

УДК 620.9:66.047.3

Направления развития энергосбережения при вакуумной сушке растительных материалов

Канд. техн. наук А. А. РУМЯНЦЕВ
Тюменский индустриальный университет
E-mail: aarumyantsev1@gmail.com

Сушка растительных материалов под вакуумом имеет преимущества по сравнению с конвективной сушкой. Вакуумная сушка происходит без кислорода и при умеренной температуре, что позволяет сохранить большую часть свойств растительного сырья. По сравнению с конвективной сушкой затраты на оборудование для вакуумной сушки относительно высоки, а производительность низкая. К энергосбережению при сушке проявляется повышенный интерес во всем мире, но из-за разрозненной и противоречивой информации в публикациях имеется необходимость в анализе, систематизации, концентрации и обобщении этой информации. Цель исследования — проведение аналитического обзора энергосберегающих направлений вакуумной сушки пористых растительных материалов и сырья. Определены энергосберегающие направления вакуумной сушки растительных материалов. Сокращение энергетических затрат и времени вакуумной сушки материалов обеспечивается применением комбинированных способов (вакуумная микроволновая сушка, вакуумная сушка с ИК-нагревом, вакуумная высокочастотная сушка, конвективная вакуумная сушка); использованием предварительной обработки сырья (высокое давление вакуума, ультразвук, режим пульсации в электрическом поле) и теплоаккумулирующих материалов (парафина); оптимизацией параметров процесса и его управления, а также совершенствованием конструкций сушилок; применением тепловых насосов и возобновляемых источников энергии (солнечно-вакуумная сушка). Практическая значимость исследования заключается в возможности проследить масштабы изучения энергосбережения при вакуумной сушке материалов на современном этапе научного знания. Представленные в статье выводы могут быть полезны для других исследователей, которые заинтересованы в изучении направлений энергосбережения и могут определить актуальные для них проблемы.

Ключевые слова: энергосбережение, вакуумная сушка, растительные материалы.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 24.06.2024, одобрена после рецензирования 16.08.2024, принята к печати 03.09.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-32-38

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Румянцев А. А. Направления развития энергосбережения при вакуумной сушке растительных материалов. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 32–38. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-32-38

Directions for the development of energy saving at vacuum drying of plant materials

Ph. D. A. A. RUMYANTSEV
Tyumen Industrial University
E-mail: aarumyantsev1@gmail.com

Drying plant materials under vacuum has advantages over convective drying. Vacuum drying takes place without oxygen and at a moderate temperature, which allows you to preserve most of the properties of vegetable raw materials. Compared with convective drying, the cost of vacuum drying equipment is relatively high and the productivity is low. There is increased interest in resource conservation during drying all over the world, but due to the disparate and contradictory information in publications, there is a need for analysis, systematization, concentration and generalization of this information. The purpose of the study is to conduct an analytical review of resource-saving directions for vacuum drying of porous plant materials and raw materials. Resource-saving directions of vacuum drying of plant materials and raw materials have been identified. The reduction of energy costs and time of vacuum drying of materials is ensured by the use of combined methods (vacuum microwave drying, vacuum drying with IR heating, vacuum high-frequency drying, and convective vacuum drying); the use of pretreatment for raw materials (high vacuum pressure, ultrasound, and pulsation mode in an electric field) and heat-accumulating materials (paraffin); optimization of process parameters and its management, as well as the improvement of dryer designs; the use of heat pumps and renewable energy sources (solar vacuum drying). The practical significance of the study lies in the possibility to trace the extent of studying resource conservation in vacuum drying of materials at the present stage of scientific knowledge. The conclusions presented in the article may be useful for other researchers who are interested in studying the directions of resource conservation and can identify relevant problems for them.

Keywords: energy saving, vacuum drying, plant materials.

Article info:

Received 24/06/2024, approved after reviewing 16/08/2024, accepted 03/09/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-32-38

Article in Russian

For citation:

Rumyantsev A. A. Directions for the development of energy saving at vacuum drying of plant materials. Journal of International Academy of Refrigeration. 2024. No 4. p. 32-38. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-32-38

Введение

Тепловая сушка является энергоемким процессом из-за неизбежных термодинамических ограничений, связанных с подводом энергии, достаточной для обеспечения скрытой теплоты парообразования (более 2500 кДж/кг) удаления влаги из материала [1].

Широкое распространение в технике и технологиях получила тепловая сушка материалов и сырья (зерно, овощи, солома, древесина, целлюлоза и т. п.). Затраты энергии на сушку в зависимости от отрасли промышленности достигают 10...25%, а в таких как целлюлозно-бумажная и текстильная промышленность — 35...50% [2]. Около 85 % всех промышленных тепловых сушилок, используемых в пищевой промышленности, являются традиционными, использующими 12–20 % от общего энергопотребления, что соответствует 30 % энергоэффективности и 90 % общих затрат на переработку [3].

Вакуумная сушка является эффективным методом удаления влаги из пористых материалов, в том числе растительного сырья. Благодаря снижению температуры сушки или продолжительности процесса можно улучшить качество высушенных материалов. Поэтому, вместе с кондуктивной или конвективной сушкой для растительных материалов предпочтительна вакуумная сушка. Растущий спрос на продукты и материалы из растительного сырья приводит к необходимости разработки энергоэффективных методов сушки. Снижение энергопотребления и повышение производительности вакуумной сушки в промышленных процессах становится все более актуальной задачей.

К энерго- и ресурсосбережению при сушке проявляется повышенный интерес как в России, так и за рубежом. Из-за разрозненной и противоречивой информации в публикациях имеется необходимость в систематизации, концентрации и обобщении этой информации.

Целью исследования является проведение аналитического обзора энергосберегающих направлений при вакуумной сушке пористых растительных материалов и сырья.

Основное внимание в обзоре будет уделено исследовательским вопросам рационального использования энергетических ресурсов и сокращению времени вакуумной сушки пористых растительных материалов и сырья, разрабатываемой и реализуемой в России и за рубежом с 2020 по 2024 гг.

Практическая значимость исследования заключается в возможности проследить масштабы изучения энергосбережения при вакуумной сушке материалов на современном этапе научного знания. Представленные в статье выводы могут быть полезны для других исследователей, которые заинтересованы в изучении направлений энергосбережения и могут определить актуальные для них проблемы.

Методика исследований

Выборка публикаций для анализа составила 41 шт. Библиографические источники, в которых осуществлялся поиск необходимых документов: открытые электронные базы данных eLibrary.ru, Scopus, и Web of Science. Период охвата публикаций составляет 5 лет (с 2020 по 2024 гг.). Основные ключевые слова и словосочетания, по которым производился поиск: «вакуумная сушка / vacuum drying», «вакуум / vacuum», «конвективная сушка / convective drying», «энергосбережение / energy saving», «тепловой насос / heat pump», «пористый материал / porous material», «сублимационная сушка / freeze drying», «энергоэффективность / energy efficiency», «вакуум-микроволновая / vacuum — microwave», «комбинированная сушка / hybrid drying».

Результаты и их обсуждение

Широкое распространение сушки, в том числе вакуумной, во многих отраслях промышленности и большие энергетические затраты на процесс концентрирует повышенное внимание мирового научного сообщества к энергосбережению при сушке. В настоящей статье представлен обзор научных работ, в которых рассмотрены способы энергосбережения и сокращения времени вакуумной сушки пористых растительных материалов и сырья.

Вакуумная сушка — это способ сушки материалов с высокой скоростью сушки, поскольку давление паров воздуха в материале ниже, чем при атмосферном воздухе (сушка при более низкой температуре). Для удаления водяного пара применяются вакуумные насосы. Сушка растительных материалов под вакуумом имеет преимущества по сравнению с обычной конвективной сушкой. Вакуумная сушка происходит практически без кислорода и при невысокой температуре, что сохраняет большую часть свойств растительного сырья [4, 5]. Однако, по сравнению с конвективной сушкой затраты на оборудование для вакуумной сушки относительно высоки, а производительность низкая [6]–[8]. Данные по удельному потреблению энергии на 1 кг испаренной влаги различными способами сушки, приведенные в исследовании [9], показали, что самые высокие и самые низкие показатели принадлежат вакуумному (318,42 МДж/кг) и микроволновому (4,32 МДж/кг) способам.

Важными проблемами при вакуумной сушке растительных материалов являются снижение потребления энергии для извлечения максимального количества влаги и сокращение времени процесса при сохранении качества продукции.

Обзор исследовательских работ позволяет отметить, что сокращение энергетических затрат и времени вакуумной сушки растительных материалов и сырья проводится по следующим направлениям (рис. 1).

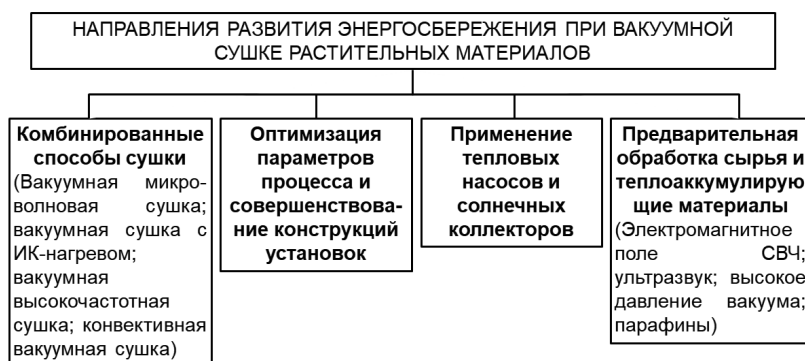


Рис. 1. Направления развития энергосбережения при вакуумной сушке растительных материалов

Fig. 1. Directions for the development of energy saving at vacuum drying of plant materials

Вакуумная микроволновая сушка и сублимационная сушка являются наиболее известными комбинированными процессами вакуумной сушки. С одной стороны, исследователи отмечают [5], что вакуумная микроволновая сушка является самой быстрой, а сублимационная сушка обеспечивает получение продукта высокого качества, с другой стороны, сублимационная сушка имеет высокое энергопотребление, связанное с поддержкой работы конденсаторов при очень низких температурах, и более длительное время обработки [10]–[12], в то время как вакуумная микроволновая сушка сопряжена с промежуточными затратами и обеспечивает продукт приемлемого качества [3].

Рассмотрим перечисленные научные проблемы подробнее. Представим обзор работ, в которых для экономного использования энергоресурсов и сокращения времени применяются комбинированные (перспективные, инновационные) способы и установки вакуумной сушки.

Вакуумная микроволновая сушка

Вакуумная микроволновая сушка обладает преимуществами микроволнового нагрева, поскольку волны, излучаемые системой, поглощаются молекулами воды, присутствующими в растительном сырье, которые генерируют тепло в материале при движении молекул воды. Условия вакуума обеспечивают эффективный процесс сушки, поскольку водяной пар концентрируется на поверхности, а низкое давление приводит к более низкой температуре кипения воды, что сохраняет органолептические свойства продуктов [13]. Повышается энергоэффективность процесса и качество продуктов [14].

Вакуумная микроволновая сушка сокращает время сушки на 70...90% по сравнению с сушкой горячим воздухом и сублимационной сушкой [9, 15]. Вакуумная микроволновая сушка обеспечивает экономию энергии по сравнению с другими методами сушки, такими как сублимационная сушка. Сушка на воздухе может быть дешевле, чем сушка в микроволновой печи, но она менее эффективна [13].

Одним из основных недостатков микроволновой сушки является неоднородность, присущая распределению электромагнитного поля внутри камеры сушки [16]. Неоднородность распределения электромагнитного поля создает проблемы неравномерного нагрева продукта

(увеличение диэлектрических потерь), что приводит к увеличению количества энергии, поглощаемой материалом [17]–[18]. Микроволновая сушка энергозатратна, что делает этот способ менее экономически выгодным по сравнению с другими методами [19]. Исследователи отмечают [10, 15], что проблемы микроволновой сушки заключаются в выборе потребляемой мощности для обеспечения баланса между качеством продукта и энергозатратами.

Вакуумная сушка с инфракрасным (ИК) нагревом

Группа ученых во главе с Лифенцевой Л. В. [6] приводят экспериментальные данные по сушке растительного сырья (моркови) в вакуумной камере с ИК-нагревом. Отмечено, что при выбранных критериях эффективности процесса (время и органолептические показатели сырья) требуемое качество сушки достигается при времени 30 мин, температуре 60 ° и давлении 8 кПа. Вакуумная сушка с ИК-нагревом имеет потенциал для повышения энергоэффективности (соотношения полезной мощности и затрат процесса преобразования энергии) и качество продуктов [20]. Преимуществами ИК-нагрева являются адаптируемость, простота оборудования, легкое сочетание с другими способами нагрева, такими как конвективный, вакуумный и микроволновый нагрев, недорогая и несложная установка и использование [8, 21–24]. Однако вакуумная сушка с ИК-нагревом пористых растительных материалов пока не нашла широкого промышленного распространения и все еще находится на этапе лабораторных или экспериментальных исследований.

Вакуумная высокочастотная сушка

Качанов А. Н., Коренков Д. А., Максимов В. В., Воркунов О. В. в работе [25] относят вакуумную высокочастотную сушку деревянных опор линий электропередач к перспективным технологиям. Общим недостатком традиционных способов сушки заготовок опор (атмосферный и камерный) является длительность процесса. Осуществляется неравномерный нагрев древесины по всему объему заготовки не только в периоде прогрева, но и в течение всей сушки, при этом градиент температуры направлен навстречу потоку влаги, что отрицательно влияет на скорость сушки и увеличивает энергозатраты.

В вакуумной высокочастотной сушке древесины осуществляется объемный способ подвода теплоты. Сушка происходит в герметичной камере с расположенными электродами. Заготовки размещают между электродами так, чтобы образовался рабочий конденсатор, к которому подводят напряжение высокой частоты. В камере создают пониженное давление. В результате воздействия токов высокой частоты (5,28 МГц) и вакуума (10 кПа) в заготовке образуются внутренние источники теплоты, под воздействием которых влага перемещается по порам и капиллярам к поверхности материала. Благодаря разряжению в камере испарение влаги происходит при более низкой температуре. Достоинствами вакуумной частотной сушки деревянных заготовок опор являются высокая скорость процесса и качество сушки при удельных энергозатратах, сопоставимых с традиционными способами. Широкое внедрение предлагаемого способа затруднено наличием нерешенных научно-технических проблем оптимизации процесса и обеспечения равномерности электромагнитного поля по сечению деревянных опор большой длины.

Конвективная вакуумная сушка

Рациональным путем снижения потребляемой энергии является более эффективное ее использование. Влиянию ступенчатой прерывистой вакуумной сушки посвящена работа группы авторов во главе с Ивановой Э. С. [26]. Ими проведено сравнение удельных расходов электроэнергии на 1 кг испаренной влаги при различных способах сушки плодовоовощного сырья (сублимационная — 1,6 кВт·ч/кг, конвективная — 2 кВт·ч/кг и двухступенчатая конвективная вакуум-импульсная — 1,6 кВт·ч/кг). Эксперименты показали, что при равных удельных расходах электроэнергии качество высушенного материала выше при вакуум-импульсной сушке. Повышения энергоэффективности сушки достигают комбинацией ступенчатой сушки и применения теплоаккумулирующих материалов [26, 27]. Для проведения сушки плодовоовощного сырья предложена конструкция конвективно-вакуум-импульсной сушильной установки с тепловыми аккумуляторами, в качестве теплоаккумулирующего материала используется парафин. Авторы заявляют о снижении энергетических затрат и повышении эффективности процесса сушки растительных материалов при использовании данной установки.

Проводилось экспериментальное исследование по конвективной вакуумно-импульсной сушке прессованного сена авторами работы [28]. Предложено проводить досушивание прессованного сена вакуумным воздействием с периодической принудительной вентиляцией в сушильной камере. Оценку затрат определяли с учетом установленной мощности оборудования и коэффициента ($k=0,5$) периодичности включения в работу нагревателя ТЭН от регулятора температуры нагрева. Приведенные расчетные общие затраты электроэнергии на сушку прессованного сена (рис. 2) при различных режимах сушки показали, что потребление электрической энергии конвективным вакуумно-импульсным способом сушки влажного материала в 1,4–1,7 раза ниже, чем при конвективной сушке. Обозначения, показанные на рис. 2: 1 — сушка в вакууме (давление $p=30\text{--}40$ кПа;

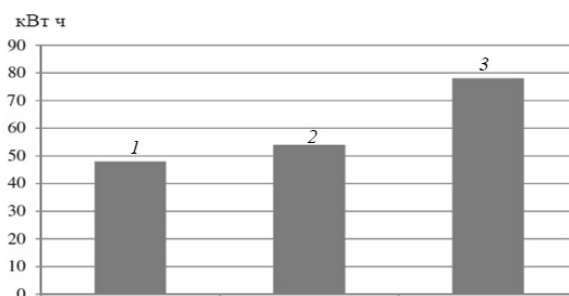


Рис. 2. Общие затраты электрической энергии при различных режимах сушки

Fig. 2. Total electrical energy consumption under different drying modes

температура $t=70$ °С; влажность конечная $w=7,4\%$; время сушки $\tau=11$ ч); 2 — сушка в вакууме (давление $p=30\text{--}40$ кПа; температура $t=60$ °С; влажность конечная $w=8,9\%$; время сушки $\tau=12$ ч); 3 — конвективная сушка (температура $t=50$ °С; влажность конечная $w=7,8\%$; время сушки $\tau=18$ ч).

Предварительная обработка растительных материалов

Llavata B., García-Pérez J. V., Simal S., Cárcel J. A. отмечают в своем исследовании [4], что предварительная обработка (высокое давление вакуума, ультразвук или режим пульсации в электромагнитном поле) растительных материалов способствует снижению потребления энергии, сокращению времени сушки и повышению качества продуктов. Проведены исследования сушки хлопковой целлюлозы [29, 30]. Установлено, что термо-вакуум-импульсное воздействие на материал интенсифицирует процесс тепло- и массообмена и сокращает время сушки в 2,5 раза.

Для снижения энергетических затрат и продолжительности обезвоживания предложено проводить подогрев высушиваемого материала за счет импульсного воздействия электромагнитного поля сверх высокой частоты, сушку материала до температуры продукта $30\text{--}40$ °С, при этом в начале сушки в вакуумной камере в течение 1–1,5 мин снижают давление до значений 10–15 мм рт. ст. [31].

Предварительная ультразвуковая обработка овощей интенсифицирует процесс их вакуумной сушки. Отмечается, что при сушке моркови с помощью ультразвука мощность ультразвука оказывает положительное влияние на процесс сушки, однако величина улучшения ультразвука во многом зависит от переменных процесса, таких как скорость воздуха, температура воздуха, мощность микроволнового излучения, давление вакуума [32].

Повышение давления вакуума в сушильной камере позволяет сократить время сушки. Установлено, что вакуумная сушка высокого давления вакуума при различных режимах процесса (температура сушки $50\text{--}65$ °С и вакуумное давление 0,1–0,4 бар) является перспективным методом получения высококачественных сушеных продуктов, однако увеличение температуры и давления сушки существенно снижают качество высушенных образцов [4, 9].

Оптимизация параметров процесса и совершенствование конструкций установок

Обзор исследовательских работ позволяет отметить, что в последнее время проблеме оптимизации процесса вакуумной сушки и ее управления исследователи и инженеры уделяют повышенное внимание [6, 9, 30]. Вариант решения этой проблемы предложен для технических комплексов с большим количеством участков, где продукт подвергается различным видам термической обработки и вакуумизации, что требует от системы управления точности, быстродействия и синхронизации скоростных и тепловых режимов на участках [33].

Suryanto S., Hamzah N., Taufik A. [34] доказали, что применение парового эжектора в конструкции вакуумной сушилки приводит к снижению энергозатрат на 10 % и повышению энергоэффективности на 11–12 % при режимных параметрах сушки зерен кофе и какао влажностью 28 до 35 %, температуре 50–60 °С и давлении вакуума 82–90 кПа.

Для повышения эффективности процесса сушки растительного сырья предложена конструкция вакуумной камеры (рис. 3) [35]. Обозначения, показанные на схеме рис. 3: 1 — корпус; 2 — герметичная крышка; 3 — теплообменник; 4 — транспортная система; 5 — дробилка исходного сырья; 6 — разравниватель исходного сырья; 7 — шнек выгрузки готовой продукции; 8 — теплоизоляционное покрытие; 9 — датчик давления; 10, 11, 12, 13, 14 — патрубки; 15 — кран.

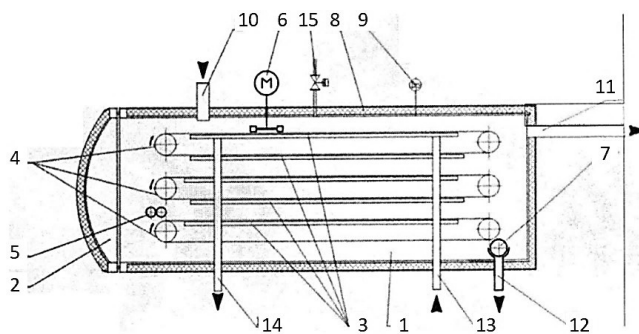


Рис. 3. Общий вид вакуумной камеры

Fig. 3. General view of the vacuum chamber

Особенностью данной конструкции является наличие разравнивателя и дробилки в вакуумной камере. Это позволяет создать равномерный слой исходного сырья по всей ширине транспортной системы вакуумной камеры, что интенсифицирует процесс испарения в исходном сырье.

Вакуумная сушка с тепловым насосом и солнечно-вакуумная сушка

Решению проблемы рационального использования энергии в процессе вакуумной сушки и поиску новых источников дешевой энергии посвящено большое количество научных работ [2, 20, 36, 37]. В настоящее время сушка с тепловым насосом все чаще используется в различных отраслях промышленности. Это объясняется низким энергопотреблением, меньшими потерями качества сырья и высокой энергоэффективностью сушки [38].

Tuncal C. и Doymaz İ. [39] отмечают, что удельный расход энергии на 1 кг испаренной влаги, в зависимости от типа сушилки, составляет 0,5...0,8 МДж/кг для вакуумной сушилки с тепловым насосом, 4,5...5,5 МДж/кг для пневматической сушилки (70...100 °С) и 8...16 МДж/кг для ленточной туннельной сушилки. Отмечено, что основным недостатком теплонасосной сушки является большая экспозиция процесса из-за ограниченной температуры сушильного агента, которая не превышает 50...60 °С, при этом высушиваемый материал изначально не нагревается выше температуры мокрого термометра 25...30 °С [40].

Группа ученых во главе Roratto T. B. [41] занимаются разработкой гибридной солнечно-вакуумной сушилки с солнечными коллекторами для нагрева воды и подаваемой из любого источника электрической энергией для кондуктивной сушки фруктов и овощей.

Анализ публикаций по вакуумной сушке с тепловым насосом и солнечно-вакуумной сушке показал [2, 20, 36, 37, 39, 41], что исследования пока находятся на стадии лабораторных экспериментов.

Заключение

Сокращение энергетических затрат и времени вакуумной сушки материалов обеспечивается применением комбинированных способов (вакуумная микроволновая сушка, вакуумная сушка с ИК-нагревом, вакуумная высокочастотная сушка, конвективная вакуумная сушка); использованием предварительной обработки сырья (высокое давление вакуума, ультразвук, режим пульсации в электрическом поле) и теплоаккумулирующих материалов (парафина); оптимизацией параметров процесса и его управления, а также совершенствованием конструкций сушилок; применением тепловых насосов и возобновляемых источников энергии (солнечно-вакуумная сушка).

Настоящий обзор не может считаться полным, поскольку не вмещает более ранний опыт исследователей, внесших большой вклад в изучение проблемы энергосбережения при вакуумной сушке пористых растительных материалов и сырья. Обзор дает возможность увидеть актуальные темы и проблемы, стоящие перед исследователями, и определить пути их решения.

Литература/References

1. Patel G. et al. Different parameters affecting the efficiency of dryers. *Drying Technology in Food Processing*. Woodhead Publishing. 2023. p. 705–742.
2. Рудобашта С. П. Современное состояние и направления развития теории и практики сушки. // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ — 2020: Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Академика А. В. Лыкова, Москва, 13–15 октября 2020 года. Москва: Мегapolis, 2020. С. 13–22. [Rudobashta S. P. Current state and directions of development of the theory and practice of drying / S. P. Rudobashta. Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal processes) SETT — 2020: Collection of scientific papers of the Seventh International Scientific and Practical Conference dedicated to 110-anniversary of the birth of Academician

- A. V. Lykova, Moscow, October 13–15, 2020. Moscow: Megapolis. 2020. p. 13–22. (in Russian)]
3. Menon A., Stojceska V., Tassou S. A. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 100. p. 67–76.
 4. Llavata B. et al. Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*. 2020. Vol. 35. p. 20–26.
 5. Orrego C. E., Salgado N., Sarmiento L. F. Freeze drying and vacuum drying. *Drying Technology in Food Processing*. 2023. p. 203–240
 6. Лифенцева Л. В. Оптимизация технологии вакуумной сушки сельскохозяйственного сырья растительного происхождения / Л. В. Лифенцева, А. Н. Расщепкин, Е. Н. Неверов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 2 (208). С. 82–89. [Lifentseva L. V. Optimization of technology for vacuum drying of agricultural raw materials of plant origin / L. V. Lifentseva, A. N. Rasshechepkin, E. N. Neverov [et al.]. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022. №. 2 (208). P. 82–89. (in Russian)]
 7. Acar C., Dincer I., Mujumdar A. A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future. *Drying Technology*. 2022. Vol. 40. No 6. p. 1029–1050.
 8. Huang D. et al. Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 110. p. 765–777.
 9. Chojnacka K. et al. Improvements in drying technologies-Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 320. p. 128706.
 10. Hii C. L. et al. Hybrid drying of food and bioproducts: A review. *Drying Technology*. 2021. Vol. 39. No 11. P. 1554–1576.
 11. Radojčin M. et al. Effect of selected drying methods and emerging drying intensification technologies on the quality of dried fruit: A review. *Processes*. 2021. Vol. 9. No 1. p. 132.
 12. Waghmare R. B. et al. Trends in approaches to assist freeze-drying of food: A cohort study on innovations. *Food Reviews International*. 2022. Vol. 38. no suppl. p. 552–573.
 13. González-Cavieses L. et al. Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 116. p. 626–638.
 14. Fathi F. et al. Emerging drying techniques for food safety and quality: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022. Vol. 21. No 2. p. 1125–1160.
 15. Bozkir H. Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices. *Journal of Food Process Engineering*. 2020. Vol. 43. No 10. p. e13485.
 16. Teleken J. T. et al. Mechanistic understanding of microwave-vacuum drying of non-deformable porous media. *Drying Technology*. 2021. Vol. 39. no. 7. p. 850–867.
 17. Principato L., Spigno G. Microwave heating in food processing. *Food Packaging and Preservation*. Academic Press. 2024. p. 299–329.
 18. Monteiro R. L. et al. Microwave vacuum drying of foods with temperature control by power modulation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 65. p. 102473.
 19. An N. et al. Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: An updated understanding. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. p. 1–16.
 20. Salehi F. Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: A review. *International Journal of Fruit Science*. 2021. Vol. 21. No 1. p. 546–555.
 21. Патент на полезную модель № 212283 U1 Российская Федерация, МПК F26B 15/06, F26B 5/04, F26B 3/30. А. А. Попов. Устройство инфракрасной вакуумной сушки: № 2022104112: заявл. 16.02.2022: опубл. 13.07.2022. [Utility Model Patent No. 212283 U1 Russian Federation, IPC F26B 15/06, F26B 5/04, F26B 3/30. A. A. Popov. Infrared vacuum drying device: No. 2022104112: application 02/16/2022: publ. 07/13/2022. (in Russian)]
 22. Delfiya D. S. A. et al. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*. 2022. Vol. 45. no 6. p. 13810.
 23. Ye L. et al. Analysis of energy and specific energy requirements in various drying process of mint leaves. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 26. p. 1113.
 24. Zhang W. P. et al. Design and performance evaluation of a pilot-scale pulsed vacuum infrared drying (PVID) system for drying of berries. *Drying technology*. 2020. no 10. p. 1340–1355.
 25. Качанов А. Н. Исследование возможности применения вакуумно-высокочастотной технологии для сушки деревянных опор / А. Н. Качанов, Д. А. Коренков, В. В. Максимов, О. В. Воркунов // Вестник ПИТТУ имени академика М. С. Осими. 2021. № 1 (18). С. 42–52. [Kachanov A. N. Study of the possibility of using vacuum-high-frequency technology for drying wooden poles / A. N. Kachanov, D. A. Korenikov, V. V. Maksimov, O. V. Vorkunov. *Bulletin of PITTU named after the academician M. S. Oshimi*. 2021. no 1 (18). p. 42–52. (in Russian)]
 26. Иванова Э. С. Инновационные конструкции и технологии сушки плодовоовощной продукции / Э. С. Иванова, Ю. В. Родионов, О. А. Зорина [и др.] // Наука в центральной России. 2021. № 1 (49). С. 43–53. [Ivanova E. S. Innovative designs and technologies for drying fruit and vegetable products / E. S. Ivanova, Yu. V. Rodionov, O. A. Zorina [et al.]. *Science in Central Russia*. 2021. no 1 (49). p. 43–53. (in Russian)]
 27. Патент № 2716056 C1 Российская Федерация, МПК F26B 17/10, F26B 5/04. Энергоэффективная конвективно-вакуум-импульсная сушильная установка с тепловыми аккумуляторами: № 2019106971: заявл. 13.03.2019: опубл. 06.03.2020 / А. С. Зорин, И. В. Иванова, Д. В. Никитин [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «ТГТУ». [Patent No. 2716056 C1 Russian Federation, IPC F26B 17/10, F26B 5/04. Energy-efficient convective vacuum pulse drying unit with thermal accumulators: No. 2019106971: application 13.03.2019: publ. 06.03.20 / A. S. Zorin, I. V. Ivanova, D. V. Nikitin [et al.]; the applicant of FGBOU VO «TSTU». (in Russian)]
 28. Никифоров В. Е. Анализ потребления энергии и работы оборудования вакуумно-импульсной сушки растительных материалов / В. Е. Никифоров, Л. А. Никитин // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2022. № 3 (17). С. 64–67. [Nikiforov V. E. Analysis of energy consumption and operation of equipment for vacuum-pulse drying of plant materials / V. E. Nikiforov, L. A. Nikitin. *Bulletin of the Vologda State University. Series: Technical Sciences*. 2022. no 3 (17). p. 64–67. (in Russian)]
 29. Бахтияров Л. И. Закономерности термо-вакуум-импульсной сушки капиллярно-пористых материалов / Л. И. Бахтияров, В. А. Петров, В. Ф. Мадякин, А. Б. Лившиц // Бутлеровские сообщения. 2021. Т. 67, № 9. С. 93–97.

- [Bakhtiarov L. I. Regularities of thermal vacuum-pulse drying of capillary-porous materials / L. I. Bakhtiarov, V. A. Petrov, V. F. Madyakin, A. B. Livshits. *Butlerov communications*. 2021. Vol. 67, no 9. p. 93–97. (in Russian)]
30. Федоров Ю. И. Определение оптимальных режимов термо-вакуум-импульсной сушки волокнистого материала на основе целлюлозы / Ю. И. Федоров, С. Ю. Федорова, В. Ф. Мадьякин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 4 (43). С. 16–19. [Fedorov Yu. I. Determination of optimal modes of thermal vacuum-pulse drying of cellulose-based fibrous material / Yu. I. Fedorov, S. Yu. Fedorova, V. F. Madyakin. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2022. no 4 (43). p. 16–19. (in Russian)]
 31. Патент № 2773934 C1 Российская Федерация, МПК A23L 3/01, A23L 3/40, F26B 3/347. Способ и устройство для низкотемпературной вакуумной сушки измельченных продуктов животного и растительного происхождения: № 2021124331: заявл. 17.08.2021: опублик. 14.06.2022 / Н. Э. Каухчешвили, А. А. Грызунов, С. С. Борзов, А. В. Строков; заявитель Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН. [Patent No. 2773934 C1 Russian Federation, IPC A23L 3/01, A23L 3/40, F26B 3/347. Method and device for low-temperature vacuum drying of crushed products of animal and vegetable origin: No. 2021124331: application 17.08.2021: publ. 14.06.2022 / N. E. Kauchcheshvili, A. A. Gryzunov, S. S. Borzov, A. V. Strokov; applicant V. M. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)]
 32. Huang D. et al. Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics sonochemistry*. 2020. Vol. 63. p. 104950.
 33. Патент на полезную модель № 205440 U1 Российская Федерация, МПК D01D 5/00. Устройство для управления энергосберегающими режимами термомеханической обработки волокнистых материалов в вакууме: № 2020139241: заявл. 30.11.2020: опублик. 14.07.2021 / А. Е. Поляков, М. С. Иванов, Е. М. Филимонова, Д. А. Городков; заявитель Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина. [Utility Model Patent No. 205440 U1 Russian Federation, IPC D01D 5/00. Device for controlling energy-saving modes of thermomechanical processing of fibrous materials in vacuum: No. 2020139241: application. 11/30/2020: publ. 07/14/2021 / A. E. Polyakov, M. S. Ivanov, E. M. Filimonova, D. A. Gorodkov; applicant Kosygin Russian State University. (in Russian)]
 34. Suryanto S., Hamzah N., Taufik A. The novel vacuum drying using the steam ejector. *Drying Technology*. 2021. Vol. 39. no 7. p. 905–911.
 35. Патент на полезную модель № 199951 U1 Российская Федерация, МПК F26B 17/04, F26B 5/04. Вакуумная камера устройства для сушки: № 2020113575: заявл. 06.04.2020: опублик. 29.09.2020 / А. Г. Краснов; заявитель ООО «Развитие деvelopeмента». [Utility Model Patent No. 199951 U1 Russian Federation, IPC F26B 17/04, F26B 5/04. Vacuum chamber of the drying device: No. 2020113575: application 04/06/2020: publ. 09/29/2020 / A. G. Krasnov; applicant LLC Razvitie Development. (in Russian)]
 36. Rudobashta S. P. On-farm heat pump — assisted fluidized bed dryer and its kinetics calculation / S. P. Rudobashta, G. A. Zueva. *Drying Technology*. 2020. Vol. 38, No. 1–2. P. 6–18.
 37. Athira V. A. et al. Advances in drying techniques for retention of antioxidants in agro produces. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. Vol. 63. no. 31. p. 10849–10865.
 38. Kumar M. A., Kumaresan G., Rajakarunakaran S. Experimental study of moisture removal rate in Moringa leaves under vacuum pressure in closed-loop heat pump dryer. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. p. 1205–1210.
 39. Tunckal C., Doymaz İ. Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 150. p. 918–923.
 40. Снежкин Ю. Ф. Комбинированная сушка термолабильных материалов / Ю. Ф. Снежкин, Н. А. Дабиза, М. Н. Уланов, Д. М. Чалаев // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ — 2020: Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Академика А. В. Лыкова, Москва, 13–15 октября 2020 г. Москва: Мегapolis, 2020. С. 226–231. [Snezhkin Yu. F. Combined drying of thermolabile materials / Yu. F. Snezhkin, N. A. Dabizha, M. N. Ulanov, D. M. Chalaev. Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal processes) SETT — 2020: Collection of scientific papers of the Seventh International Scientific and Practical Conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician A. V. Lykova, Moscow, October 13–15, 2020. Moscow: Megapolis. 2020. p. 226–231. (in Russian)]
 41. Roratto T. B. et al. An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables. *Lwt*. 2021. Vol. 140. p. 110777.

Сведения об авторе

Румянцев Александр Алексеевич

К. т. н., доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2, aarumyantsev1@gmail.com. ORCID: 0000-0002-5562-297X

Information about author

Rumyantsev Alexander A.

Ph. D., Associate Professor of the Department of Industrial Thermal Power Engineering, Tyumen Industrial University, Russia, 625000, Tyumen, st. Lunacharsky, 2, aarumyantsev1@gmail.com. ORCID: 0000-0002-5562-297X



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»