

УДК 641.3:613.26: 634.7

Информационные системы контроля и управления процессов дегидратации плодово-ягодного сырья

И. А. Бакин¹, С. В. Шилов², А. С. Мустафина³

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева

² ООО «Технологии Без Границ»

³ Кемеровский государственный университет

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Бакин Игорь Алексеевич

127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

E-mail: bakin@kemsu.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования

доступны по запросу

у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Бакин, И. А., Шилов, С. В., & Мустафина, А. С. (2023). Информационные системы контроля и управления процессов дегидратации плодово-ягодного сырья. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 163–176. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.277>

ПОСТУПИЛА: 26.01.2022

ПРИНЯТА: 01.03.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.03.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение. Производственный процесс выработки конечной продукции пищевой промышленности требует соблюдения регламентированных параметров обработки сырья. Контроль определяющих параметров технологии позволяет обеспечить требования качества и безопасности. Повышение эффективности и конкурентоспособности предприятия достигается внедрением систем управления производством и цифровыми технологиями. Для снижения доли ручного сбора данных и автоматизированного управления технологическим циклом предложено использовать цифровые системы управления и мониторинга оборудования. Принимая во внимание, что качество переработки плодово-ягодного сырья напрямую связано с операциями термической обработки, необходимо обеспечить контроль и управление процессами на этих этапах.

Цель. Разработка концепции и обеспечение автоматизированной системы управления вакуумной дегидратации плодово-ягодного сырья, с реализацией алгоритмов управления в среде SIMATIC PCS7, с использованием программируемых логических контроллеров Siemens Simatic.

Материалы и методы. Объект исследования – система управления и автоматизации для вакуумной дегидратации плодов и ягод, имеющих твердый каркас и капиллярно-пористую структуру, с начальной влажностью до 90 %. В качестве методов исследования и реализации методологии управления информационной системы процессов дегидратации использована среда разработки Simatic WinCC. Исследования проводились на оригинальной конструкции сушильной установки. Определение эффективного коэффициента диффузии влаги и константы скорости сушки реализовывалось численными методами решением модели Аррениуса для неизотермических условий.

Результаты. Результатом анализа стал алгоритм изменения параметров технологического процесса дегидратации. Предложено для ускорения процессов обезвоживания принять пониженное давление в первые периоды сушки и последующий кондуктивный энергоподвод. Определены три цикла управления. Вначале осуществляется кондуктивный нагрев до 60 °С при атмосферном давлении. Далее камера сушки вакуумируется до давления 0,5 кПа и до 0,2 кПа. Установлена длительность предварительного прогрева для ягодного сырья – до 10 минут, второго цикла сушки – до 15 минут при температуре 35 °С. Продолжительность третьего цикла 20 минут, при температуре точки насыщения 22 °С. Сформулированы задачи управления процессами с использованием программируемых логических контроллеров Siemens Simatic. Описаны каналы управления и параметры регулирования для обеспечения сохранности биоактивных компонентов сырья.

Выводы. В среде проектирования Simatic WinCC реализованы модули с функциями: прием и передача значений параметров процесса сушки; визуальный контроль; конфигурирование и настройка параметров; принудительное изменение параметров; просмотр информации о регистрируемых в технологической системе событиях. Разработана система визуализации сушильного процесса. Реализованы операторские интерфейсы на панели управления Simatic HMI.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

дегидратация, SCADA, технологические параметры, плодовое сырье, средства мониторинга

Information Systems for Control and Management of Processes of Dehydration of Fruit and Berry Raw Materials

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

² LLC «Technologies without Borders»

³ Kemerovo State University

CORRESPONDENCE:

Igor A. Bakin

Address: 49, Timiryazevskaya st., Moscow, 127434

E-mail: bakin@kemsu.ru

FOR CITATIONS:

Bakin, I. A., Shilov, S. V., & Mustafina, A. S. (2023). Information systems for control and management of processes of dehydration of fruit and berry raw materials. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 163–176. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.277>

RECEIVED: 26.01.2022

ACCEPTED: 01.03.2023

PUBLISHED: 30.03.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



Igor A. Bakin¹, Sergey V. Shilov², Anna S. Mustafina³

ABSTRACT

Background. The production process of producing the final products of the food industry requires compliance with the regulated parameters of processing raw materials. The control of the defining parameters of the technology allows us to ensure the requirements of quality and safety. Increasing the efficiency and competitiveness of the enterprise is achieved by the introduction of production management systems and digital technologies. To reduce the share of manual data collection and automated control of the technological cycle, it is proposed to use digital control and monitoring systems of equipment. Taking into account that the quality of processing of fruit and berry raw materials is directly related to heat treatment operations, it is necessary to ensure control and management of processes at these stages.

Purpose. The purpose of the study is to develop the concept and provide an automated control system for vacuum dehydration of fruit and berry raw materials, with the implementation of control algorithms in the SIMATIC PCS7 environment, using programmable logic controllers Siemens Simatic.

Materials and Methods. The object of research is a control and automation system for vacuum dehydration of fruits and berries having a solid frame and a capillary-porous structure, with an initial humidity of up to 90 %. The Simatic WinCC development environment was used as methods of research and implementation of the management methodology of the information system of dehydration processes. The research was carried out on the original design of the drying unit. Determination of the effective moisture diffusion coefficient and the drying rate constant was realized by numerical methods by solving the Arrhenius model for non-isothermal conditions.

Results. The result of the analysis was an algorithm for changing the parameters of the dehydration process. It is proposed to use reduced pressure during the first drying periods and subsequent conductive power supply to accelerate the dehydration processes. Three control cycles are defined. Initially, conductive heating is carried out up to 60 °C at atmospheric pressure. Next, the dryer chamber is evacuated to a pressure of 0.5 kPa and up to 0.2 kPa. The duration of preheating for berry raw materials is up to 10 minutes, the second drying cycle is up to 15 minutes at a temperature of 35 °C. The duration of the third cycle is 20 minutes, at a saturation point temperature of 22 °C. The tasks of process control using programmable logic controllers Siemens Simatic are formulated. Control channels and control parameters are described to ensure the safety of bioactive components of raw materials.

Conclusions. In the Simatic WinCC design environment, modules with functions are implemented: receiving and transmitting the values of the drying process parameters; visual control; configuration and parameter adjustment; forced parameter change; viewing information about events registered in the technological system. A system for visualizing the drying process has been developed. Operator interfaces are implemented on the Simatic HMI control panel.

KEYWORDS

dehydration, SCADA, technological parameters, fruit raw materials, monitoring tools

ВВЕДЕНИЕ

В условиях перехода к цифровым производствам в отраслях АПК становится актуальной разработка и внедрение систем автоматического управления, SCADA комплексов и схем контроля технологическими процессами. Для технологий переработки сырья это позволяет оптимизировать основные влияющие параметры для достижения нужного уровня требований технологии (Школьников и соавт., 2018). Цифровые решения будущего АПК при системном подходе изменяют технологические процессы для повышения производительности, оптимизации и автоматизации перерабатывающих производств (Bakin et al., 2021).

Современные тенденции в области управления производственными процессами направлены на создание регулируемых и реконфигурируемых систем, на внедрение комплексов с минимальным вмешательством людей-операторов. Промышленные предприятия переходят к технологическим процессам с повышенной производительностью, гибкой настройкой и высокой экономической эффективностью. Сокращение ручного управления и эффективного мониторинга процессов реализуется путем отслеживания производственных этапов общей технологии и анализа данных в режиме реального времени непосредственно в цифровой системе, с получением соответствующей информации, используемой для организации контроля, прогнозирования и выбора оптимальных бизнес-процессов (Kiangala & Wang, 2019).

Внедрение промышленной автоматизации устраняет ручные рутинные операции, в том числе получение информации на рабочих местах и ее интерпретацию (Chen et al., 2020). Оперативный контроль и управление сокращают энергопотребление и увеличивают производительность. Повышение эффективности управления единичных производственных операций достигается оперативным сбором и передачей параметрических данных производственного оборудования и технологических процессов. В то же время точное прогнозирование параметров для управления требует проведения экспериментов и моделирования технологических процессов. Современные тенденции внедрения цифровых производств показывают

перспективность и актуальность комплексного управления технологией, обеспечиваемой мониторингом параметров и функциями автоматического регулирования на всех операциях.

Расширение функции автоматизации производства достигается объединением датчиков, исполнительных механизмов, микроконтроллеров и программного обеспечения в единую систему (Bolton, 2021). В соответствии со стандартом ISA-95¹ второй уровень контроля в иерархии программно-аппаратного комплекса сбора данных и диспетчерского контроля технологических процессов (SCADA) успешно и наименее затратно реализуется системами автоматизации на базе программируемых логических контроллеров (PLC). Однако несмотря на то, что системы автоматизации на базе контроллеров PLC успешно применяются в химической, машиностроительной отрасли, а также на участках дозирования, упаковки и розлива конечной продукции пищевой промышленности (Kiangala & Wang, 2019) в агропромышленном комплексе цифровые технологии и автоматизированные средства для мониторинга и управления процессами первичной переработки растительной и плодовой продукции не получили широкого распространения, используются частично, в основном для отдельных операций. С учетом этого, исследование и разработка автоматизированных технологий и практических рекомендаций по использованию цифровых систем для процессов переработки плодово-ягодного сырья является актуальной задачей.

Производственные процессы перерабатывающих отраслей АПК являются динамическими и многопараметрическими. Характеристики и свойства сырья изменяются как на входе в цепи поставок, так и во времени, в процессах переработки. При хранении и созревании сырья происходят физические и биохимические процессы, влияющие на органолептические и показатели качества, внешний вид, пищевую ценность. Первичная обработка сельскохозяйственного сырья, содержащего значительное количество влаги, является эффективным способом снижения потерь и пищевых отходов. Дегидратация позволяет увеличить хранимостепособность и транспортабельность продукции, сохранить внешний вид, вкус и пищевую ценность. Традиционно при удалении влаги используется конвективный

¹ ANSI/ISA-95.00.05–2013 *Enterprise–Control System Integration*. (2013). <https://www.isa.org/>

способ энергоподвода, однако при этом возникают потери активных компонентов, ухудшение показателей качества. Под воздействием высоких температур вместе с диффузией влаги происходит перенос растворенных веществ из глубины к поверхности сырья. Рекомендовано для предотвращения указанных нежелательных явлений дегидратацию рекомендуется проводить в контролируемых режимах. Установлено, что управление параметрами процесса напрямую связано с их эффективностью, экономичностью и качеством сырья (Maytakov et al., 2018).

Перспективным решением для сохранности биоактивных компонентов при обработке сырья является использование процессов вакуумной низкотемпературной дегидратации. Использование вакуума приводит к повышению капиллярной диффузии влаги в пористой структуре растительного сырья, отводу воздушных прослоек и в целом интенсификации процесса массопереноса. Изучение кинетики обезвоживания овощей показало повышение осмотических процессов переноса влаги за счет применения пониженного давления в первые минуты сушки и последующего импульсного вакуумирования (Junqueira et al., 2021). Сравнительный анализ энергетических затрат, проведенный для двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки показал преимущество способа, сочетающего фазы прогрева, вакуумирования и вакуумной дегидратации, при уменьшении энергоемкости на 40% (Иванова и соавт., 2021). В тоже время возникает техническая задача по обеспечению подвода энергии в сушильную установку в целом и в разные периоды сушки.

Удаление влаги из воздуха в сушильной камере происходит на конденсаторе холодильной установки. Конденсационное осушение сушильного агента было предметом исследования многих работ (Cong et al., 2008; Wawrzyniak et al., 2017; Jian et al., 2021; Krishna & Abhijit, 2012). Однако полученные аналитические модели и рекомендации по организации процесса дегидратации основывались на ряде упрощающих допущений, таких как однородность объекта сушки, стационарное распределение влаги и теплоты, изотермические параметры материала и воздуха. Нерешенными остаются вопросы организации процесса дегидратации применительно к конкретному виду растительного сырья, обеспечение эффективного энергоподвода, в частности для неизотермических условий.

Возможным решением повышения эффективности энергоподвода может стать непосредственный способ передачи энергии от нагревателей к поверхности сырья при кондуктивном обогреве. Для групп растительного сырья исследователями (Wawrzyniak et al., 2017) показано преимущество этого способа для быстрого прогрева и сохранения полезных свойств. Опытным путем подтверждено, что вакуумная дегидратация имеет преимущества в меньшей длительности обработки и минимизации потерь активных компонентов. Эта технология также обеспечивает лучшие физико-химические и органолептические показатели (Xu et al., 2021). Исследователями установлено, что интенсивный нагрев сырья следует проводить в определенной последовательности изменения параметров. Так как определяющим фактором в технологии становится контроль параметров обработки при дегидратации, необходимо проведение исследований по организации сушильного процесса и разработке алгоритма изменения влияющих параметров.

Проведение исследований по определению условий дегидратации, при возможности сокращения времени процесса и улучшения конечного качества высушенного плодово-ягодного сырья, актуально для перерабатывающих отраслей. Опыт исследователей и практические разработки показывают перспективность использования вакуума и импульсного энергоподвода в процессе влагоотвода для сокращения потерь активных компонентов и деградации показателей качества сырья. Решение задачи обеспечения энергоэффективности и повышения скорости процесса основано на использовании информационных систем с интеллектуальным управлением технологическими процессами.

Цель данного исследования: разработка концепции и обеспечение автоматизированной системы управления вакуумной дегидратации плодово-ягодного сырья, с реализацией алгоритмов управления в среде SIMATIC PCS7, с использованием программируемых логических контроллеров Siemens Simatic. Предложена гипотеза, заключающаяся в том, что оптимизацию процесса управления необходимо проводить по контрольным значениям параметров формирования показателей качества сырья и продукции.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Технологические процессы дегидратации, как объекты контроля и управления, являются динамической системой, восприимчивой к внешним изменениям, влияние которых можно определить эмпирическим путем (Bakin et al., 2021). Процессы сушки растительного сырья являются ключевыми для обеспечения хранения, логистики, эффективности использования ресурсов и определяют свойства конечных пищевых систем.

В процессе влагоудаления в период падающей скорости сушки интенсивность десорбции и теплообмена уменьшаются вследствие проявления термовлагопроводности. В этот период времени значительно повышается температура сырья. При наступлении состояния равновесной влажности, когда парциальное давление паров влаги на поверхности объекта и в окружающем пространстве уравниваются, интенсивность испарения становится равной нулю. На практике, для продолжения десорбции для большинства объектов сушки увеличивают температуру сушильного агента (Сафин и соавт., 2016; Федоренко и соавт., 2020). В случае с плодово-ягодным сырьем это приводит к нежелательным эффектам: уплотнению поверхности, с последующим изменением формы; высокотемпературной дегградации с реакциями карамелизации и меланоидинообразования; окислению полифенольных веществ (Paramanandam et al., 2021).

Предотвратить негативные воздействия, характерные для конвективного подвода теплоты, предложено путем реализации процесса дегидратации в условиях вакуумной низкотемпературной сушки. Создание давления вакуума в основном периоде сушки увеличивает движущую силу при повышении влагопроводности и позволяет снизить температуру процесса. Перемещение влаги с поверхности сырья возрастает вследствие уменьшения парциального давления паров в сушильной камере. Диффузия влаги и воздуха из пор каркаса растительного сырья обуславливается термодиффузией и бародиффузией.

Градиент влагопроводности для растительного сырья в тонком слое, в радиальном направлении,

может быть описан на основе второго закона Фика (Crank, 1979) в виде выражения (1)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla[D_{\text{eff}}(\nabla M)], \quad (1)$$

где M — влагосодержание в сырье (г воды / г сухого твердого вещества); t — продолжительность дегидратации (с); D_{eff} — эффективный коэффициент диффузии влаги ($\text{м}^2/\text{с}$).

Аналитическое решение уравнения (1) (Crank, 1979; Mulet, 1994) для коэффициента влагосодержания MR (*moisture ratio*) для тел с развитой поровой структурой, при рассмотрении нестационарного процесса, без учета эффектов переноса влаги под действием градиентов температур, описывается в виде уравнения (2):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{\text{eff}} \times t}{R_{\text{eq}}^2}\right), \quad (2)$$

где M_0 — начальное влагосодержание, (г воды / г сухого твердого вещества); M_e — равновесное влагосодержание, (г воды / г сухого твердого вещества); R_{eq}^2 — эквивалентный размер плодово-ягодного сырья (м); n — положительное целое число.

Перенос влаги путем влагопроводности предложено находить, исходя из предположения, что скорость её удаления пропорциональна переносу влаги за счет десорбции с поверхностного слоя сырья. Аппроксимация адаптированной модели десорбции (2) описана в виде экспоненциального выражения (Phoungchandang & Woods, 2000):

$$MR = \exp(-(Kt)^N), \quad (3)$$

где K — константа сушки, N — показатель уравнения сушки.

Исследователями (Xie et al., 2017) показано, что значение эффективного коэффициента диффузии влаги в уравнении (2) успешно находится по модели Аррениуса. Метод основан на определении постоянной сушки K при варьировании параметров процесса (температуры материала и его влагосодержания).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект

Объект исследования — система управления и автоматизации для вакуумной дегидратации плодов и ягод, состоящих из твердого каркаса и имеющих капиллярно-пористую структуру, с начальной влажностью до 90%.

Методы и инструменты

Аналитическое определение параметров процесса вакуумной дегидратации основано на решении математической модели Аррениуса для неизотермических условий. Численное решение модели реализовывалось на ЭВМ в разработанном программном комплексе (Bakin et al., 2012).

Методология исследования основана на аналитическом определении основных параметров процесса вакуумной дегидратации, путем решения модели Аррениуса для неизотермических условий. Численное моделирование параметров термовлагопроводности, реализованное на ЭВМ, положено в основу создаваемого алгоритма управления процессом дегидратации. Достоверность результатов обеспечивалась использованием при моделировании фундаментальных уравнений тепломассопереноса, сопоставлением и согласованием результатов расчета с известными данными. Для найденных параметров предложены практические решения управления сушильной установкой для вакуумной дегидратации плодов и ягод с использованием программируемых логических контроллеров.

Оборудование

Практическая реализация сформулированного алгоритма управления параметрами и разработка информационной системы контроля и управления технологическими процессами дегидратации проводились на базе ООО «Технологии Без Границ» г. Бийск. Техническое решение технологии вакуумной дегидратации реализовано в виде устройства «Сушильная камера для сушки пищевых продуктов»,

состоящей из герметичной вакуумируемой камеры с крышкой. Подвод теплоты производился от нагревательной рубашки с жидким теплоносителем, циркулирующим под поверхностью сушильного стола. Датчики для сбора информации в реальном времени (температуры и давления) располагались на поверхности крышки и сушильного стола. Вакуумное оборудование состояло из вакуумного и водокольцевого насосов, клапанов управления давлением (Патент № 200436, 2020²).

Процедура исследования

Реализация схемы пропорционально-интегрального управления с обратной связью процессов дегидратации проводилась с использованием компонентов систем автоматизации PLC. Данная методология основана на управлении исполнительных механизмов, соединенных шлюзами с центральной системой программного обеспечения, по сигналам реагирования на изменение параметров процесса от датчиков и сенсорных устройств (Roblek et al., 2016). Стратегия управления, применительно к процессам дегидратации, на основе PLC глобальных производителей описана в технических решениях (Junqueira et al., 2021; Majstorovic et al., 2021).

Функциональная интегрированная система реализовывалась аппаратными PLC компании Simatic системы управления производством Siemens AG.³ Интерфейс компонентов приводов и датчиков обеспечивался по протоколу PROFIBUS (шины AS-интерфейс), стандартизированному компанией Siemens AG. Разработка интерфейсов SCADA-системы производилась в среде TIA (Totally Integrated Automation) Portal. Графическое отображение параметров производственного процесса, отрисовка мнемосхем и динамических объектов проектировалось для использования виртуального HMI комплекса и аппаратных панелей оператора (KP8F key panels) Simatic HMI.

Исследование функционирования устройства проводилось при последовательных циклах обработки сырья и определении параметров и циклов управления устройством. Вначале осуществлялся подъем

² Платицын, А. А., & Шилов, С. В. (2020). РФ Патент № 200436. *Сушильная камера*. М.: Технологии Без Границ.

³ *Distributed Control System SIMATIC PCS 7*. <https://mall.industry.siemens.com>

крышки со световой и звуковой индикацией. Далее, после загрузки сырья по уровню оператором, производился запуск процесса дегидратации. На следующих этапах последовательно реализовывались автоматические операции: закрытие крышки пневматической системой; вакуумирование рабочей камеры; кондуктивный нагрев стола с материалом; создание дополнительного разрежения и отвод паров влаги в вакуумную магистраль; отключение энергоподвода и выравнивание давления в камере до атмосферного; сигнализация об окончании обработки. Открытие камеры выполнялось при окончании запрограммированного цикла обработки и дополнительной проверки условий достижения необходимой влажности продукции. На всех этапах сигналы от контрольно-измерительных приборов установки регистрировались и сравнивались с заданными установками управляющего контроллера. Совокупность управляющих воздействий и контролируемых параметров процесса, их взаимосвязь находились для конкретной группы растительного сырья по результатам аналитических и эмпирических исследований.

Анализ данных

Статистическая обработка экспериментальных данных по кинетике процесса вакуумной дегидратации, по средним значениям из трех повторностей, проводилась с использованием программ StatSoft Statistica и MS Excell. Достоверность результатов обеспечивалась использованием фундаментальных уравнений тепломассопереноса, сопоставлением и согласованием результатов расчета с данными исследователей по сушке в условиях кондуктивного энергоподвода (Cong et al., 2008).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования определялись основные параметры, влияющие на ход процесса вакуумной дегидратации. Далее найденные значения положены в разрабатываемый алгоритм управления сушиль-

ной установкой. Практическая реализация по разработке SCADA-системы мониторинга и управления процессами переработки плодово-ягодного сырья выполнялась с использованием контроллеров PLC.

Определение управляющих параметров процессов гидратации и теплообмена

На первом этапе определялись управляющие воздействия, от которых зависит изменение качественных показателей сырья в ходе технологических операций дегидратации: заданная последовательность длительности циклов нагрева, диапазонов варьирования температуры сырья и остаточного давления в сушильной камере. Сделано допущение, что величина давления вакуума, как и количество отводимых паров, практически не изменяется во всех рабочих периодах дегидратации. На практике это обеспечивается параллельной установкой вакуумного и водокольцевого насосов в спроектированной установке и подключением их в заданной последовательности.

Значение коэффициента D_{eff} в выражении (2) находилось по уравнению Аррениуса, в зависимости от температуры и характеристик высушиваемого сырья. Метод определения D_{eff} по численным значениям коэффициентов наклона, полученным путем графического дифференцирования кривых сушки плодового сырья $\ln MR$, основан на работе (Alves-Filho et al., 1997). Расчетная зависимость эффективного коэффициента диффузии влаги имеет вид:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (4)$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель уравнения Аррениуса ($\text{м}^2/\text{с}$);

E_a — энергия активации (кДж/моль), R — газовая постоянная ($8,31 \text{ кДж/моль} \cdot \text{К}$) и T — температура процесса (град Кельвин).

Для автоматизации процедуры расчета значений коэффициентов диффузии и влагосодержания (MR), при варьировании параметров дегидратации и размеров плодово-ягодного сырья разработана программа для ЭВМ⁴.

⁴ Бакин, И. А., Мустафина, А. С., Ащеулов, А. С., Кобзев, Ю. Н. & Ащеулова, А. С. (2012). Программа для ЭВМ 2012614315. Программа для расчета коэффициента молекулярной диффузии растительного сырья. Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.

На следующем этапе изучены кинетические закономерности процессов теплообмена. В разработанной установке подвод теплоты к материалу осуществляется за счет кондукции через поверхность сушильного стола. Кондуктивный обогрев обеспечивает возможность отвода образующихся паров влаги при пониженном давлении, в отличие от конвективного способа нагрева. Инерционное изменение лимитирующих параметров в толще материала, вызванное изменением его теплофизических свойств, обуславливает необходимость оперативного управления величиной подводимой тепловой энергии. Достигается это изменением расхода теплоносителя в рубашке кондуктивного нагрева. Трансфер тепловой энергии в процессе подвода теплоты в неизотермических условиях с достаточной точностью определяется следующим уравнением (Шахов и соавт., 2014):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \beta \cdot (T - T_0), \quad (5)$$

где T — температура материала в измеряемой точке (град Кельвин); x — координата по толщине продукта (м), $x \in [0; l]$; l — толщина слоя (м); k — коэффициент температуропроводности (м²/с); β — коэффициент теплопоглощения; T_0 — температура процесса сушки (град Кельвин).

Результаты численного решения дифференциальных уравнений (1) и (5) в виде полученного массива данных по изменению параметров процесса положены в алгоритм управления процессом дегидратации. Начальные параметры, характеристики сырья, значения теплофизических коэффициентов и условия протекания процесса для конкретного продукта определялись эмпирическим путем. Полученные результаты по кинетике процесса сушки в виде рассчитанных значений величин влагосодержания в сырье (MR) в определенный момент времени качественно соотносятся с известной теорией сушки (Wawrzyniak et al., 2017).

Характер кривых сушки, по которым происходит изменение (уменьшение) MR по экспоненциальным зависимостям, является аналогичным ранее полученным в работе (Phoungchandang & Woods, 2000).

Исследование кинетики процессов дегидратации

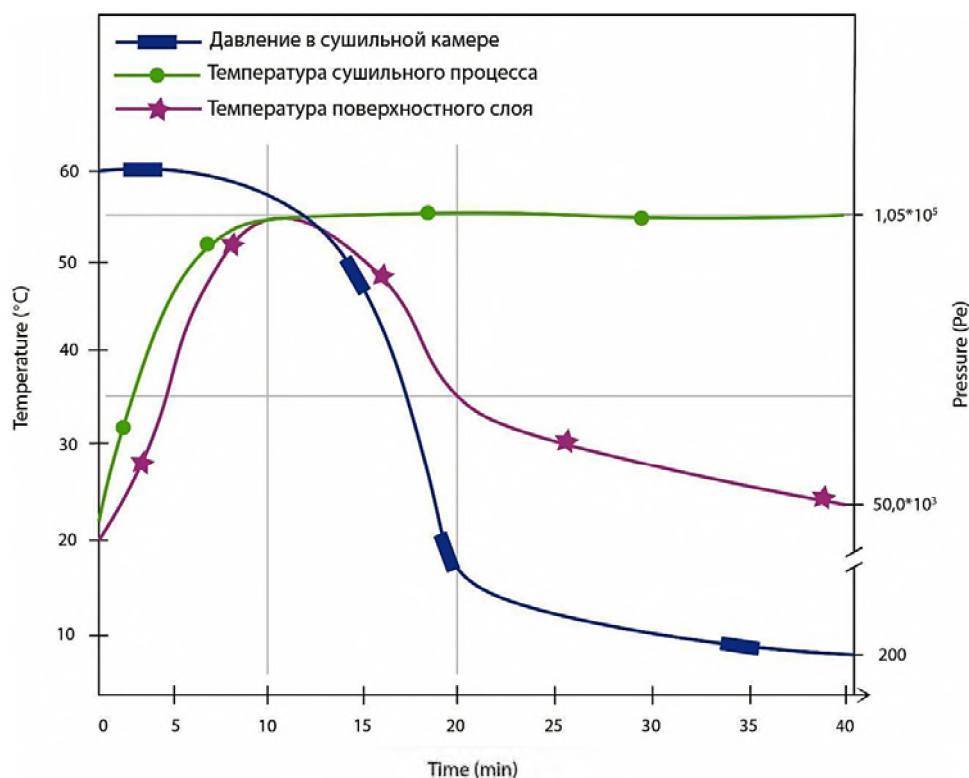
В соответствии с выделенными периодами процесса дегидратации определены три цикла управления.

Первый этап характеризуется удалением свободной влаги, далее выделен этап удаления связанной влаги. Для повышения скорости диффузии влаги в этот период необходимо уменьшить давление в камере аппарата. Реализация управляющего воздействия на величину давления в этом цикле обуславливает уменьшение температуры сырья до температуры точки насыщения вследствие фазового перехода влаги. Данное явление объясняется тем, что поток теплоты, поступающий в материал за счет теплопроводности от поверхности сушильного стола, расходуется в большей степени на испарение влаги в условиях пониженного давления. Данное предположение и результаты расчетов коэффициента MR в программе для ЭВМ хорошо согласуются с данными известных исследований (Cong et al., 2008). В тоже время необходимо учитывать дополнительный поток теплоты, подводимый от кондуктивной поверхности сушильного стола, с температурой равной 60 °С. Для предотвращения явления сорбции влаги на поверхности сырья, имеющего более низкую температуру (35 °С) необходимо понизить давление на третьем цикле. Произведен расчет параметров для третьего цикла и определены контролируемые параметры для варианта, когда начальная температура сырья составляет 20 °С. Предложенная последовательность циклов дегидратации для плодово-ягодного сырья показана на графике (Рисунок 1).

Согласно разработанному алгоритму параметрами управления являются продолжительность нагрева, температура сырья в поверхностном слое, расход теплоносителя (температура поверхности стола). Вначале осуществляется кондуктивный нагрев (температура поверхности 60 °С, продолжительность 10 минут) подготовленного сырья при атмосферном давлении. В этот момент происходит перераспределение концентрации влаги к поверхностной диффузионной зоне. При удалении от зоны нагрева в сырье проявляется термодиффузионный фактор, наблюдается отрицательный концентрационный градиент.

Рисунок 1

Алгоритм изменения параметров технологического процесса дегидратации



В процессе сушки, с уменьшением влагосодержания материала, количество диффундирующего пара уменьшается. В этом случае необходимо повышать перепад давлений в камере и парциального давления паров в порах сырья. На втором цикле камера сушилки вакуумируется до давления 0,5 кПа, в результате чего градиенты влагопроводности выравниваются, диффузионный поток можно считать стационарным. Продолжительность второго цикла ограничивается наступлением периода падающей скорости сушки. Для изученного ягодного сырья длительность второго периода сушки — до 15 минут при температуре от 55 °С до 35 °С. На третьем цикле, после включения водокольцевого вакуумного насоса, происходит понижение остаточного давления до 200 Па. В этих условиях водяной пар диффундирует из поровых каналов и удаляется из камеры аппарата. Температура продукта при этом понижается до температуры точки насыщения, равной 22 °С. Продолжительность третьего цикла, достаточная для достижения коэффициента влажности MR , соответствующего равновесному влагосодержанию до 5 %, составляет до 20 минут. По окончании циклов обработки происходит выравнивание давления до атмосферного при пре-

кращении нагрева (перекрытие подачи теплоносителя в рубашки стола).

Разработка SCADA-системы управления

Однородные способы управления полученными данными реализованы с использованием программируемых логических контроллеров Siemens Simatic. Модуль контроля состояния сушильной установки обеспечивает прием и передачу значений параметров процесса сушки для визуального контроля оператором. Кроме того, решались задачи ручного конфигурирования и настройки параметров технологического процесса, с возможностью принудительного изменения параметров управляющим персоналом в случае обработки другого вида сырья. Предусмотрено архивирование текущих параметров мониторинга и управления, запись корректирующих действий оператора. В SCADA-системе реализован доступ к единой базе данных параметрами обработки для различных видов сырья.

Точная адаптация нелинейного управления параметрами кондуктивного энергоподвода процесса

дегидратации оказалась возможной благодаря использованию контроллеров с пропорционально интегральной производной. Состояние дискретных сигналов модулей нагрева через интерфейсные модули передаются к PLC, далее по схеме регулирования производится управление переменными параметрами температуры стола и расхода теплоносителя. Общий подход к выбору элементов системы согласуется с рекомендациями для моделирования PLC (Bolton, 2021). Программный модуль системами кондуктивного нагрева поверхностей и вакуумирования камеры показан на схеме (Рисунок 2).

Учитывая термолабильность объектов сушки, разработаны функции отключения кондуктивного нагрева при превышении температурных параметров процесса в нештатных ситуациях. Программный модуль предусматривает режим отключения, если любой из контролируемых параметров выходит за заданные пределы. В этой ситуации на панель оператора выводится экран «Процесс сушки невозможен», а PLC переходит в режим ожидания.

Функции управления и мониторинга сушильного процесса реализованы с отображением информации на панели управления Simatic HMI. Интерфейс для организации человеко-машинного интерфейса для экрана оператора при программировании ме-

Рисунок 3

Операторский интерфейс ввода установок на панели управления SIMATIC HMI

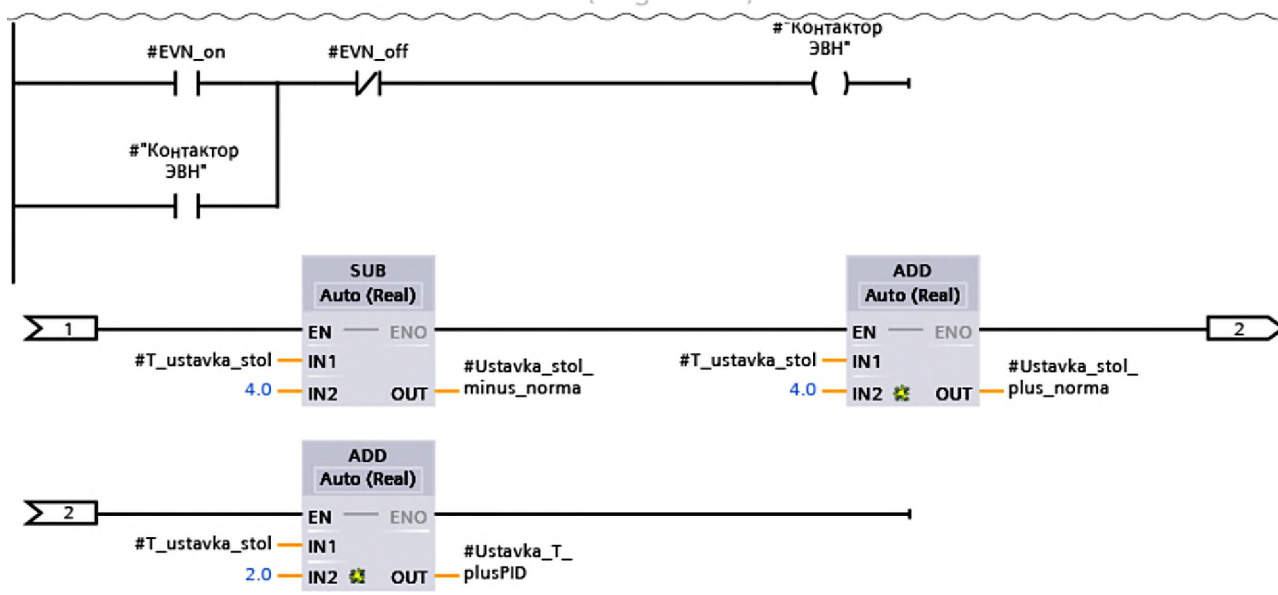


тодом ручной настройки установок технологического процесса показан на Рисунке 3.

В соответствии с поставленной задачей создания интеллектуальной системы управления, реализована возможность ввода параметров процесса оператором в среде Simatic WinCC, либо непосредственно с экрана управления. Параметры сохраняются в системе управления базой данных. На

Рисунок 2

Схема регулирования температуры процесса



экранах панели оператора реализованы функции мониторинга и диалоговые окна ввода управляющих параметров дегидратации. Концепция организации коммуникаций в киберфизической системе (Majstorovic et al., 2021), допускающая участие человека для организации новых технологических циклов, согласуется с реализованным в программе модульным выбором типа обрабатываемого сырья, вводом и коррекцией параметров технологического процесса для переработки других видов, либо изменения партии сырья.

Использование вакуумно-импульсной дегидратации создает чередование циклов расширения и сжатия заземленного водяного пара в порах сырья, что за счет гидродинамических механизмов переноса увеличивает общий массоперенос (Сафин, 2016). В исследовании показано, что увеличение значений эффективного коэффициента диффузии, установленное при решении модели Аррениуса, объясняет уменьшение продолжительности процесса вакуумной дегидратации. В тоже время найденные параметры управления процессом справедливы для неизотермических условий, следовательно, в дальнейшем необходимы исследования для нахождения условий обработки при постоянных температурах. В настоящее время для автоматизации операций и технологий переработки растительного сырья ограничено используются комплексы и системы SCADA. Показанное применение системы мониторинга и управления процессами сушки ягодного сырья может служить примером повышения эффективности технологических процессов при внедрении интеллектуальных систем автоматического управления. Результаты моделирования переноса влаги путем теплопроводности, количественные параметры процессов дегидратации, могут быть воспроизведены и использованы в смежных отраслях промышленности, таких, как сушка лекарственного и овощного сырья. Авторы рекомендуют полученные количественные результаты моделирования и схемы управления в качестве успешных примеров подхода к автоматизации производственных процессов и использования цифровых технологий.

ВЫВОДЫ

Показатели качества при переработке плодово-ягодного сырья напрямую зависят от соблюдения регламентированных параметров технологии. В ходе термических операций сохранность ценных компонентов определяется температурой и продолжительностью обработки. Цифровые системы управления и мониторинга оборудованием снижают долю человеческого вмешательства и обеспечивают автоматизированное управление технологическим циклом. В исследовании, для понижения температуры и повышения эффективности процесса изучен способ вакуумной дегидратации.

Разработка алгоритма изменения параметров технологического процесса дегидратации основана на решении модели Аррениуса для неизотермических условий. Определение эффективного коэффициента диффузии влаги и константы скорости сушки реализовывалось численными методами в разработанном программном обеспечении.

Предложенные циклы управления процессом дегидратации, при чередовании которых изменяется степень теплоподвода и давление вакуума, могут рассматриваться как энергоэффективные. Установлено, что кондуктивный нагрев ягодного сырья до 60 °С при давлении до 0,5 кПа, значительно уменьшает продолжительность регидратации. Рекомендованные управляющие параметры процессов дегидратации и теплообмена могут использоваться для других групп растительного сырья, позволяют увеличить скорость сушки и уменьшить потребление энергии в сравнении с традиционными методами.

С использованием цифровых решений в области автоматизации промышленных процессов разработана информационно-коммуникационная система управления процессами вакуумной низкотемпературной сушки пищевых систем. Разработанная системная архитектура обеспечивает автоматическое регулирование температуры и давления на базе контроллеров Siemens Simatic в сушильной камере, передачу сигналов и операторский контроль. В среде проектирования SIMATIC WinCC разработана система визуализации сушильного процесса. Программная и аппаратная часть системы дегидратации могут использоваться в перерабатывающих отраслях АПК и других технологиях для реализации процессов дегидратации термолабильного сырья.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Бакин Игорь Алексеевич — формулирование исследовательских целей и задач, разработка или проектирование методологии исследования, подготовка и создание рукописи, её комментирование или пересмотр, ответственность за управление и координацию.

Шилов Сергей Викторович — проведение исследовательского процесса, в частности, проведение экспериментов.

Мустафина Анна Сабирдзяновна — подготовка и создание черновика рукописи, в частности написание первоначального текста рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванова, Э. С., Родионов, Ю. В., & Зорина, О. А. (2021). Инновационные конструкции и технологии сушки плодовоовощной продукции. *Наука в центральной России*, (1), 43–53. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-43-53>
- Сафин, Р. Р., Хасаншин, Р. Р., Гараева, А. Ф., & Ахметов, А. И. (2016). Вакуумно-конвективная сушка измельченного растительного сырья. *Вестник технологического университета*, (19), 63–67.
- Федоренко, И. Я., Землянухина, Т. Н., Шилов, С. В., & Орлова, Н. А. (2020). Обоснование параметров конвективно-вакуумной сушки растительного сырья. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, (11), 120–125.
- Шахов, С. В., Мосолов, Г. И., & Барыкин, Р. А. (2014). Разработка вакуум-сублимационной сушилки для обезвоживания жидких продуктов. *Вестник международной академии холода*, (3), 58–60.
- Школьников, М. Н., Бакин, И. А., Мустафина, А. С., & Алексенко, Л. А. (2018). Оптимизация процессов получения экстрактов фитобиотических фармсубстанций ягодного сырья. *Техника и технология пищевых производств*, 48(4), 121–130. <http://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-121-130>
- Alves-Filho, O., Strommen, I., & Thorbergsen, E. (1997). A simulation model for heat pump dryer plants for fruits and roots. *Drying Technology*, 15(5), 1369–1398. <http://doi.org/10.1080/07373939708917299>
- Bakin, I., Panfilov, V. & Popov, A. (2021). Synergy of a complex of complex technologies of the future agro-industrial complex. In *Innovative Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems: E3S Web Conference: International Scientific and Practical Conference* (vol. 262, Article 01009). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201009>
- Bolton, W. (2021). Chapter 7 — PLC Systems. *Instrumentation and Control Systems*, 2021, 165–188. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823471-6.00007-1>
- Chen, X. & Voigt, T. (2020). Implementation of the Manufacturing Execution System in the Food and Beverage Industry. *Journal of Food Engineering*, 278, Article 109932. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109932>
- Cong, D. T., Haddad, M. A., Rezzoug, Z., Lefevre, L. & Allaf, K. (2008). Dehydration by successive pressure drops for drying paddy rice treated by instant controlled pressure drop. *Drying Technology*, 26(4), 443–451. <https://doi.org/10.1080/07373930801929300>
- Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion*. Oxford university press.
- Jian, L., Jinfeng, B., Fengzhao, W., Xin, J., Xinye, W., & Jin, X. (2021). Recent developments and trends of instant controlled pressure drop drying—a review. *Drying Technology*, 39(11), 1704–1719. <http://doi.org/10.1080/07373937.2021.1916753>
- Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., de Mendonça, K. S., de Melo Junior, R. E., & Souza, A. U. (2021). Modeling mass transfer during osmotic dehydration of different vegetable structures under vacuum conditions. *Food Science and Technology, Campinas*, 41(2), 439–448. <https://doi.org/10.1590/fst.02420>
- Kiangala, K. S., & Wang, Z. (2019). An Industry 4.0 approach to develop auto parameter configuration of a bottling process in a small to medium scale industry using PLC and SCADA. *Procedia Manufacturing*, 35, 725–730. <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.015>
- Krishna, K. P., & Abhijit, K. (2012). Heat pump assisted drying of agricultural produce — an overview. *Journal of Food Science and Technology*, 49(2), 142–160. <http://doi.org/10.1007/s13197-011-0334-z>
- Majstorovic, V., Jankovic, G., Zivkov, S., & Stojadinovic, S. (2021). Digital Manufacturing in SMEs based on the context of the Industry 4.0 framework — one approach. *Procedia Manufacturing*, 54, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.009>
- Maytakov, A. L., Yusupov, Sh. T., & Popov, A. M. (2018). Study of the process of concentration as a factor of product quality formation. *Foods and Raw Materials*, 6(1), 172–181. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-172-181>
- Mulet, A. (1994). Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering*, 22(1–4), 329–348. [http://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90038-8](http://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90038-8)
- Paramanandam, V., Jagadeesan, G., Muniyandi, K., Manoharan, A. L., Nataraj, G., Sathyanarayanan, S., & Thangaraj, P. (2021). Comparative and variability analysis of different

- drying methods on phytochemical, antioxidant and phenolic contents of ficus auriculata lour. Fruit. *Phytomedicine Plus*, 1(3), Article 100075. <http://doi.org/10.1016/j.phyplu.2021.100075>
- Phoungchandang, S., & Woods, J. L. (2000). Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. *Journal of Food Science*, 65(4), 651–657. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb16067.x>
- Roblek, V., Mesko, M., & Krapez, A. (2016) A complexity view of Industry 4.0. *SAGE Open*, 6(2), Article 21582440166. <http://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- Wawrzyniak, P., Zbicinski, I., & Sobulska, M. (2017). Applications: Drying of materials. In *CRC Handbook of Thermal Engineering* (pp. 1306–1337). Publisher: CRC Press.
- Xie, L., Mujumdar, A. S., Fang, X., Wang, J., Dai, J., Du, Z., Xiao, H., Liu, Y. & Gao, Z. (2017). Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes. *Food and Bioprocess Processing*, 102, 320–331. <http://doi.org/10.1016/j.FBP.2017.01.012>
- Xu, P., Peng, X., Yang, J., Li, X., Zhang, H., Jia, X., Liu, Y., Wang, Z., & Zhang, Z. (2021). Effect of vacuum drying and pulsed vacuum drying on drying kinetics and quality of bitter orange (*Citrus aurantium* L.) slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, Article e16098. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16098>
- ## REFERENCES
- Fedorenko, I. Ya., Zemlyanukhina, T. N., Shilov, S. V., & Orlova, N. A. (2020). Obosnovanie parametrov konvektivno-vakuumnoi sushilki rastitel'nogo syr'ya [Substantiation of the parameters of a convective vacuum dryer of vegetable raw materials]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], (11), 120–125.
- Ivanova, E. S., Rodionov, Yu. V., & Zorina, O. A. (2021). Innovatsionnye konstruksii i tekhnologii sushki plo-dovoshchnoi produktsii [Innovative designs and technologies for drying fruit and vegetable products]. *Nauka v tsentral'noi Rossii* [Science in Central Russia], (1), 43–53. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-43-53>
- Safin, R. R., Khasanshin, R. R., Garaeva, A. F., & Akhmetov, A. I. (2016). Vakuumno-konvektivnaya sushka izmel'chen-nogo rastitel'nogo syr'ya [Vacuum-convective drying of crushed vegetable raw materials]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], (19), 63–67.
- Shakhov, S. V., Mosolov, G. I., & Barykin, R. A. (2014). Raz-rabotka vakuum-sublimatsionnoi sushilki dlya obez-vozhivaniya zhidkikh produktov [Development of a vacuum freeze dryer for dehydration of liquid products]. *Vestnik mezhdunarodnoi akademii kholoda* [Bulletin of the International Academy of Cold], (3), 58–60.
- Shkol'nikova, M. N., Bakin, I. A., Mustafina, A. S., & Aleksenko, L. A. (2018). Optimizatsiya protsessov polucheniya ekstraktov fitobioticheskikh farmsubstantsii yagodnogo syr'ya [Optimization of the processes of obtaining extracts of phytobiotic pharmaceutical substances of berry raw materials]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Equipment and Technology of Food Production], 48(4), 121–130. <http://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-121-130>
- Alves-Filho, O., Strommen, I., & Thorbergsen, E. (1997). A simulation model for heat pump dryer plants for fruits and roots. *Drying Technology*, 15(5), 1369–1398. <http://doi.org/10.1080/07373939708917299>
- Bakin, I., Panfilov, V. & Popov, A. (2021). Synergy of a complex of complex technologies of the future agro-industrial complex. In *Innovative Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems: E3S Web Conference: International Scientific and Practical Conference* (vol. 262, Article 01009). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201009>
- Bolton, W. (2021). Chapter 7 — PLC Systems. *Instrumentation and Control Systems*, 2021, 165–188. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823471-6.00007-1>
- Chen, X. & Voigt, T. (2020). Implementation of the Manufacturing Execution System in the Food and Beverage Industry. *Journal of Food Engineering*, 278, Article 109932. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109932>
- Cong, D. T., Haddad, M. A., Rezzoug, Z., Lefevre, L. & Allaf, K. (2008). Dehydration by successive pressure drops for drying paddy rice treated by instant controlled pressure drop. *Drying Technology*, 26(4), 443–451. <https://doi.org/10.1080/07373930801929300>
- Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion*. Oxford university press.
- Jian, L., Jinfeng, B., Fengzhao, W., Xin, J., Xinye, W., & Jin, X. (2021). Recent developments and trends of instant controlled pressure drop drying-a review. *Drying Technology*, 39(11), 1704–1719. <http://doi.org/10.1080/07373937.2021.1916753>
- Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., de Mendonça, K. S., de Melo Junior, R. E., & Souza, A. U. (2021). Modeling mass transfer during osmotic dehydration of different vegetable structures under vacuum conditions. *Food Science and Technology, Campinas*, 41(2), 439–448. <https://doi.org/10.1590/fst.02420>
- Kiangala, K. S., & Wang, Z. (2019). An Industry 4.0 approach to develop auto parameter configuration of a bottling process in a small to medium scale industry using PLC and SCADA. *Procedia Manufacturing*, 35, 725–730. <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.015>

- Krishna, K. P., & Abhijit, K. (2012). Heat pump assisted drying of agricultural produce — an overview. *Journal of Food Science and Technology*, 49(2), 142–160. <http://doi.org/10.1007/s13197-011-0334-z>
- Majstorovic, V., Jankovic, G., Zivkov, S., & Stojadinovic, S. (2021). Digital Manufacturing in SMEs based on the context of the Industry 4.0 framework — one approach. *Procedia Manufacturing*, 54, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.009>
- Maytakov, A. L., Yusupov, Sh. T., & Popov, A. M. (2018). Study of the process of concentration as a factor of product quality formation. *Foods and Raw Materials*, 6(1), 172–181. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-172-181>
- Mulet, A. (1994). Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering*, 22(1–4), 329–348. [http://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90038-8](http://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90038-8)
- Paramanandam, V., Jagadeesan, G., Muniyandi, K., Manoharan, A. L., Nataraj, G., Sathyanarayanan, S., & Thangaraj, P. (2021). Comparative and variability analysis of different drying methods on phytochemical, antioxidant and phenolic contents of ficus auriculata lour. Fruit. *Phytomedicine Plus*, 1(3), Article 100075. <http://doi.org/10.1016/j.phyplu.2021.100075>
- Phoungchandang, S., & Woods, J. L. (2000). Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. *Journal of Food Science*, 65(4), 651–657. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb16067.x>
- Roblek, V., Mesko, M., & Krapez, A. (2016) A complexity view of Industry 4.0. *SAGE Open*, 6(2), Article 21582440166. <http://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- Wawrzyniak, P., Zbicinski, I., & Sobulska, M. (2017). Applications: Drying of materials. In *CRC Handbook of Thermal Engineering* (pp. 1306–1337). Publisher: CRC Press.
- Xie, L., Mujumdar, A. S., Fang, X., Wang, J., Dai, J., Du, Z., Xiao, H., Liu, Y. & Gao, Z. (2017). Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes. *Food and Bioprocess Processing*, 102, 320–331. <http://doi.org/10.1016/j.FBP.2017.01.012>
- Xu, P., Peng, X., Yang, J., Li, X., Zhang, H., Jia, X., Liu, Y., Wang, Z., & Zhang, Z. (2021). Effect of vacuum drying and pulsed vacuum drying on drying kinetics and quality of bitter orange (*Citrus aurantium* L.) slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, Article e16098. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16098>