

Исследование влияния технологических параметров и сравнительная оценка приемов ферментативного гидролиза инулинсодержащего сырья

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

И. А. Бакин, В. Д. Коротков, А. С. Мустафина

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Игорь Алексеевич Бакин
E-mail: bakin@rgau-msha.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Бакин, И. А., Коротков, В. Д., & Мустафина, А. С. (2025). Исследование влияния технологических параметров и сравнительная оценка приемов ферментативного гидролиза инулинсодержащего сырья. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 22-38. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.691>

ПОСТУПИЛА: 01.08.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Пребиотические олигосахариды представляют значительный интерес для пищевой промышленности благодаря их функциональным свойствам. В Российской Федерации основным сырьем для промышленного получения инулина является топинамбур (*Helianthus tuberosus L.*), однако его переработка осложняется особенностями химического состава, в том числе высоким содержанием белка. В связи с этим выбор ферментативного препарата и параметров предварительной обработки имеет принципиальное значение для эффективности экстракции инулина из растительного сырья.

Цель: Оценить влияние ферментативных препаратов различного действия на углеводный состав экстрактов топинамбура и определить рациональные параметры предварительной обработки инулинсодержащего сырья.

Материалы и методы: Исследовали водные экстракты, полученные из высушенных и измельченных клубней топинамбура сорта Омский белый после предварительной ферментативной обработки. В качестве референтных ферментных комплексов использовали Пектолюкс и ЦеллоЛюкс БГК, в качестве альтернативного препарата – Биозим Plus. Определяли массовую долю сухих веществ, проводили рефрактометрический анализ и анализ углеводного состава методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием стандартной смеси углеводов для калибровки. Качество экстрактов оценивали по органолептическим показателям: цвету, прозрачности и опалесценции. Кинетику экстракции изучали при варьировании дозировки ферментного препарата, гидромодуля, температуры в диапазоне 40–80 °С и продолжительности процесса 20–60 мин.

Результаты: Установлено, что ферментативная обработка существенно влияет на физико-химические характеристики экстрактов и содержание инулина. Экстракты, полученные с применением ЦеллоЛюкс БГК и Биозим Plus, характеризовались большей опалесценцией и более светлым желтоватым оттенком. После обработки препаратом Пектолюкс экстракт отличался соломенной окраской и высокой прозрачностью. Использование Пектолюкса увеличивало объем экстракта в 2 раза, а ЦеллоЛюкс БГК – в 1,6 раза по сравнению с контролем. При повышении температуры до 50 °С содержание инулина в экстракте возрастало линейно; дальнейшее повышение температуры не обеспечивало выраженного прироста, тогда как при температурах выше 70 °С наблюдался гидролиз инулина с образованием ди- и моносахаридов.

Выводы: Ферментативная обработка топинамбура повышает эффективность экстракции и обеспечивает получение экстрактов с высоким содержанием инулина – 78–79%. Наиболее выраженные различия между исследованными препаратами проявляются в выходе экстракта и его органолептических характеристиках. Полученные результаты могут быть использованы при выборе ферментных препаратов и технологических режимов предварительной обработки инулинсодержащего растительного сырья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

топинамбур; инулинсодержащее сырье; ферментативный гидролиз; инулин; углеводный состав

Research on the Influence of Technological Parameters and Comparative Evaluation of Methods for Enzymatic Hydrolysis of Inulin-containing Raw Materials

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural
Academy, Moscow, Russian Federation

Igor A. Bakin, Vladislav D. Korotkov, Anna S. Mustafina

CORRESPONDENCE:

Igor A. Bakin

E-mail: bakin@rgau-msha.ru

FOR CITATIONS:

Bakin, I., Korotkov, V., & Mustafina, A. (2025). Research on the Influence of technological parameters and comparative evaluation of methods for enzymatic hydrolysis of inulin-containing raw materials. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 22-38. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.691>

RECEIVED: 01.08.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Prebiotic oligosaccharides are of considerable interest to the food industry because of their functional properties. In the Russian Federation, Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) is the principal raw material for industrial inulin production; however, its processing is complicated by the compositional features of the tubers, including their relatively high protein content. Accordingly, the selection of an enzyme preparation and pretreatment conditions is a critical factor in improving the efficiency of inulin extraction from plant-derived raw material.

Purpose: To evaluate the effects of enzyme preparations with different modes of action on the carbohydrate composition of Jerusalem artichoke extracts and to determine rational pretreatment parameters for inulin-containing raw material.

Materials and Methods: Aqueous extracts obtained from dried and milled tubers of Jerusalem artichoke cv. Omskiy Belyi after enzymatic pretreatment were used as the study material. Pectolux and CelloLux BGK enzyme complexes were employed as reference preparations, while Biozyme Plus was assessed as an alternative preparation. Total solids content and refractometric characteristics were determined, and carbohydrate composition was analysed by high-performance liquid chromatography using a standard carbohydrate mixture for calibration. Extract quality was assessed organoleptically in terms of colour, clarity, and opalescence. Extraction kinetics were studied by varying enzyme dosage, hydromodule, temperature in the range of 40–80 °C, and treatment time from 20 to 60 min.

Results: Enzymatic pretreatment was found to significantly affect the physicochemical characteristics of the extracts and their inulin content. Extracts produced using CelloLux BGK and Biozyme Plus exhibited greater opalescence and a lighter yellowish hue. The extract obtained after Pectolux treatment was characterized by a straw colour and high clarity. Pectolux increased extract volume twofold, whereas CelloLux BGK produced a 1.6-fold increase relative to the control. As the temperature increased to 50 °C, the inulin content of the extract rose linearly. Further temperature elevation did not result in a substantial increase, whereas temperatures above 70 °C induced inulin hydrolysis with the formation of di- and monosaccharides.

Conclusion: Enzymatic pretreatment of Jerusalem artichoke improves extraction efficiency and enables the production of extracts with a high inulin content of 78–79%. The most pronounced differences among the tested preparations were observed in extract yield and organoleptic properties. The findings may be applied to the selection of enzyme preparations and pretreatment regimes for the processing of inulin-containing plant raw materials.

KEYWORDS

Helianthus tuberosus L.; inulin-containing raw materials; enzymatic hydrolysis; inulin; carbohydrate composition

ВВЕДЕНИЕ

Пребиотические олигосахариды рассматриваются в современной науке как функциональные ингредиенты с доказанным положительным влиянием на состояние кишечной микробиоты, метаболические процессы и иммунный статус человека. Инулин, являющийся фруктоолигосахаридом с различной степенью полимеризации, демонстрирует выраженные пребиотические свойства и широко применяется в пищевой и фармацевтической промышленности при разработке функциональных продуктов питания (Байдалинова & Мельникова, 2016; Быкова & Калинина, 2022; Петров и др., 2022; Alonso-Allende et al., 2024; Sheng et al., 2023; Teferra, 2021; Visuthranukul et al., 2024). Наряду с этим современный рацион населения характеризуется сниженным потреблением пищевых волокон, что усиливает интерес к технологически доступным источникам инулина и фруктоолигосахаридов (Коденцова и др., 2022; Крутихина и др., 2023; Atta et al., 2025).

В Российской Федерации основным промышленным источником инулина является клубненосный подсолнечник (*Helianthus tuberosus L.*), отличающийся высокой урожайностью и значительным содержанием фруктоолигосахаридов (Кутейникова и др., 2024; Chauhan et al., 2025). Однако переработка данного сырья осложняется высоким содержанием белковых и пектиновых компонентов, которые снижают эффективность экстракции и ухудшают качество получаемых экстрактов (Бызов и др., 2023а; Бызов и др., 2024; Коннова & Максименко, 2025). В связи с этим актуальной задачей является поиск технологических решений, направленных на повышение выхода инулина и улучшение характеристик экстрактов при сохранении структуры полисахаридов.

Одним из наиболее перспективных подходов считается применение ферментативного гидролиза, позволяющего эффективно разрушать пектиновые и целлюлозные структуры растительного сырья и снижать содержание сопутствующих примесей (Леонтьев и др., 2014; Redondo-Cuenca et al., 2021; Мунгуннаран и др., 2022). Ряд исследований демонстрирует эффективность использования мультиферментных комплексов, включающих пектиназы, целлюлазы и инулиназы, однако при этом отмечается риск деполимеризации инулина и увеличения

доли моно- и дисахаридов в экстрактах (Рожкова и др., 2023; Шаненко и др., 2023). Следовательно, сохраняется научный и технологический пробел, связанный с выбором оптимального типа ферментативного препарата и параметров процесса, обеспечивающих максимальный выход инулина при минимальной степени его деструкции.

Таким образом, несмотря на значительное количество исследований, посвященных переработке инулинсодержащего сырья, проблема комплексной оптимизации параметров ферментативного гидролиза с учетом углеводного профиля экстрактов остается недостаточно систематизированной и требует дальнейшего экспериментального обоснования (Бакин, 2023; Нугманов и др., 2024; Пучкова и др., 2021; Бызов и др., 2023b). Целью настоящего исследования являлось изучение эффективности применения ферментативных препаратов различных типов для модификации углеводного состава экстрактов инулинсодержащего сырья и определение оптимальных параметров предварительной обработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Ферментные препараты Пектолюкс, Целлолюкс БГК, Биозим Plus

Ферментные препараты Пектолюкс и Целлолюкс БГК изготовлены предприятием ООО ПО «Сиббиофарм» (Новосибирская область, г. Бердск, 2025 г.). Ферментный препарат Биозим Plus изготовлен компанией ТЕХВЕТ® (Москва, 2025 г.). Характеристика ферментных препаратов представлена в Таблице 1.

Крупка из топинамбура

Для процесса ферментации использовалась высушенная и измельченная крупка, выработанная из свежих клубней топинамбура (*Helianthus tuberosus L.*) сорта Омский белый, предоставленная ООО «ИстАгроДон». Сорт относится к среднеспелым. Топинамбур выращен в 2024 г. на территории агропромышленного комплекса «ИстАгроДон» Данковского района Липецкой области. Органолептические и физико-химические параметры крупки представлены в Таблицах 2 и 3.

Таблица 1

Краткая характеристика ферментативных препаратов

Table 1

Brief Characteristics of Enzymatic Preparations

Наименование ферментных препаратов, (воздействие)	Активность, ед/г(см ³)	Дозировка препарата, допустимое отклонение	Условия гидролиза
Пектолюкс (расщепляет пектин)	пектинлиазная – 35000	100–200 г/т допустимое отклонение ±10 %	pH – 4,7–5,0; T = 40–45 °С; продолжительность – 30 мин
ЦеллоЛюкс БГК (полисахариды: гемицеллюлозы и пентозаны)	ксилазная – 6 000; β-глюканазная – 2 000	0,15–0,3 л/т допустимое отклонение ±5 %	pH – 4,0–6,0; T = 45–50 °С; продолжительность – 30 мин, до 1,5 ч.
Биозим Plus (некрахмалистые полисахариды и пентозаны: пектин; белки)	ксилазная – 2450; β-глюканазная – 540; пектиназная – 2700; амилазная – 220; пектин-лиазная – 480	200–400 г/т допустимое отклонение ±5 %	pH – 4,7; T = 40–50 °С; продолжительность – 30 мин

Таблица 2

Органолептические свойства крупки из топинамбура

Table 2

Organoleptic Properties of Jerusalem Artichoke Groats

Наименование показателя	Характеристика показателя
Внешний вид	Крупка
Цвет	Свойственный цвету сырья, из которого изготовлен продукт с желтым или коричневым оттенком
Вкус и запах	Свойственные топинамбуру без постороннего привкуса и запаха
Консистенция	Сыпучая, допускается наличие неплотно слежавшихся комочков, легко рассыпающихся при слабом механическом воздействии
Наличие посторонних примесей	Не допускается

Таблица 3

Физико-химические показатели крупки из топинамбура

Table 3

Physicochemical Properties of Jerusalem Artichoke Groats

Наименование показателя	Характеристика показателя
Массовая доля сухих веществ,%, не менее	90
Массовая доля влаги,%, не более	10
Содержание инулина (фруктоолигосахариды, инулиологосахариды) в пересчете на сухие вещества, %	55–70
Степень полимеризации инулина (DP)	2–25
Содержание глюкозы в пересчете на сухие вещества,%, не более	2
Содержание фруктозы в пересчете на сухие вещества,%, не более	5
Содержание сахарозы в пересчете на сухие вещества,%, не более	12
Массовая доля золы в пересчете на сухие вещества,%, не более	5
Массовая доля металлических примесей (частиц не более 0,3 мм в наибольшем линейном измерении),%, не более	0,0003
Массовая доля минеральных примесей (песка),%, не более	0,01
Крупность частиц, мкм	от 0,5 до 2 мм в диаметре

Примечание. По данным производителя.

Note. According to the Manufacturer.

Оборудование

Исследования проводились с использованием рефрактометра ИРФ-454Б2М («Казанский оптико-механический завод», Россия, год производства — 2006, предел допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,05\%$); весового влагомера марки MF-50 (AND, Япония, год производства — 2014, предел допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,05\%$); жидкостного хроматографа углеводов с рефрактометрическим датчиком (Gilson, Россия, год производства — 2010, предел допустимой погрешности измерений $\pm 0,3\%$).

Методы

Сравнительный анализ проводился путем сопоставления показателей эффективности различных ферментных препаратов (Пектолюкс, ЦеллоЛюкс БГК, Биозим Plus) с контрольным образцом (без обработки препаратом) при одинаковых условиях.

Экспериментальный анализ охватывал три направления: кинетическое исследование влияния различных температурных режимов (в диапазоне $40\div 80^\circ\text{C}$) на процесс экстракции; исследование кинетики процесса с оценкой воздействия продолжительности экстракции (в диапазоне $20\div 60$ мин) на результаты процесса; анализ показателей качества с акцентом на оценку органолептических характеристик полученных экстрактов (цвет, прозрачность, опалесценция).

Экспериментально-статистический анализ, включающий многократные измерения (в трехкратной повторности). Погрешности измерений (допустимых отклонений для всех параметров) контролировали. Статистическую обработку данных выполняли с использованием программы Microsoft Excel. Вычислительные процедуры для оценки влияния основных факторов предварительной обработки сырья и выявления оптимальных параметров реализованы с помощью программного обеспечения Statistica for Windows (StatSoft) с применением модуля дисперсионного анализа (ANOVA).

Исследование построено на системном подходе, где гипотеза состояла в том, что все параметры взаимосвязаны. Для подтверждения гипотезы осуществлялись: контроль условий экспериментов,

фиксация всех значимых показателей; комплексный анализ полученных результатов.

Достоверность и воспроизводимость результатов подтверждалась многократными измерениями и контролем погрешностей.

Физико-химический анализ включал: определение массовой доли сухих веществ; рефрактометрический анализ экстрактов; хроматографическое исследование углеводного состава экстрактов.

Для определения концентрации растворимых сухих веществ в экстракте клубней топинамбура использовалась общепринятая методика рефрактометрического анализа, соответствующая требованиям ГОСТ ISO 2173-2013 «Продукты переработки плодов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ».

Анализ углеводного состава (% на 100% углеводов в экстракте) для определения содержания углеводов, таких как инулин, дисахариды, глюкоза и фруктоза, проводился методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на жидкостном хроматографе углеводов с рефрактометрическим детектором компании Gilson (Россия). В процессе разделения использовалась колонка Rezex RCM-Monosaccharide Ca^{2+} (8%) от компании Phenomenex (США) размером $300 \times 7,8$ миллиметров, снабженная соответствующей предколонкой. В качестве подвижной фазы применялась бидистиллированная вода, предварительно дегазированная ультразвуком. Элюирование осуществлялось в изокритическом режиме при температуре колонки 85°C . Скорость потока элюента составляла $0,6$ миллилитра в минуту, а объем вводимой пробы — 20 микролитров. Детектирование происходило при температуре детектора 60°C . Идентификация и количественная оценка пиков производились методом внешнего стандарта на основе времени удерживания. Для калибровки использовались стандартные растворы чистых веществ, таких как глюкоза, фруктоза, сахароза и инулин с известной степенью полимеризации. Калибровочные кривые создавались в диапазоне концентраций от $0,1$ до $5,0$ миллиграмм на миллилитр. Коэффициент детерминации (R^2) для всех анализируемых веществ был не менее $0,999$. Предел обнаружения (LOD) и предел количественного определения (LOQ) для углеводов были равны $0,01$ и $0,03$ мг/мл

соответственно. Отношение пиков и расчет концентраций оценивались по стандартному образцу, содержащему смесь анализируемых углеводов (глюкоза, фруктоза, сахароза) в концентрации, эквивалентной 100 % углеводов экстракта.

Процедура исследования

Для выявления оптимального температурного режима первичной обработки сырья проводилась экстракция четырех образцов крупки топинамбура с гидромодулем (далее ГМ) 1 : 3 (50 г крупки на 150 мл воды). В ходе реализации центрального ротационного композиционного плана эксперимента диапазон температурных режимов варьировался от 40 °С до 80 °С с шагом в 10 °С. Продолжительность экстракции образцов составила 30 мин.

Для установления оптимальной продолжительности экстракции инулина были подготовлены четыре образца водных экстрактов из крупки клубней топинамбура с ГМ 1 : 3. Продолжительность экстракции варьировалась в диапазоне от 20 до 60 мин с шагом в 10 мин. Температура проведения экстракции — 40 °С.

Расчет дозировки ферментативного препарата проводился по рекомендации производителя. Для обработки 50 г крупки и 150 мл воды применяли следующие дозировки: Пектолукс — 0,075 г ± 0,0075 г, ЦеллоЛукс — 0,1 мл (разведение 1 : 50) ± 0,005 мл, Биозим Plus — 0,003 г ± 0,00015 г.

Экспериментальное исследование экстракции олигосахаридов с использованием ферментных препаратов реализовано при условии первоначального смешивания крупки топинамбура и подготовленной воды (ГМ 1 : 3), с последующим добавлением в смесь ферментативного препарата. Гидролиз проводился при температуре 40 °С в течение 30 мин, далее смесь нагревалась до 50 °С в течение 3–10 мин и проводилось экстрагирование при 50 °С в течение 30 мин. Общая продолжительность процесса экстрагирования и ферментативного гидролиза составляла 70 мин при постоянном перемешивании. Полученный экстракт отделялся центрифугированием в течение 30 мин (частота вращения ротора 5000 об/мин). С целью инактивации ферментных препаратов после центрифугирования экстракт нагревался в течение 5–10 мин до темпе-

ратуры 60–70 °С и далее фильтровался. В качестве контроля проводился эксперимент без использования ферментного препарата при аналогичных контролируемых условиях.

Контроль температурного режима в процессе водной диффузии реализовывался с применением термодатчиков, размещенных в варочных емкостях. Сигналы, поступающие от датчиков, регистрировались с интервалом в одну минуту до достижения стабилизации температурного режима, при котором значения температуры оставались неизменными на протяжении пятнадцати мин. Погрешность при измерении температуры составила ±0,5 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние температурного режима на процесс экстрагирования углеводов из крупки топинамбура

Экспериментальные данные о влиянии температурного режима на выход углеводов из крупки топинамбура представлены на Рисунке 1 и в Таблице 4.

Таблица 4

Углеводный состав экстракта крупки топинамбура при различном температурном режиме, г/100 г экстракта

Table 4

Carbohydrate Composition of Jerusalem Artichoke Extract at Different Temperature Conditions, g/100 g of Extract

Температурный режим, °С	Углеводный состав экстракта (на 100 % углеводов), %			
	инулин	дисахариды	глюкоза	фруктоза
40	53,21	16,21	0	5,49
50	60,76	16,25	0	5,54
60	60,44	16,31	0	5,52
70	52,15	19,29	1,25	9,59
80	40,34	21,32	2,43	10,6

Примечание. Погрешность измерения углеводного состава ±0,3

Note. The Error in Measuring Carbohydrate Composition is ±0.3%

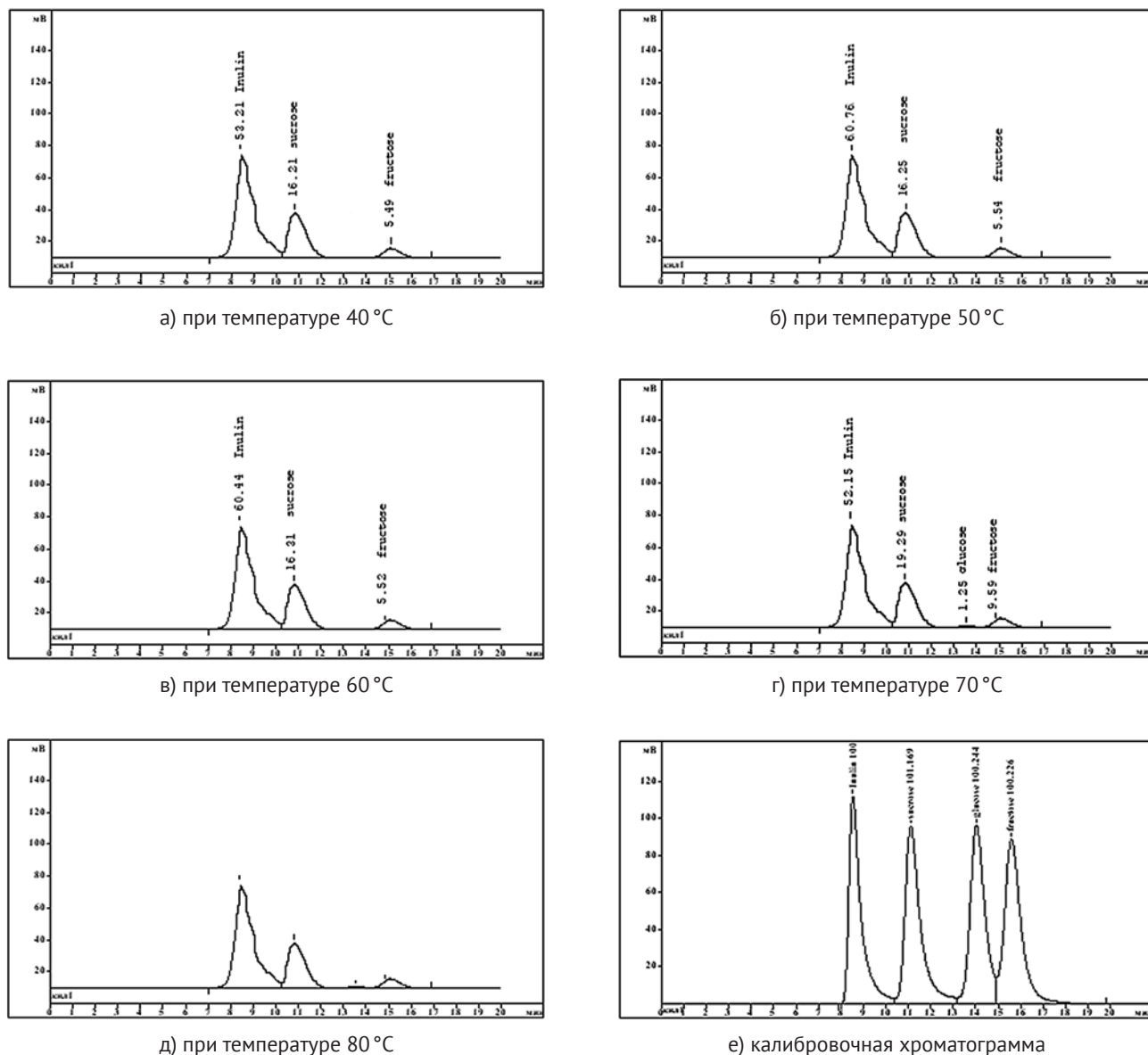
Как показал анализ результатов исследования, содержание в экстракте инулина увеличивается, достигая максимального значения при температурном режиме 50 °С, после чего параметры выхо-

Рисунок 1

ВЭЖХ-хроматограмма извлечений из крупки топинамбура в зависимости от температурного режима

Figure 1

HPLC Chromatogram of Jerusalem Artichoke Extracts



да процесса стабилизируются на плато и практически не изменяются, вплоть до температурного режима 70°C, при котором содержание инулина в экстракте начинает стремительно падать. Дисперсионный анализ (ANOVA) процесса экстракции показал значимое влияние ($\pm 95\%$ доверительный интервал) фактора температуры на выход олигосахаридов. Это можно объяснить, на наш взгляд, тем, что при температуре 70°C и выше происходит гидролиз инулина с последующим распадом до ди- и моносахаридов, о чем свидетельствует

повышение содержания последних в углеводном составе экстракта. На основе данных наблюдений и имеющихся рекомендаций по необходимой температуре протекания ферментативного гидролиза до 50°C предложен оптимальный температурный режим ферментации 40°C с последующим нагревом до 50°C.

Полученные данные о температурной стабильности инулина хорошо согласуются с результатами других исследований. Наблюдаемое нами резкое сни-

жение содержания инулина в экстракте при температурах выше 70 °С и соответствующее увеличение доли моносахаридов (фруктозы) обусловлено термическим гидролизом β -(2→1)-гликозидных связей в молекуле полифруктозана (Redondo-Cuenca et al., 2021). Найденный нами оптимальный диапазон (40–50 °С) соответствует условиям, обеспечивающим максимальный выход нативного инулина без его существенной деградации, что согласуется с литературными данными по экстракции из различных растительных источников (Mungunwaran et al., 2022).

Выявление оптимальной продолжительности диффузии

Для выявления оптимальной продолжительности процесса диффузии проведена серия опытов, в которых продолжительность процесса диффузии, при найденных ранее оптимальных температурных режимах, варьировалась в интервале от 20 до 60 мин с шагом изменения 10 мин. Результаты измерений, полученные в ходе опытов, представлены на Рисунке 2 и в Таблице 5.

Рисунок 2

ВЭЖХ-хроматограмма извлечений из крупки топинамбура в зависимости от продолжительности экстракции

Figure 2

HPLC Chromatogram of Extracts from Jerusalem Artichoke Grains Depending on the Duration of Extraction

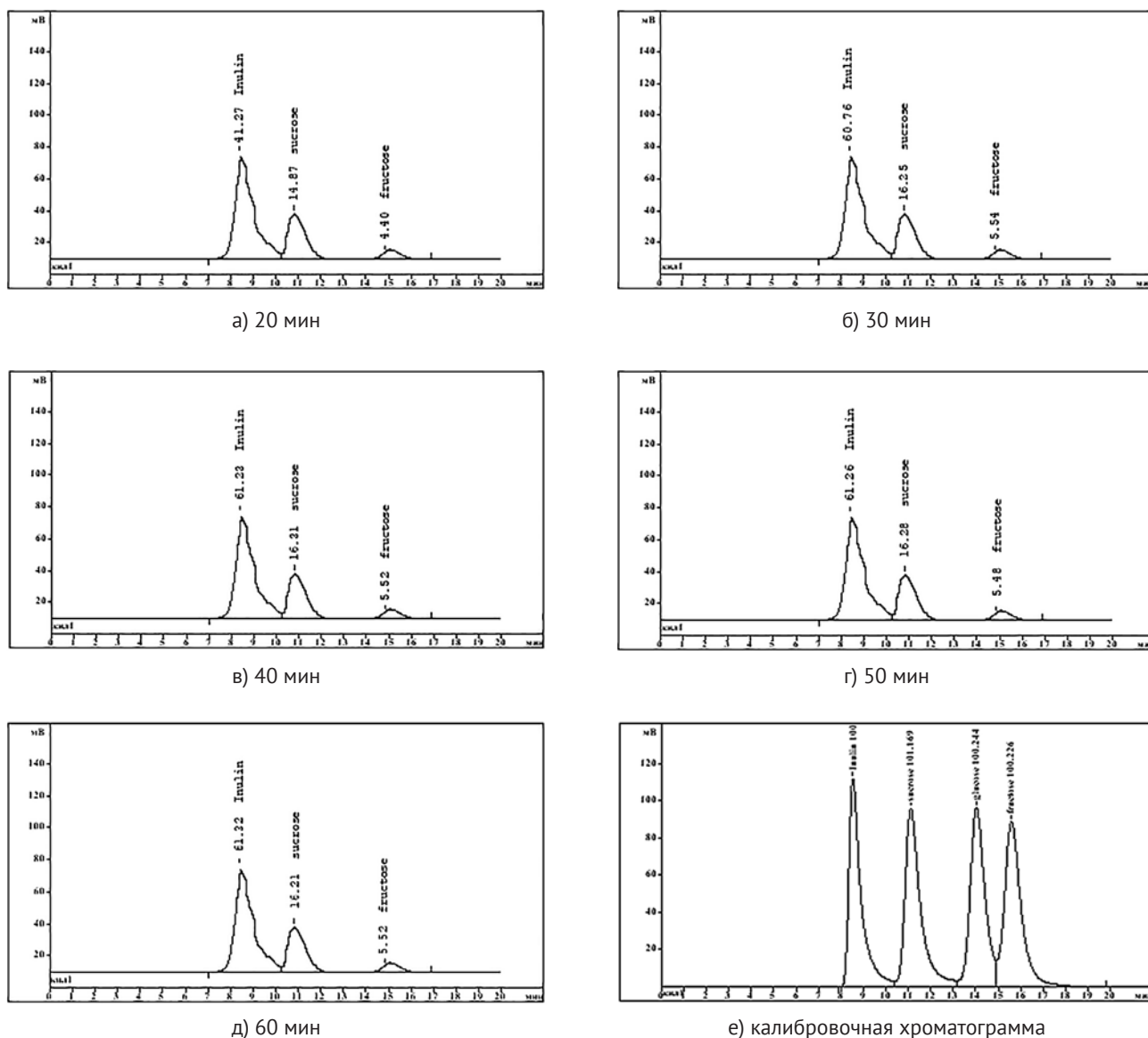


Таблица 5

Углеводный состав экстракта крупки топинамбура при различной продолжительности экстракции, г/100 г экстракта

Table 5

Carbohydrate composition of Jerusalem Artichoke Extract at Different Extraction Times, g/100 g of Extract

Продолжительность экстракции, мин	Углеводный состав экстракта (на 100 % углеводов), %			
	инулин	дисахариды	глюкоза	фруктоза
20	41,27	14,87	0	4,4
30	60,76	16,25	0	5,54
40	61,23	16,31	0	5,52
50	61,26	16,28	0	5,48
60	61,32	16,21	0	5,52

Примечание. Погрешность измерения углеводного состава $\pm 0,3\%$

Note. The Error in Measuring the Carbohydrate Content is $\pm 0.3\%$

Из полученных данных следует, что в процессе экстракции концентрация инулина увеличивается в течение 30 мин, после чего практически не изменяется. Концентрация же ди- и моносахаридов не изменяется на протяжении всего опыта, что может быть объяснено большей растворимостью ди- и моносахаридов, по сравнению с полисахаридом инулином.

Исходя из анализа полученных эмпирических данных сделано предположение, что оптимальная продолжительность гидролиза составляет 30 мин. В сочетании с полученными данными по температурным режимам ферментации рекомендованы оп-

тимальные параметры ферментативного гидролиза: первый период — 30 мин при температуре 40°C, второй период — 30 мин при температуре 50°C.

Сравнительный анализ углеводного состава полученных экстрактов

Результаты комплексного анализа физико-химических характеристик контрольного и изучаемых экстрактов (и их углеводного состава), полученных в ходе эксперимента процесса экстракции, представлены в Таблице 6.

Статистическая обработка переменных отклика, проведенная с использованием процедуры дисперсионного анализа показала значимое влияние вида препарата для обработки на изменение углеводного комплекса (при уровне $p > 0,05$). Сравнение характеристик экстрактов показывает отличие не только их количественного состава, но и органолептических показателей. В контрольном образце (без обработки ферментными препаратами) наблюдался осадок, образование которого можно объяснить формированием преимущественно нерастворимых клеточных остатков, комплексов белка с полифенолами и высокомолекулярных нативных пектинов. Ферментативная обработка, в частности комплексными препаратами, содержащими протеазную активность (например, Биозим PLUS), способствует не только разрушению клеточных стенок, но и частичному гидролизу белков. Установленное явление позволяет предотвратить образование нерастворимых белково-пектиновых комплексов и способствовать более чистому раз-

Таблица 6

Характеристика полученных экстрактов из крупки топинамбура

Table 6

Characteristics of the Extracts Obtained from Jerusalem Artichoke Grains

Наименование ферментного препарата	Характеристика экстракта		Углеводный состав экстракта (на 100 % углеводов), %			
	сухие вещества, %	объем, мл	инулин	дисахариды	глюкоза	фруктоза
Контроль	12,1 \pm 0,006	60	60,97 \pm 0,235	16,28 \pm 0,051	—	5,53 \pm 0,014
Пектолюкс	12,2 \pm 0,006	120	78,98 \pm 0,237	17,71 \pm 0,053	—	3,31 \pm 0,010
ЦеллоЛюкс БГК	13,0 \pm 0,007	95	79,47 \pm 0,238	17,96 \pm 0,054	—	2,58 \pm 0,008
Биозим PLUS	12,6 \pm 0,006	100	78,61 \pm 0,236	17,34 \pm 0,052	—	4,05 \pm 0,012

делению фаз при центрифугировании. Это предположение подтверждается органолептическими показателями экстрактов, имеющих наиболее выраженный эффект осветления, достигаемый за счет целенаправленного гидролиза пектина. В ходе эксперимента полученный при оптимизированных условиях контрольный образец экстракта отличался высокой степенью опалесценции и светло-коричневым цветом.

Образцы, для которых при ферментативном гидролизе использовались препараты ЦеллоЛюкс БГК и Биозим Plus, также отличались значительной степенью опалесценции, но имели более светлый, желтоватый оттенок. Образец, обработанный Пектолюксом, имел соломенный цвет и высокую степень прозрачности. В целом выявленное значительное содержание инулина в образцах при низком уровне моносахаридов свидетельствует о повышении эффективности разрушения диффузионных барьеров клеточного сырья при взаимодействии ферментов с биомассой.

В результате проведенного анализа углеводного состава экстрактов установлено, что ферментативные препараты, использованные в процессе экстрагирования, не оказали существенного влияния на изменение углеводного профиля. Препарат Пектолюкс, традиционно используемый для гидролиза пектиновых соединений, показал незначительное повышение содержания сухих веществ в экстракте, что может быть объяснено образованием продуктов распада пектина (олигосахариды с ненасыщенной связью на невосстанавливаемом конце (4-дезоксид- α -D-галакт-4-энуранозильные группы); фрагменты с измененной структурой, более растворимые). Однако при этом отмечается значительное увеличение объема экстракта до 120 мл, по сравнению с контрольным образцом, который составил 60 мл.

Использование препарата ЦеллоЛюкс БГК, предназначенного для гидролиза целлюлозных и гемицеллюлозных компонентов, аналогичным образом привело к увеличению объема экстракта до 95 мл. Увеличение содержания сухих веществ в экстракте (на 0,9 %) при использовании препарата ЦеллоЛюкс БГК может быть объяснено образованием в экстракте продуктов распада β -глюканов и ксиланов. Кроме того, стоит отметить, что среди используемых ферментных препаратов ЦеллоЛюкс БГК показал наилучший результат по части изменения углево-

дного состава, так как в результате его воздействия концентрация инулина была максимальной.

Препарат Биозим PLUS, представляющий собой ферментный комплекс для гидролиза широкого спектра компонентов (целлюлозных, гемицеллюлозных и пектиновых соединений), показал промежуточные результаты. Препарат превзошел ЦеллоЛюкс БГК по увеличению объема (100 мл) и Пектолюкс по содержанию сухих веществ в экстракте (12,6 %).

Эффект увеличения объема и прозрачности экстракта под действием ферментных препаратов, в первую очередь Пектолюкса, имеет логичное объяснение с точки зрения их субстратной специфичности. Пектиназы и целлюлазы гидролизуют структурные полисахариды клеточной стенки (пектины, гемицеллюлозы) и разрушают гелеобразную пектиновую матрицу. Это приводит к снижению вязкости среды, более эффективному разрушению клеточных структур при экстракции и, как следствие, к увеличению выхода жидкой фазы. Одновременно происходит деполимеризация высокомолекулярных пектинов, которые являются основными коллоидными компонентами, вызывающими помутнение и образование стабильных взвесей, что также отражено в исследованиях Рожковой А. М. и соавторов (Рожкова и др., 2023). Применение пектиназ без выраженной инулиназной активности было направлено не на гидролиз инулина, а на очистку экстракта от сопутствующих балластных веществ, что успешно достигнуто и подтверждается ростом объема и прозрачности при сохранении высокого содержания целевого полисахарида. Таким образом, повышенная прозрачность экстракта после обработки Пектолюксом является прямым следствием гидролиза именно пектиновых веществ, что снижает количество частиц, рассеивающих свет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что температурно-временные параметры и тип ферментативного препарата оказывают определяющее влияние на выход инулина и качественные характеристики экстрактов клубней топинамбура. Установлено, что оптимальным температурным диапазоном для сохранения структуры инулина является интервал 40–50 °С, при кото-

ром достигается максимальное содержание инулина без выраженной деполимеризации до ди- и моносахаридов. Данный результат согласуется с выводами Леонтьева и соавторов (2014), а также Redondo-Cuenca et al. (2021), указывающих на термочувствительность инулина и его склонность к гидролизу при температурах выше 60–70 °С.

Анализ влияния продолжительности экстракции показал, что увеличение времени гидролиза свыше 30 мин не приводит к статистически значимому росту концентрации инулина, что свидетельствует о достижении равновесного состояния между скоростью диффузии и растворимостью полисахарида. Подобная кинетическая зависимость ранее отмечалась в работах Мунгуннарана и соавторов (2022) при экстракции полисахаридов из растительного сырья, что подтверждает универсальность выявленного закономерного характера процесса.

Сравнительный анализ применения ферментных препаратов показал, что используемые комплексы не приводят к принципиальному изменению углеводного профиля экстрактов, однако существенно влияют на объем получаемого экстракта и его органолептические характеристики. Наиболее выраженный эффект увеличения объема и прозрачности экстракта наблюдался при применении препарата Пектолюкс, что может быть объяснено эффективным гидролизом пектиновых соединений клеточных стенок. Аналогичные эффекты повышения выхода экстракта при разрушении пектинового матрикса растительных тканей описаны в исследованиях Рожковой и соавторов (2023) и Шаненко и соавторов (2023).

Препарат ЦеллоЛюкс БГК продемонстрировал наибольшее содержание инулина в экстракте, что, вероятно, связано с более полным разрушением гемицеллюлозных структур и облегчением диффузии полисахаридов в водную фазу. Данный результат подтверждает положения Бызова и соавторов (2023b, 2024), согласно которым биохимическая доступность инулина во многом определяется структурной организацией клеточных стенок клубней топинамбура.

Применение комплексного препарата Биозим PLUS обеспечило промежуточные результаты, что свидетельствует о том, что универсальные ферментные комплексы не всегда демонстрируют максималь-

ную эффективность при решении узкоспециализированных технологических задач. Подобный вывод согласуется с рекомендациями Пучковой и соавторов (2021) и Нугманова и соавторов (2024), подчеркивающих необходимость подбора ферментных систем с учетом целевой направленности процесса переработки инулинсодержащего сырья.

Отсутствие существенных различий в углеводном составе экстрактов между вариантами обработки подтверждает, что используемые ферментные препараты преимущественно влияют на физическую доступность инулина, а не на его химическую трансформацию. Это принципиально важно с точки зрения сохранения пребиотических свойств инулина, поскольку, как показано в работах Alonso-Allende et al. (2024), Sheng et al. (2023) и Teferra (2021), степень полимеризации напрямую связана с функциональной активностью инулина в организме человека.

В то же время установлено, что превышение температурного порога 70 °С приводит к выраженной деполимеризации инулина с ростом доли моно- и дисахаридов, что может снижать пребиотическую ценность конечного продукта. Данный эффект ранее отмечался также в обзорах Vyzov (2022) и Kuteynikova et al. (2024), что подтверждает необходимость строгого контроля температурных режимов при промышленной переработке инулинсодержащего сырья.

Следует отметить, что настоящее исследование проводилось в лабораторных условиях, это ограничивает возможность прямой экстраполяции полученных данных на промышленный масштаб. Кроме того, в работе не рассматривались комбинированные схемы применения ферментных препаратов и их возможные синергетические эффекты, что может быть предметом дальнейших исследований.

В прикладном аспекте полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность использования ферментативных препаратов для оптимизации процессов переработки топинамбура с целью получения инулина высокой степени чистоты. Это соответствует современным тенденциям развития функциональных пищевых ингредиентов и расширяет возможности промышленного внедрения инулина в продукты питания и нутрицевтики, что подчеркивается в работах Petrov et al. (2022), Atta et al. (2025) и Chauhan et al. (2025).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования установлено, что применение ферментативных препаратов при экстракции инулина из клубней топинамбура позволяет существенно повысить эффективность технологического процесса за счет увеличения выхода экстракта и улучшения его физико-химических и органолептических характеристик при сохранении стабильного углеводного профиля. Экспериментально подтверждено, что оптимальными параметрами ферментативного гидролиза, обеспечивающими максимальное содержание инулина без выраженной деполимеризации, являются температурный режим 40–50 °С и продолжительность процесса 30 мин на каждом этапе.

Показано, что использование ферментативных препаратов значительно влияет на выход олигосахаридов в экстракт, при этом в зависимости от вида препарата существенно изменяется объем экстрагируемого продукта и содержание в нем нерастворимых примесей. Наиболее выраженный технологический эффект по совокупности показателей продемонстрировал препарат Пектолюкс, обеспечивший максимальный объем экстракта и наилучшие показатели прозрачности. Препарат ЦеллоЛюкс БГК обеспечил наибольшее содержание инулина в экстракте, тогда как Биозим PLUS занял промежуточное положение по всем исследуемым параметрам.

Полученные результаты подтверждают, что основное технологическое преимущество ферментативной обработки заключается не в модификации углеводного профиля, а в повышении доступности инулина за счет разрушения пектиновых и целлюлозных структур клеточных стенок сыра. Это позволяет рассматривать ферментативный гидролиз как эффективный инструмент предварительной подготовки инулинсодержащего сырья к экстракции без риска снижения пребиотической ценности конечного продукта.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных параметров процесса при разработке и оптими-

зации технологий промышленной переработки топинамбура для получения инулина и фруктоолигосахаридных экстрактов функционального назначения. Результаты работы могут быть использованы при проектировании биотехнологических линий переработки, а также при обосновании выбора ферментных препаратов для конкретных технологических задач.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением комбинированного применения ферментных препаратов, оптимизацией их дозировок, масштабированием процесса, а также с оценкой экономической эффективности предложенных технологических решений. Дополнительным направлением является исследование влияния ферментативной обработки на функциональные свойства инулина в составе готовых пищевых и нутрицевтических продуктов.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Бакин Игорь Алексеевич: разработка концепции; методология исследований; валидация результатов; создание рукописи.

Коротков Владислав Дмитриевич: проведение исследования; эмпирические исследования; визуализация данных; написание черновика рукописи.

Мустафина Анна Сабирдзяновна: верификация данных; написание рукописи, рецензирование и редактирование.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Igor A. Bakin: concept development; research methodology; results validation; manuscript drafting.

Vladislav D. Korotkov: study execution; empirical research; data visualization; manuscript drafting.

Anna S. Mustafina: data verification; manuscript drafting — review and editing.

ЛИТЕРАТУРА

- Байдалинова, Л.С., & Мельникова, В.А. (2016). Использование топинамбура для производства порошкообразного заменителя кофе. *Вестник Международной академии холода*, 1, 13–18. <https://doi.org/10.21047/1606-4313-2016-15-1-13-18>
- Бакин, И.А., Макарова, А.А., & Гаспарян, Ш.В. (2023). Анализ устойчивости технологии очистки клубней топинамбура. *Ползуновский вестник*, 3, 21–33. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.003>
- Бызов, В.А. (2022). Системный анализ состояния и перспективы развития производства инулина (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 23(6), 757–776. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.757-776>
- Бызов, В.А., Пучкова, Т.С., & Пихало, Д.М. (2023а). Оценка показателей качества клубней топинамбура для переработки на инулин и его производные. *Пищевая промышленность*, 4, 58–62. <https://doi.org/10.52653/ppi.2023.4.4.010>
- Бызов, В.А., Пучкова, Т.С., & Пихало, Д.М. (2024). Влияние биохимических свойств топинамбура на качество и свойства получаемого из него инулина. *Пищевая промышленность*, 12, 60–66. <https://doi.org/10.52653/ppi.2024.12.12.012>
- Бызов, В.А., Шилов, В.В., Старовойтов, В.И., & Литвяк, В.В. (2023b). Предпосылки создания технологии выращивания и переработки топинамбура, влияющей на степень полимеризации олисахаридов в клубнях. *Вестник рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*, 15(3), 92–103. <https://doi.org/10.36508/rsatu.2023.47.22.013>
- Быкова, С.Т., & Калинина, Т.Г. (2022). Инулин и олигофруктоза — перспективные ингредиенты для обогащения функциональных продуктов детского питания. *Пищевая промышленность*, 8, 8–11. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.8.8.001>
- Василев, Д., Джержевич, В., Карабасил, Н., Димитриевич, М., Петрович, З., Велебит, Б., & Теодорович, В. (2017). Инулин как пребиотик и заменитель жира в мясных продуктах. *Теория и практика переработки мяса*, 2(2), 4–13. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2017-2-2-4-13>
- Коденцова, В.М., Леоненко, С.Н., Бекетова, Н.А., Кошелева, О.В., Вржесинская, О.А., Сокольников, А.А., Шевякова, Л.В., & Рисник, Д.В. (2022). Инулин как компонент обогащенных пищевых продуктов: влияние на микронутриентный статус организма. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 25(3), 34–42. <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-03-05>
- Коннова, О.И., & Максименко, Ю. А. (2025). Технология получения инулина из клубней топинамбура. *Индустрия питания*, 10(1), 23–29. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-1-3>
- Крутихина, С.Б., Геппе, Н.А., Яблокова, Е.А., & Кудряшова, М.А. (2023). Функциональные запоры у детей раннего возраста: современные возможности использования про- и пребиотиков. *Лечащий Врач*, 26(1), 1–14. <https://doi.org/10.51793/os.2023.26.1.002>
- Кутейникова, Е., Дьякова, Н., & Банова, М. (2024). Инулин: источники и методы получения (обзор). *Биофармацевтический журнал*, 16 (1), 3–11. <https://doi.org/10.30906/2073-8099-2024-16-1-3-11>
- Леонтьев, В.Н., Титок, В.В., Дубарь, Д.А., Игнатовец, О.С., Лугин, В.Г., & Феськова, Е.В. (2014). Инулин из топинамбура: биосинтез, структура, свойства, применение. *Труды Белорусского государственного университета. Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*, 9(1), 180–185. <https://elib.bsu.by/handle/123456789/121907>
- Мунгуннаран, Д., Мунхгерел, Л., Одончимэг, М., Регдел, Д. & Намжил, Э. (2022). Оптимизация процесса экстракции полисахаридов из природного сырья. *Вестник Института химии и химической технологии*, 10(10), 17–23. <https://doi.org/10.5564/bicct.v10i10.18044>
- Нугманов, А.Х.Х., Бакин, И.А., Мустафина, А.С., & Шаповалова, П.Н. (2024). Исследование технологических методов экстракции инулина из корней обыкновенного цикория (*Cichorium intybus L.*). *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 33–44. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.597>

- Нуридуллаева, К.Н., Кариева, Ё.С., & Халилов, Р. М. (2023). Разработка промышленной технологии производства инулина из корней одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* Wigg.). *Химико-фармацевтический журнал*, 57(8), 67–72. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2023-57-8-67-72>
- Петров, С. М., Подгорнова, Н. М., & Григорьев, Д. А. (2022). Инулин как перспективный натуральный пребиотик многоцелевого использования. *Пищевая промышленность*, 7, 66–74. <https://doi.org/10.52653/ppi.2022.7.7.012>
- Пучкова, Т.С., Бызов, В.А., Пихало, Д.М., & Карасева, О.М. (2021). Технологическая оценка и требования к качественным показателям топинамбура и цикория для переработки на инулин и его производные. *Пищевая промышленность*, 10, 86–91. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.10.10.012>
- Рожкова, А.М., Денисенко, Ю.А., Милова, Е.С., Зоров, И.Н., Синецкая, О.А., Ярошенко, Е.В., & Синецкая, А.П. (2023). Новый комплексный ферментный препарат экзо-инулиназы и пектинлиазы для использования в технологии переработки топинамбура. *Биотехнология*, 39(5), 33–43. <https://doi.org/10.56304/S0234275823050101>
- Типсина, Н.Н., Демиденко, Г.А., & Кох, Д.А. (2023). Технология получения и применения полуфабрикатов из топинамбура для обогащения хлебобулочных изделий. *Ползуновский вестник*, 4, 140–145. <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2023.04.018>
- Шаненко, Е.Ф., Мухамеджанова, Т.Г., Скородумов, А.С., & Нестеров, Е.Д. (2023). Получение концентрата фруктоолигосахаридов из клубней топинамбура для функциональных продуктов. *Пиво и напитки*, 4, 20–25. <https://doi.org/10.52653/pin.2023.04.007>
- Alonso-Allende, J., Milagro, F.I., & Aranaz, P. (2024). Health effects and mechanisms of inulin action in human metabolism. *Nutrients*, 16(17), 2935. <https://doi.org/10.3390/nu16172935>
- Atta, A., Sharif, S., Haroon, K., Rasheed, M., Menon, S.V., Balaji, J., Jain, B., Jameel, Q.Y., & Shah, M.A. (2025). A comprehensive review on health benefits of fructooligosaccharides. *eFood*, 6, e70041. <https://doi.org/10.1002/efd2.70041>
- Chauhan, D. S., Vashisht, P., Bebartta, R. P., Thakur, D., & Chaudhary, V. (2025). Jerusalem artichoke: A comprehensive review of nutritional composition, health benefits and emerging trends in food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24, e70114. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70114>
- Melilli, M. G., Buzzanca, C., & di Stefano, V. (2024). Quality characteristics of cereal-based foods enriched with different degree of polymerization inulin: A review. *Carbohydr Polym*, 332, 121918. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121918>
- Mitchell, C. M., Davy, B. M., Ponder, M. A., McMillan, R. P., Hughes, M. D., Hulver, M. W., Neilson, A.P., & Davy, K. P. (2021). Prebiotic inulin supplementation and peripheral insulin sensitivity in adults at elevated risk for type 2 diabetes: A pilot randomized controlled trial. *Nutrients*, 13(9), 3235. <https://doi.org/10.3390/nu13093235>
- Redondo-Cuenca, A., Herrera-Vázquez, S. E., Condezo-Hoyos, L., Gómez-Ordóñez, E., & Rupérez, P. (2021). Inulin extraction from common inulin-containing plant sources. *Industrial Crops & Products*, 170, 113726. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113726>
- Sheng, W., Ji, G., & Zhang, L. (2023). Immunomodulatory effects of inulin and its intestinal metabolites. *Frontiers in Immunology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1224092>
- Teferra, T.F. (2021). Possible actions of inulin as prebiotic polysaccharide: A review. *Food Frontiers*, 2, (4), 1–10. <https://doi.org/10.1002/fft2.92>
- Visuthranukul, C., Sriswasdi, S., Tapaamorndech, S., Chamni, S., Leelahavanichkul, A., Joyjinda, Y., Aksornkitti, V., & Chomtho, S. (2024). Enhancing gut microbiota and microbial function with inulin supplementation in children with obesity. *International Journal of Obesity*, 48(12), 1696–1704. <https://doi.org/10.1038/s41366-024-01590-8>
- Zhou, Z., Zhang, L., Liu, T., Hu, G., Hu, H., Aziz, T., Zhang, M., Wu, J., Naseeb, J., Yang, Z., Yang, Z., & Albekairi, T. H. (2024). Physicochemical properties of yoghurt supplemented with polymerized whey protein and inulin. *LWT*, 210, 116888. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116888>

REFERENCES

- Baidalinova, L.S., & Melnikova, V.A. (2016). Use of Jerusalem artichoke for the production of powdered coffee substitute. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, (1), 13–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.21047/1606-4313-2016-15-1-13-18>
- Bakin, I.A., Makarova, A.A., & Gasparyan, Sh.V. (2023). Analysis of the sustainability of Jerusalem artichoke tuber cleaning technology. *Polzunovsky Vestnik*, (3), 21–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.003>
- Byzov, V. A. (2022). Systems analysis of the state and prospects for the development of inulin production (review). *Agrarian Science of Euro-North-East*, 23(6), 757–776. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.757-776>
- Byzov, V.A., Puchkova, T.S., & Pikhalo, D.M. (2023). Evaluation of quality indicators of Jerusalem artichoke tubers for processing into inulin and its derivatives. *Food Industry*, 4, 58–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/ppi.2023.4.4.010>
- Byzov, V.A., Puchkova, T.S., & Pikhalo, D.M. (2024). The influence of biochemical properties of Jerusalem artichoke on the quality and properties of inulin obtained from it. *Food Industry*, 12, 60–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.52653/ppi.2024.12.12.012>
- Byzov, V.A., Shilov, V.V., Starovoytov, V.I., & Litvyak, V.V. (2023). Prerequisites for the creation of Jerusalem artichoke cultivation and processing technology affecting the degree of polymerization of polysaccharides in tubers. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*, 15(3), 92–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.36508/rsatu.2023.47.22.013>
- Bykova, S.T., & Kalinina, T.G. (2022). Inulin and oligofructose — promising ingredients for the fortification of functional baby foods. *Food Industry*, (8), 8–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.8.8.001>
- Vasilev, D., Djordjevic, V., Karabasil, N., Dimitrijevic, M., Petrovich, Z., Velebit, B., & Teodorovich, V. (2017). Inulin as a prebiotic and fat substitute in meat products. *Theory and Practice of Meat Processing*, 2(2), 4–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2017-2-2-4-13>
- Kodentsova, V.M., Leonenko, S.N., Beketova, N.A., Kosheleva, O.V., Vrzhesinskaya, O.A., Sokolnikov, A.A., Shevyakova, L.V., & Risnik, D.V. (2022). Inulin as a component of fortified food products: Effect on the micronutrient status of the body. *Issues of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 25(3), 34–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-03-05>
- Konnova, O.I., & Maksimenko, Yu.A. (2025). Technology of inulin production from Jerusalem artichoke tubers. *Food Industry*, 10(1), 23–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-1-3>
- Krutikhina, S.B., Geppe, N.A., Yablokova, E.A., & Kudryashova, M.A. (2023). Functional constipation in young children: current possibilities of using pro- and prebiotics. *Lechashchy Vrach*, 26(1), 1–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.51793/os.2023.26.1.002>
- Kuteynikova, E., Dyakova, N., & Banova, M. (2024). Inulin: Sources and methods of production (review). *Biopharmaceutical Journal*, 16(1), 3–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.30906/2073-8099-2024-16-1-3-11>
- Leontyev, V.N., Titok, V.V., Dubar, D.A., Ignatovets, O.S., Lugin, V.G., & Feskova, E.V. (2014). Inulin from Jerusalem artichoke: biosynthesis, structure, properties, and application. *Transactions of the Belarusian State University. Physiological, Biochemical, and Molecular Foundations of Biosystems Functioning*, 9(1), 180–185. (In Russ.). <https://elib.bsu.by/handle/123456789/121907>
- Mungunnaran, D., Munkhgerel, L., Odonchimeg, M., Regdel, D., & Namzhil, E. (2022). Optimization of the polysaccharide extraction process from natural raw materials. *Bulletin of the Institute of Chemistry and Chemical Technology*, 10(10), 17–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.5564/bicct.v10i10.18044>
- Nugmanov, A.Kh.Kh., Bakin, I.A., Mustafina, A.S., & Shapovalova, P.N. (2024). Study of technological methods for inulin extraction from common chicory (*Cichorium intybus L.*)

- roots. *Storage and Processing of Farm Products*, (4), 33–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.597>
- Nuridullaeva, K.N., Kariyeva, E.S., & Khalilov, R.M. (2023). Development of industrial technology for the production of inulin from dandelion roots (*Taraxacum officinale* Wigg.). *Chemical-Pharmaceutical Journal*, 57 (8), 67–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2023-57-8-67-72>
- Petrov, S. M., Podgornova, N. M., & Grigoriev, D. A. (2022). Inulin as a Promising Natural Prebiotic with Multipurpose Use. *Food Industry*, (7), 66–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/ppi.2022.7.7.012>
- Puchkova, T. S., Byzov, V. A., Pikhalo, D. M., & Karaseva, O. M. (2021). Technological evaluation and requirements for quality indicators of jerusalem artichoke and chicory for processing into inulin and its derivatives. *Food Industry*, (10), 86–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.10.10.012>
- Rozhkova, A. M., Denisenko, Yu. A., Milova, E. S., Zorov, I. N., Sinitsyna, O. A., Yaroshenko, E. V., & Sinitsyn, A. P. (2023) A new complex enzyme preparation of exo-inulinase and pectin lyase for use in Jerusalem artichoke processing technology. *Biotechnology*, 39(5), 33–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.56304/S0234275823050101>
- Tipsina, N.N., Demidenko, G.A., & Koch, D.A. (2023). Technology of obtaining and using Jerusalem artichoke semi-finished products for the enrichment of bakery products. *Polzunovsky Vestnik*, (4), 140–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2023.04.018>
- Shanenko, E.F., Mukhamedzhanova, T.G., Skorodumov, A.S., & Nesterov, E.D. (2023). Obtaining a fructooligosaccharide concentrate from Jerusalem artichoke tubers for functional foods. *Beer and Drinks*, (4), 20–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/pin.2023.04.007>
- Alonso-Allende, J., Milagro, F.I., & Aranaz, P. (2024). Health Effects and Mechanisms of Inulin Action in Human Metabolism. *Nutrients*, 16(17), 2935. <https://doi.org/10.3390/nu16172935>
- Atta, A., Sharif, S., Haroon, K., Rasheed, M., Menon, S.V., Balaji, J., Jain, B., Jameel, Q.Y., & Shah, M.A. (2025). A comprehensive review on health benefits of fructooligosaccharides. *eFood*, 6, e70041. <https://doi.org/10.1002/efd2.70041>
- Chauhan, D. S., Vashisht, P., Bebartta, R. P., Thakur, D., & Chaudhary, V. (2025). Jerusalem artichoke: A comprehensive review of nutritional composition, health benefits and emerging trends in food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24, e70114. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70114>
- Melilli, M. G., Buzzanca, C., & di Stefano, V. (2024). Quality characteristics of cereal-based foods enriched with different degree of polymerization inulin: A review. *Carbohydr Polym*, 332, 121918. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121918>
- Mitchell, C. M., Davy, B. M., Ponder, M. A., McMillan, R. P., Hughes, M. D., Hulver, M. W., Neilson, A.P., & Davy, K. P. (2021). Prebiotic inulin supplementation and peripheral insulin sensitivity in adults at elevated risk for type 2 diabetes: A pilot randomized controlled trial. *Nutrients*, 13(9), 3235. <https://doi.org/10.3390/nu13093235>
- Redondo-Cuenca, A., Herrera-Vázquez, S. E., Condezo-Hoyos, L., Gómez-Ordóñez, E., & Rupérez, P. (2021). Inulin extraction from common inulin-containing plant sources. *Industrial Crops & Products*, 170, 113726. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113726>
- Sheng, W., Ji, G., & Zhang, L. (2023). Immunomodulatory effects of inulin and its intestinal metabolites. *Frontiers in Immunology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1224092>
- Teferra, T.F. (2021). Possible actions of inulin as prebiotic polysaccharide: A review. *Food Frontiers* 2(4), 1–10. <https://doi.org/10.1002/fft2.92>
- Visuthranukul, C., Sriswasdi, S., Tapaamorndech, S., Chamni, S., Leelahavanichkul, A., Joyjinda, Y., Aksornkitti, V., & Chomtho, S. (2024). Enhancing gut microbiota and microbial function with inulin supplementation in children with obesity. *International Journal of Obesity*, 48(12), 1696–1704. <https://doi.org/10.1038/s41366-024-01590-8>
- Zhou, Z., Zhang, L., Liu, T., Hu, G., Hu, H., Aziz, T., Zhang, M., Wu, J., Naseeb, J., Yang, Z., Yang, Z., & Albekairi, T.H. (2024). Physicochemical properties of yoghurt supplemented with polymerized whey protein and inulin. *LWT*, 210, 116888. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116888>

ОБ АВТОРАХ

Игорь Алексеевич Бакин, заведующий кафедрой процессов и аппаратов перерабатывающих производств Технологического института Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А.Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-1975>, Scopus ID: 8549026700, Researcher ID: D-3253-2018, SPIN-код: 7771-9017, bakin@rgau-msha.ru

Владислав Дмитриевич Коротков, магистрант Технологического института Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А.Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6339-3616>, SPIN-код: 2350-2522, Linkinstein2001@ya.ru

Анна Сабирдзяновна Мустафина, доцент кафедры технологии хранения и переработки плодовоовощной и растениеводческой продукции Технологического института Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А.Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4895-7226>, Scopus ID: 7221949926, Researcher ID: A-5582-2019, SPIN-код: 2794-4074, mustafina@rgau-msha.ru

ABOUT THE AUTHORS

Igor Alekseevich Bakin, Head of the Department of Processes and Apparatus for Processing Industries, Technological Institute of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-1975>, Scopus ID: 8549026700, Researcher ID: D-3253-2018, SPIN-code: 7771-9017, bakin@rgau-msha.ru

Vladislav Dmitrievich Korotkov, Master's student at the Technological Institute of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6339-3616>, SPIN: 2350-2522, Linkinstein2001@ya.ru

Anna Sabirdzyanovna Mustafina, Associate Professor, Department of Storage and Processing Technology of Fruit and Vegetable and Plant Products, Technological Institute of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4895-7226>, Scopus ID: 7221949926, Researcher ID: A-5582-2019, SPIN: 2794-4074, mustafina@rgau-msha.ru