизить содержание жира с 30 до 20–25 % за счет частичной замены свиного жира, одновременно произошло улучшение качественных характеристик продукта по сравнению с традиционным (Choi et al., 2016). Метаанализ показал, что за исключением куриных наггетсов цвет мясных изделий становится темнее, при этом для большинства продуктов было отмечено усиление антиоксидантных свойств (Antonic et al., 2020).

Лиофилизированную яблочную выжимку, содержащую около 40 % пищевых волокон, в дозе 4 % и 8 % использовали в качестве добавки при изготовлении бургеров из говядины, что привело к увеличению содержания клетчатки и фенольных соединений, а цвет и вкус по результатам сенсорной оценки 20 экспертов получили более высокую оценку по сравнению с контрольными образцами (Pollini et al., 2022).

Замена мяса яблочной выжимкой в количестве 7 и 14 % позволила выработать итальянскую сальми со вкусовыми свойствами, сравнимыми с теми, которые получают по классическим рецептам, при этом существенно улучшились антиоксидантные свойства продукта (Grispoldi et al., 2022).

Высушенную яблочную выжимку потенциально можно использовать в рецептуре батончиков, мюсли, а также в качестве вкусо-ароматических добавок и компонента фруктовых начинок в мучных кондитерских изделиях.

В соотношении 1:1 или 55:15 яблочное пюре и порошок яблочных выжимок используют при приготовлении повидла (Причко с соавт., 2017; Причко & Дрофичева, 2022).

Таким образом, основными свойствами яблочных выжимок являются высокое содержание пищевых волокон и соединений, обладающих антиоксидант-

ными свойствами. Введение выжимок в рецептуру в зависимости от продукта по-разному влияет на их технологические свойства. Основным недостатком, ограничивающим включение яблочных выжимок в пищевые продукты, является изменение цвета конечного продукта, особенно заметное при производстве мучных изделий, тогда как в мясных продуктах это изменение вызвало даже положительную реакцию экспертов.

Применение яблочной выжимки в доклинических исследованиях

Добавление в корм крыс Sprague-Dawley, получавших высокожировую диету, содержащую 15 % жира (8 % свиного жира и 7 % соевого масла) от массы рациона, яблочной выжимки в количестве 10 % от массы рациона в течение 9 недель, привело к снижению массы тела и процентного содержания жира в организме, а также улучшению липидного профиля сыворотки крови, о чем свидетельствовали более низкие уровни холестерина липопротеидов низкой плотности и более высокие уровни холестерина липопротеидов высокой плотности (Skinner et al., 2018a). У крыс-отъемышей, получавших рацион с высоким содержанием холестерина (0,3 % от массы рациона), добавление 5 % яблочной выжимки снижало содержание холестерина в печени на 11 % по сравнению с крысами, которых кормили высокохолестериновой диетой ($P < 0,05$), также добавление выжимки снижало концентрацию диеновых конъюгатов в сыворотке крови (Skinner et al., 2018a).

Добавление яблочных выжимок (10 % по массе) в диету, имитирующую западную диету с высоким содержанием жира и сахарозы (45 % жира, 33 % сахарозы) в течение 8 недель, ослабляло у самок крыс Sprague-Dawley инфильтрацию жировых вакуолей, накопление мононенасыщенных жирных кислот и триглицеридов в печени вследствие более высокой циркуляции желчи (Skinner et al., 2018b).

Включение в рацион яблочной выжимки улучшает липидный обмен, липидный профиль крови и нивелирует метаболические нарушения (гипергликемию, резистентность к инсулину), вызванные питанием с высоким содержанием жиров, а также улучшает антиоксидантный статус организма (Skinner et al., 2018). Помимо этого волокна яблоч-

ной выжимки улучшают пищеварение и обмен веществ у животных благодаря своему пребиотическому действию и стимулируют рост полезных бактерий в кишечнике, усиливают перистальтику кишечника, влияют на гомеостаз холестерина и триглицеридов (Erinle & Adewole, 2022). Яблочная выжимка также содержит биоактивные соединения (фенолы и тритерпены), которые обеспечивают множественные эффекты, положительно влияющие на сердечно-сосудистую систему, улучшая функции эндотелия и оказывая антиоксидантный эффект, обеспечивают снижение уровня провоспалительных цитокинов и окислительного стресса, а также оказывают гипогликемический эффект (Valková et al., 2022).

ВЫВОДЫ

Основными востребованными пищевой промышленностью свойствами яблочных выжимок — побочного продукта переработки яблок, являются высокое содержание пищевых волокон и соединений, обладающих антиоксидантными свойствами, обозначаемых как антиоксидантные пищевые волокна. Низкая стоимость и доступность в больших количествах делают их перспективным сырьем для пищевой промышленности. Введение выжимок в рецептуру обеспечивает улучшение технологических свойств хлебобулочных, молочных ферментированных, мясных и других продуктов. Яблочная выжимка является источником функциональных, экономичных и полезных ингредиентов в рецептуре пищевых продуктов.

Состав яблочных выжимок зависит от сорта яблок, способа высушивания, поэтому требуются исследования пищевой ценности отечественных сортов яблок с дальнейшей оценкой возможности использования выжимок в качестве сырья для получения функциональных пищевых ингредиентов.

Основным недостатком, ограничивающим включение яблочных выжимок в пищевые продукты, является изменение их цвета, особенно заметное при производстве мучных изделий, тогда как в мясных продуктах это изменение вызвало даже положительную реакцию экспертов. Адекватное потребление пищевых волокон и фенольных соединений является частью здорового питания. Что касается применения яблочных выжимок в качестве источ-

ника обогащающего ингредиента, то оценка должна осуществляться исходя из рекомендуемого или адекватного суточного потребления пищевых волокон и фенольных соединений. Добавление незначительных количеств яблочных выжимок в продукт не повышает его пищевой ценности для потребителя. В соответствии с действующими нормативными документами оценка степени обогащения должна осуществляться на основе расчета процента от рекомендуемого или адекватного суточного потребления пищевых волокон и фенольных соединений, однако очевидно, что во многих случаях (особенно при включении больших количеств) при маркировке может быть указано, что продукт — «источник пищевых волокон». При этом хотя антиоксидантная способность продукта повышается, но, по всей видимости, не всегда достигает значимых величин для потребителя.

В целом, можно ожидать, что благодаря своему составу (высокому содержанию пищевых волокон и веществ, обладающих антиоксидантными свойствами) яблочная выжимка может оказывать плейотропное кардио- и васкулопротекторное действие, воздействуя на многочисленные сигнальные пути и факторы риска. Потенциал использования яблочной выжимки в качестве технологической добавки или источника функциональных ингредиентов питания (пищевых волокон и природных антиоксидантов) для человека еще далеко не исчерпан. Кроме того, использование яблочной выжимки, стандартизированной по содержанию пищевых волокон и фенольных соединений, в качестве ком-

мерческого продукта может стать экологически и экономически выгодным решением для утилизации яблочных отходов, образующихся при промышленной переработке яблок.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Вера Митрофановна Коденцова: концептуализация, разработка методологии исследования, проведение исследования, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование.

Дмитрий Владимирович Рисник: проведение исследования, подготовка черновика рукописи.

Елена Михайловна Серба: подготовка черновика рукописи, визуализация, проведение исследования, работа с программным обеспечением.

Ирина Михайловна Абрамова: проведение исследования, валидация данных, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование.

Михаил Владимирович Туршатов: проведение исследования, валидация данных, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование.

Александр Олегович Соловьев: проведение исследования, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование.

ЛИТЕРАТУРА

- Волобуева, Е. С., Анискина, М. В., & Федоренко, К. П. (2016). Технология выработки кормовой добавки из яблочных выжимок. *Сельскохозяйственный журнал*, (1), 268–271.
- Ковалева, А. Е., Пьяникова, Э. А., & Ткачева, Е. Д. (2020). Совершенствование рецептуры и технологии хлеба пшеничного с использованием яблочных выжимок. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, (2), 61–66. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-2-61-66>
- Перфилова, О. В. (2017). Яблочные выжимки как источник биологически активных веществ в технологии продуктов питания. *Новые технологии*, (4), 65–71.
- Причко, Т. Г., Германова, М. Г., & Смелик, Т. Л. (2017). Конструирование продуктов питания профилактического назначения, корректирующих макро- и микроэлементный статус питания человека. *Научные труды Государственного научного учреждения Северо-Кавказского зонального научно-исследовательского института садоводства и виноградарства Российской академии сельскохозяйственных наук*, (12), 169–173.
- Причко, Т. Г., & Дрофичева, Н. В. (2022). Разработка фруктово-овощного повидла с повышенным содержанием биологически активных веществ. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, (1), 25–28. <http://doi.org/10.26297/0579-3009.2022.1.5>
- Тимакова, Р. Т. (2020). Оценка качества пшеничного хлеба, обогащенного натуральным яблочным сырьем. *Научный журнал ИТМО. Процессы и аппараты пищевых производств*, (2), 22–28. <http://doi.org/10.17586/2310-1164-2020-10-2-21-28>

- Шахрай, Т. А., Викторова, Е. П., Великанова, Е. В., & Корней, Н. Н. (2020). Современные исследования в области получения пищевых ингредиентов из вторичных ресурсов переработки яблок. *Новые технологии*, (3), 80–88. <http://doi.org/10.24411/2072-0920-2020-10309>
- Angulo-López, J. E., Flores-Gallegos, A. C., Ascacio-Valdes, J. A., Contreras Esquivel, J. C., Torres-León, C., Rúelas-Chácon, X., & Aguilar, C. N. (2023). Antioxidant dietary fiber sourced from agroindustrial byproducts and its applications. *Foods*, 12(1), Article 159. <http://doi.org/10.3390/foods12010159>
- Antonic, B., Jancikova, S., Dordevic, D., & Tremlova, B. (2020). Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Food Science*, 85(10), 2977–2985. <http://doi.org/10.1111/1750-3841.15449>
- Calicet, C., Malaguti, M., Marracino, L., Barbalace, M. C., Rizzo, P., Hrelia, S. (2022). Agri-food waste from apple, pear, and sugar beet as a source of protective bioactive molecules for endothelial dysfunction and its major complications. *Antioxidants*, 11(9), Article 1786. <http://doi.org/10.3390/antiox11091786>
- Choi, Y. S., Kim, Y. B., Hwang, K. E., Song, D. H., Ham, Y. K., Kim, H. W., & Kim, C. J. (2016). Effect of apple pomace fiber and pork fat levels on quality characteristics of uncured, reduced-fat chicken sausages. *Poultry Science*, 95(6), 1465–1471. <http://doi.org/10.3382/ps/pew096>
- Erinle, T. J., & Adewole, D. I. (2022). Fruit pomaces — their nutrient and bioactive components, effects on growth and health of poultry species, and possible optimization techniques. *Animal Nutrition*, (9), 357–377. <http://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.11.011>
- Grispoldi, L., Ianni, F., Blasi, F., Pollini, L., Crotti, S., Cruciani, D., Cenci-Goga, B. T., & Cossignani, L. (2022). Apple pomace as valuable food ingredient for enhancing nutritional and antioxidant properties of Italian salami. *Antioxidants*, 11(7), Article 1221. <https://doi.org/10.3390/antiox11071221>
- Pollini, L., Blasi, F., Ianni, F., Grispoldi, L., Moretti, S., Di Veroli, A., Cossignani, L., & Cenci-Goga, B. T. (2022). Ultrasound-assisted extraction and characterization of polyphenols from apple pomace, functional ingredients for beef burger fortification. *Molecules*, 27(6), Article 1933. <https://doi.org/10.3390/molecules27061933>
- Pollini, L., Cossignani, L., Juan, C., & Mañes, J. (2021). Extraction of phenolic compounds from fresh apple pomace by different non-conventional techniques. *Molecules*, 26(14), Article 4272. <https://doi.org/10.3390/molecules26144272>
- Popescu, L., Ceşco, T., Gurev, A., Ghendov-Mosanu, A., Sturza, R., & Tarna, R. (2022). Impact of apple pomace powder on the bioactivity, and the sensory and textural characteristics of yogurt. *Foods*, 11(22), Article 3565. <https://doi.org/10.3390/foods11223565>
- Shahidi, F., & Hossain, A. (2023). Importance of insoluble-bound phenolics to the antioxidant potential is dictated by source material. *Antioxidants*, 12(1), Article 203. <https://doi.org/10.3390/antiox12010203>
- Skinner, R. C., Warren, D. C., Lateef, S. N., Benedito, V. A., & Tou, J. C. (2018a). Apple pomace consumption favorably alters hepatic lipid metabolism in young female Sprague-Dawley rats fed a western diet. *Nutrients*, 10(12), Article 1882. <https://doi.org/10.3390/nu10121882>
- Skinner, R. C., Gigliotti, J. C., Ku, K. M., & Tou, J. C. (2018b). A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace. *Nutrition Reviews*, 76(12), 893–909. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy033>
- Szabo, K., Mitrea, L., Călinoiu, L. F., Teleky, B. E., Martău, G. A., Plamada, D., Pascuta, M. S., Nemeş, S.-A., Varvara, R.-A., & Vodnar, D. C. (2022). Natural polyphenol recovery from apple, cereal, and tomato-processing by-products and related health-promoting properties. *Molecules*, 27(22), Article 7977. <https://doi.org/10.3390/molecules27227977>
- Valková, V., Ďúranová, H., Havrlentová, M., Ivanišová, E., Mezey, J., Tóthová, Z., Gabriny, L., & Kačániová, M. (2022). Selected physico-chemical, nutritional, antioxidant and sensory properties of wheat bread supplemented with apple pomace powder as a by-product from juice production. *Plants*, 11(9), Article 1256. <https://doi.org/10.3390/plants11091256>
- Vlad, C. C., Păcularu-Burada, B., Vasile, A. M., Milea, Ş. A., Bahrim, G. E., Răpeanu, G., & Stănciuc, N. (2022). Upgrading the functional potential of apple pomace in value-added ingredients with probiotics. *Antioxidants*, 11(10), Article 2028. <https://doi.org/10.3390/antiox11102028>
- Zlatanović, S., Kalušević, A., Micić, D., Laličić-Petronijević, J., Tomić, N., Ostojić, S., & Gorjanovi, S. (2019). Functionality and storability of cookies fortified at the industrial scale with up to 75 % of apple pomace flour produced by dehydration. *Foods*, 8(11), Article 561. <https://doi.org/10.3390/foods8110561>

REFERENCES

- Kovaleva, A. E., P'yanikova, E. A., & Tkacheva, E. D. (2020). Sovershenstvovanie retseptury i tekhnologii khleba pshenichnogo s ispol'zovaniem yablochnykh vyzhimok [Improving the recipe and technology of wheat bread using apple pomace]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies]*, (2), 61–66. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-2-61-66>
- Perfilova, O. V. (2017). Yablochnye vyzhimki kak istochnik biologicheskii aktivnykh veshchestv v tekhnologii produktov pitaniya [Apple pomace as a source of biologically active substances in food technology]. *Novye tekhnologii [New Technologies]*, (4), 65–71.
- Prichko, T. G., & Droficheva, N. V. (2022). Razrabotka fruktovo-ovoshchnogo povidla s povyshennym soderzhaniiem biologicheskii aktivnykh veshchestv [Development of fruit and vegetable jam with a high content of biologically active substances]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya [News of Higher Educational Pishchevaya tekhnologiya]*

- Institutions. Food Technology*], (1), 25–28. <http://doi.org/10.26297/0579-3009.2022.1.5>
- Prichko, T. G., Germanova, M. G., & Smelik, T. L. (2017). Konstruirovanie produktov pitaniya profilakticheskogo naznacheniya, korrektruyushchikh makro-i mikroelementnyi status pitaniya cheloveka [The design of preventive food products that correct the macro- and microelement status of human nutrition]. *Nauchnye trudy Gosudarstvennogo nauchnogo uchrezhdeniya Severo-Kavkazskogo zonal'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sadovodstva i vinogradarstva Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk* [Scientific Works of the State Scientific Institution of the North Caucasus Zonal Research Institute of Horticulture and Viticulture of the Russian Academy of Agricultural Sciences], (12), 169–173.
- Shakhrai, T. A., Viktorova, E. P., Velikanova, E. V., & Kornei, N. N. (2020). Sovremennye issledovaniya v oblasti polucheniya pishchevykh ingredientov iz vtorichnykh resursov pererabotki yablok [Modern research in the field of obtaining food ingredients from secondary apple processing resources]. *Novye tekhnologii* [New Technologies], (3), 80–88. <http://doi.org/10.24411/2072-0920-2020-10309>
- Timakova, R. T. (2020). Otsenka kachestva pshenichnogo khleba, obogashchennogo natural'nym yablochnym syr'em [Evaluation of the quality of wheat bread enriched with natural apple raw materials]. *Nauchnyi zhurnal ITMO. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [ITMO Scientific Journal. Processes and Devices of Food Production], (2), 22–28. <http://doi.org/10.17586/2310-1164-2020-10-2-21-28>
- Volobueva, E. S., Aniskina, M. V., & Fedorenko, K. P. (2016). Tekhnologiya vyrabotki kormovoi dobavki iz yablochnykh vyzhimok [Technology for the production of feed additives from apple pomace]. *Sel'skokhozyaistvennyi zhurnal* [Agricultural Journal], (1), 268–271.
- Angulo-López, J. E., Flores-Gallegos, A. C., Ascacio-Valdes, J. A., Contreras Esquivel, J. C., Torres-León, C., Rúelas-Chácon, X., & Aguilar, C. N. (2023). Antioxidant dietary fiber sourced from agroindustrial byproducts and its applications. *Foods*, 12(1), Article 159. <http://doi.org/10.3390/foods12010159>
- Antonic, B., Jancikova, S., Dordevic, D., & Tremlova, B. (2020). Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Food Science*, 85(10), 2977–2985. <http://doi.org/10.1111/1750-3841.15449>
- Calicet, C., Malaguti, M., Marracino, L., Barbalace, M. C., Rizzo, P., & Hrelia, S. (2022). Agri-food waste from apple, pear, and sugar beet as a source of protective bioactive molecules for endothelial dysfunction and its major complications. *Antioxidants*, 11(9), Article 1786. <http://doi.org/10.3390/antiox11091786>
- Choi, Y. S., Kim, Y. B., Hwang, K. E., Song, D. H., Ham, Y. K., Kim, H. W., & Kim, C. J. (2016). Effect of apple pomace fiber and pork fat levels on quality characteristics of uncured, reduced-fat chicken sausages. *Poultry Science*, 95(6), 1465–1471. <http://doi.org/10.3382/ps/pew096>
- Erinle, T. J., & Adewole, D. I. (2022). Fruit pomaces — their nutrient and bioactive components, effects on growth and health of poultry species, and possible optimization techniques. *Animal Nutrition*, (9), 357–377. <http://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.11.011>
- Grispoldi, L., Ianni, F., Blasi, F., Pollini, L., Crotti, S., Cruciani, D., Cenci-Goga, B. T., & Cossignani, L. (2022). Apple pomace as valuable food ingredient for enhancing nutritional and antioxidant properties of italian salami. *Antioxidants*, 11(7), Article 1221. <https://doi.org/10.3390/antiox11071221>
- Pollini, L., Blasi, F., Ianni, F., Grispoldi, L., Moretti, S., Di Veroli, A., Cossignani, L., & Cenci-Goga, B. T. (2022). Ultrasound-assisted extraction and characterization of polyphenols from apple pomace, functional ingredients for beef burger fortification. *Molecules*, 27(6), Article 1933. <https://doi.org/10.3390/molecules27061933>
- Pollini, L., Cossignani, L., Juan, C., & Mañes, J. (2021). Extraction of phenolic compounds from fresh apple pomace by different non-conventional techniques. *Molecules*, 26(14), Article 4272. <https://doi.org/10.3390/molecules26144272>
- Popescu, L., Ceşco, T., Gurev, A., Ghendov-Mosanu, A., Sturza, R., & Tarna, R. (2022). Impact of apple pomace powder on the bioactivity, and the sensory and textural characteristics of yogurt. *Foods*, 11(22), Article 3565. <https://doi.org/10.3390/foods11223565>
- Shahidi, F., & Hossain, A. (2023). Importance of insoluble-bound phenolics to the antioxidant potential is dictated by source material. *Antioxidants*, 12(1), Article 203. <https://doi.org/10.3390/antiox12010203>
- Skinner, R. C., Warren, D. C., Lateef, S. N., Benedito, V. A., & Tou, J. C. (2018a). Apple pomace consumption favorably alters hepatic lipid metabolism in young female Sprague-Dawley rats fed a western diet. *Nutrients*, 10(12), Article 1882. <https://doi.org/10.3390/nu10121882>
- Skinner, R. C., Gigliotti, J. C., Ku, K. M., & Tou, J. C. (2018b). A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace. *Nutrition Reviews*, 76(12), 893–909. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy033>
- Szabo, K., Mítrea, L., Călinoiu, L. F., Teleky, B. E., Martău, G. A., Plamada, D., Pascuta, M. S., Nemeş, S.-A., Varvara, R.-A., & Vodnar, D. C. (2022). Natural polyphenol recovery from apple, cereal, and tomato-processing by-products and related health-promoting properties. *Molecules*, 27(22), Article 7977. <https://doi.org/10.3390/molecules27227977>
- Valková, V., Ďúranová, H., Havrlentová, M., Ivanišová, E., Mezey, J., Tóthová, Z., Gabríny, L., & Kačániová, M. (2022). Selected physico-chemical, nutritional, antioxidant and sensory properties of wheat bread supplemented with apple pomace powder as a by-product from juice production. *Plants*, 11(9), Article 1256. <https://doi.org/10.3390/plants11091256>
- Vlad, C. C., Păcularu-Burada, B., Vasile, A. M., Milea, Ş. A., Bahrim, G. E., Răpeanu, G., & Stănciuc, N. (2022). Upgrading the functional potential of apple pomace in value-added ingredients with probiotics. *Antioxidants*, 11(10), Article 2028. <https://doi.org/10.3390/antiox11102028>
- Zlatanović, S., Kalušević, A., Micić, D., Laličić-Petronijević, J., Tomić, N., Ostojić, S., & Gorjanovi, S. (2019). Functionality and storability of cookies fortified at the industrial scale with up to 75 % of apple pomace flour produced by dehydration. *Foods*, 8(11), Article 561. <https://doi.org/10.3390/foods8110561>