

Сергей Валерьевич Брагинец¹, Олег Николаевич Бахчевников^{2✉},

Дмитрий Алексеевич Кузьменко³

^{1,2,3}Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Ростовская область, Россия

¹sbraginet@mail.ru

²oleg-b@list.ru

³dima.kuzz132@gmail.com

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ И ВИХРЕВЫЕ СУШИЛКИ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Цель исследований – обобщение и анализ научной информации по процессам пневматической и вихревой сушки мелкодисперсного растительного сырья. В статье представлен обзор современных технологий пневматической и вихревой сушки для обезвоживания мелкодисперсного растительного сырья, применяемого в пищевой и комбикормовой промышленности. Обоснована актуальность разработки энергоэффективных методов сушки, способных сохранить питательные свойства компонентов растительного сырья, таких как протеины и витамины. Методика исследования включает систематический анализ научной литературы за 2005–2025 гг., найденной в библиографических базах данных по ключевым словам. Результаты анализа показали, что пневматические сушилки, принцип действия которых основан на транспортировке материала в потоке горячего газа, эффективны для обезвоживания мелкодисперсного сырья благодаря высокой скорости сушки и простоте конструкции. Эксперименты подтвердили эффективность пневматических сушилок для обезвоживания растительного сырья, выявив ключевые параметры их оптимизации, такие как длина трубы, скорость и температура газа. Вихревые сушилки, использующие закрученный поток газа и механическое воздействие ротора, превосходят пневматические по способности обрабатывать вязкие дисперсные материалы с высокой влажностью, обеспечивая интенсивный теплообмен и удаление связанной влаги. Их потенциал в кормопроизводстве обусловлен сохранением термочувствительных компонентов, хотя экспериментальных данных по сушке в них растительного сырья недостаточно. Математическое моделирование процессов сушки с использованием двухжидкостной теории, эйлеровой гранулярной теории и метода дискретных элементов позволяет оптимизировать конструкции пневматических и вихревых сушилок, но требует совершенствования методов его выполнения для учета всех параметров. Результаты обзора подтверждают, что пневматические и вихревые сушилки обладают значительным потенциалом для совершенствования технологий обезвоживания мелкодисперсного растительного сырья, обеспечивая повышение энергоэффективности сушки, улучшение качества готового продукта и снижение производственных затрат.

Ключевые слова: сушка, растительное сырье, мелкодисперсные материалы, пневматические сушилки, вихревые сушилки, теплообмен, обезвоживание, измельчение, диспергирование

Для цитирования: Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Кузьменко Д.А. Пневматические и вихревые сушилки для обезвоживания мелкодисперсного растительного сырья // Вестник КрасГАУ. 2025. № 8. С. 239–257. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-8-239-257.

Sergey Valerievich Braginet¹, Oleg Nikolaevich Bakhchevnikov^{2✉}, Dmitry Alekseevich Kuzmenko³

^{1,2,3}Agrarian Scientific Center Donskoy, Zernograd, Rostov Region, Russia

¹sbraginet@mail.ru

²oleg-b@list.ru

³dima.kuzz132@gmail.com

PNEUMATIC AND VORTEX DRYERS TO DEHYDRATE FINE-DISPERSED PLANT RAW MATERIALS

The aim of research is to summarize and analyze scientific information on the processes of pneumatic and vortex drying of finely dispersed plant materials. The paper presents an overview of modern technologies of pneumatic and vortex drying for dehydration of finely dispersed plant materials used in the food and feed industries. The relevance of developing energy-efficient drying methods that can preserve the nutritional properties of plant material components, such as proteins and vitamins, is substantiated. The research methodology includes a systematic analysis of the scientific literature for 2005–2025 found in bibliographic databases by keywords. The results of the analysis showed that pneumatic dryers, the operating principle of which is based on transporting material in a hot gas stream, are effective for dehydration of finely dispersed raw materials due to the high drying rate and simplicity of design. Experiments confirmed the effectiveness of pneumatic dryers for dehydration of plant materials, identifying key parameters for their optimization, such as pipe length, gas velocity and temperature. Vortex dryers, using a swirling gas flow and mechanical action of the rotor, are superior to pneumatic dryers in their ability to process viscous dispersed materials with high humidity, providing intensive heat exchange and removal of bound moisture. Their potential in feed production is due to the preservation of heat-sensitive components, although experimental data on drying plant materials in them are insufficient. Mathematical modeling of drying processes using two-fluid theory, Euler granular theory and the discrete element method allows optimizing the design of pneumatic and vortex dryers, but requires improving the methods of its implementation to take into account all parameters. The results of the review confirm that pneumatic and vortex dryers have significant potential for improving the dehydration technologies of finely dispersed plant materials, providing increased energy efficiency of drying, improved quality of the finished product and reduced production costs.

Keywords: drying, plant raw materials, fine-dispersed materials, pneumatic dryers, vortex dryers, heat exchange, dehydration, grinding, dispersion

For citation: Braginets SV, Bakhchevnikov ON, Kuzmenko DA. Pneumatic and vortex dryers to dehydrate fine-dispersed plant raw materials. *Bulletin of KSAU*. 2025;(8):239-257. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-8-239-257.

Введение. Различные сушильные установки уже много лет применяются в промышленности и сельском хозяйстве. Они используют хорошо зарекомендовавшие себя способы сушки, подходящие для большинства материалов, в т. ч. растительного сырья, используемого в кормопроизводстве и пищевой промышленности. Но не все эти технологии сушки являются оптимальными с точки зрения энергопотребления, качества высушенного продукта, надежности эксплуатации, возможности управления процессом, экологической безопасности [1]. Большинство применяемых технологий сушки были первоначально разработаны эмпирическим путем производителями сушильного оборудования без должного научного обоснования, причем в то время энергетические и экологические требования еще не были такими жесткими, как в настоящий момент [2]. В настоящее время традиционные технологии сушки достигли предела своего развития, а попытки преодолеть эти ограничения посредством создания многоэтапных или комбинированных сушилок приводят к значительному увеличению энергоемкости и себестоимости процесса сушки [3, 4].

Новые технологии сушки влажных материалов направлены на интенсификацию сушки сырья и увеличение ее скорости [1, 5]. Более высокая скорость сушки приводит к уменьшению физических размеров сушилки, а также капитальных и эксплуатационных затрат [1, 6].

Увеличение скорости сушки и сокращение ее продолжительности особенно эффективно при обезвоживании мелкодисперсного растительного сырья в пищевой и комбикормовой промышленности, так как позволяет максимально сохранить содержащиеся в нем протеин и витамины [3, 7]. По мнению большинства ученых, для ускорения сушки влажного растительного сырья наиболее подходят способы, основанные на использовании конвективного теплообмена [8, 9].

Повышение скорости внешнего конвективного тепло- и массообмена за счет увеличения скорости и температуры газа приводит к увеличению скорости сушки в конвективной сушилке [2, 4]. При этом перемещение в процессе сушки не только газа-теплоносителя, но и частиц высушиваемого материала увеличивает скорость его обезвоживания [1, 4]. Это объясняется происходящим при этом увеличением площади

межфазных областей эффективного тепло- и массообмена [5]. Такие области образуются, в частности, при столкновении противоположных потоков газа и частиц материала в условиях высокой турбулентности [1, 9]. Если материал диспергирован, то поле турбулентности стремится деагломерировать комки влажного сырья и увеличить межфазную область сушки [1, 8]. Скорость обезвоживания еще больше увеличивается за счет того, что скорости тепло- и массопереноса почти обратно пропорциональны размеру частиц [1, 4]. Таким образом, использование механических диспергаторов в конвективных сушилках может ускорить процесс сушки.

Перечисленные выше эффективные приемы интенсификации конвективной сушки сырья используются в пневматических (трубы-сушилки) и вихревых сушилках [10–12]. В англоязычной литературе они получили названия «pneumatic flash dryer» и «spin flash dryer» [13]. Слово «flash» (вспышка) обозначает кратковременность процесса сушки в этих устройствах, характеризующегося быстрым испарением поверхностной влаги за очень короткий промежуток времени.

В пневматических сушилках частицы предварительно измельченного материала высушиваются при транспортировке по вертикальной трубе в потоке горячего газа [10, 12]. Вихревая сушка представляет собой усовершенствованную версию пневматической сушки [13, 14]. Интенсификация сушки достигается в вихревых сушилках созданием в сушильной камере закрученного потока газа-теплоносителя и дополнительного измельчения и диспергирования материала ротором, что позволяет удалять из него и связанную влагу [11].

Опубликованные научные данные позволяют предположить, что технологии пневматической и вихревой сушки могут эффективно применяться для обезвоживания различного мелкодисперсного растительного сырья, включая корма для животных и рыб и пищевые продукты, обеспечивая сохранение их питательных свойств и структуры.

Все вышеизложенное определило необходимость выполнения обзора и анализа научных публикаций, посвященных изучению процессов пневматической и вихревой сушки мелкодисперсных влажных растительных материалов и оптимизации конструкции реализующих их устройств.

Цель исследования – обобщение и анализ научной информации по процессам пневмати-

ческой и вихревой сушки мелкодисперсного растительного сырья.

Задачи: определить основные достоинства и недостатки пневматических и вихревых сушилок для обезвоживания растительного сырья; выявить перспективные научные результаты в областях совершенствования конструкции пневматических и вихревых сушилок, оптимизации параметров процесса сушки и его математического моделирования.

Объекты и методы. Объектом исследования являлся процесс пневматической и вихревой сушки мелкодисперсных растительных материалов.

Работа над настоящим обзорным исследованием включала в себя несколько ключевых этапов, начиная с поиска и отбора релевантной научной литературы, систематизации извлеченных из нее данных и заканчивая обобщением полученной информации и анализом выявленных закономерностей [15]. Процесс отбора и анализа научных публикаций базировался на методологии, предложенной M.D. Peters et al. [16] и W. Mengist et al. [17], обеспечивающей максимальную полноту и систематичность обзора.

Поиск литературы осуществили в авторитетных научных библиографических базах данных, а именно eLIBRARY, Google Scholar, Springer Link, MDPI, Wiley Online Library и ScienceDirect. Поиск публикаций выполнили по отобранным ключевым словам и их комбинациям на русском и английском языках. Особое внимание уделяли таким типам научных публикаций, как исследовательские статьи (Article) и обзорные статьи (Review), а также главы из коллективных монографий (Chapter).

Были изучены научные статьи, посвященные изучению процессов пневматической и вихревой сушки мелкодисперсных влажных растительных материалов и оптимизации конструкции реализующих их устройств.

Критерии отбора публикаций включали в себя не только соответствие тематике исследования, но и их научную значимость. Приоритет был отдан статьям, получившим наибольшее количество цитирований в других научных публикациях. Исключение составили недавно опубликованные статьи, чья цитируемость в силу объективных причин не могла быть высокой. Для расширения охвата исследования дополнительно проанализировали списки литературы в уже отобранных статьях. Это позволило допол-

нительно выявить релевантные источники, которые были пропущены на этапе первоначального поиска.

Временные рамки рассматриваемых в обзоре публикаций были ограничены периодом с 2005 по 2025 г. Вместе с тем в обзор были включены и более ранние работы в тех случаях, когда современные исследования по конкретным аспектам темы отсутствовали или были недостаточно информативными.

Таким образом, многоэтапный подход к поиску, отбору и анализу научной литературы позволил сформировать комплексное представле-

ние о современном состоянии исследуемой проблемы, выявить ключевые тенденции и направления развития в данной области науки.

Результаты и их обсуждение

Конструкция пневматических сушилок. Основными компонентами типичной пневматической сушилки являются: нагреватель для газа (воздуха) и вентилятор для его нагнетания в сушилку, питатель для подачи влажного материала, сушильный канал (вертикальная труба), где происходит основное удаление влаги, сепаратор, вытяжной вентилятор и система сбора высушенного продукта (рис. 1).

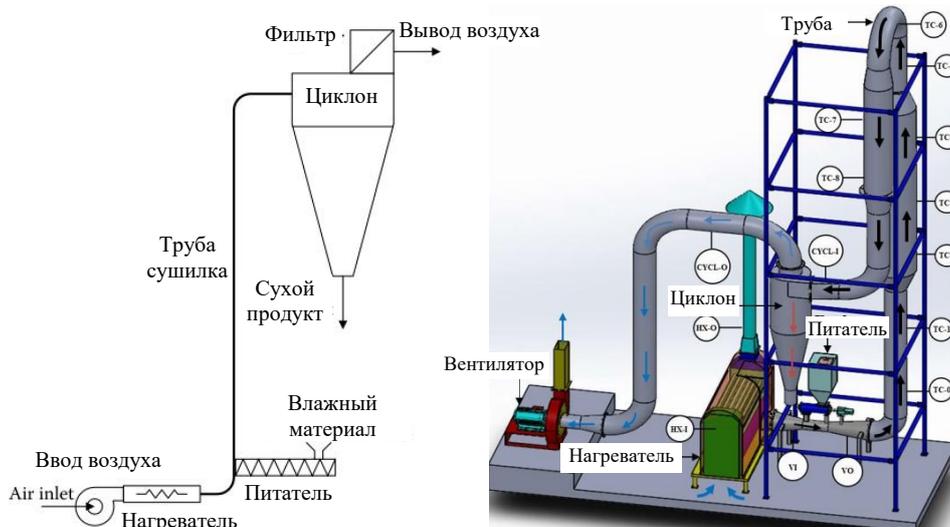


Рис. 1. Типичная конструкция пневматической сушилки (Borde I., Levy A. [12], Ngowi E. et al. [18])
Typical design of a pneumatic flash dryer (Borde I., Levy A. [12], Ngowi E. et al. [18])

Технология пневматической сушки основана на принципе быстрого испарения влаги с поверхности частиц мелкодисперсного материала при их транспортировании в потоке горячего газа. Ключевыми преимуществами пневматических сушилок являются краткое время контакта материала с теплоносителем (менее трех секунд), что делает его подходящим для термочувствительных видов сырья, и высокая энергоэффективность [12, 13].

Условием эффективности работы пневматических сушилок является то, что скорость движения газа-теплоносителя должна быть выше скорости свободного падения частиц материала [11]. Пневматическая сушка эффективно выполняется при скорости движения газа, несущественно превышающей скорость витания частиц материала, при этом сушка тем экономичнее, чем меньше размер частиц и чем более они содержат свободной влаги [12, 19]. С увеличением

диаметра частиц производительность пневматической сушилки снижается, поэтому использовать ее для сушки сырья с частицами крупного размера, такого как цельное зерно, нецелесообразно [20, 21].

Высокая скорость испарения влаги в пневматических сушилках обуславливает низкую температуру высушиваемого материала, что способствует сохранности питательных веществ в растительном сырье [22].

Важнейшим элементом пневматических сушилок является сушильный канал, представляющий собой трубопровод, по которому происходит совместное движение материала и газа-теплоносителя, в ходе которого они взаимодействуют. Конструкция канала может варьироваться от простой прямой трубы до более сложных конфигураций, включая U-образные изгибы трубы или кольцевые системы [11, 23]. Длину и диаметр сушильного канала определяют на ос-

нове требуемого времени пребывания материала в сушилке и объемного расхода газа-теплоносителя [10, 14].

С целью оптимизации процесса сушки в конструкции пневматических сушилок вносят различные изменения. Так как в такой сушилке происходит быстрое уменьшение интенсивности сушки при движении материала вдоль трубы, то в ее конструкцию может быть включена дополнительная внутренняя труба, по которой движется горячий теплоноситель, либо наружные нагревательные элементы для увеличения температуры стенок трубы [11, 13]. Чтобы увеличить продолжительность сушки трудновысушиваемых материалов, используют двухступенчатые пневматические сушилки с рециркуляцией материала [12].

Труба пневматической сушилки может образовывать замкнутый контур (кольцевые сушилки). В этих сушилках мелкодисперсный материал рециркулирует до тех пор, пока не будет высушен до заданной влажности, причем время его пребывания в сушилке варьируется в зависимости от размера частиц [10]. Это обеспечивает более длительное время пребывания в сушилке для крупных частиц, что способствует их более полному высыханию, при этом они при вращении по кольцу могут частично измельчаться под действием центробежных сил [13].

Таким образом, пневматические сушилки достаточно эффективны, просты в управлении и компактны, позволяют сочетать сушку и транспортировку мелкодисперсного растительного сы-

рья, благодаря кратковременности процесса в них можно сушить термолабильные материалы. Их недостатком является возможность сушки только мелкоизмельченного сырья, а также то, что не все частицы материала имеют одинаковую продолжительность пребывания в сушилке.

Экспериментальные исследования пневматических сушилок. Экспериментальные исследования играют ключевую роль в понимании процессов пневматической сушки и разработке более эффективных сушильных установок. Они позволили подтвердить теоретические модели, определить оптимальные параметры процесса и исследовать поведение конкретных мелкодисперсных растительных материалов в условиях высокоскоростной пневматической сушки.

Основной объем экспериментальных исследований пневматической сушки растительных материалов в последнее время приходится на африканские страны. Причиной этого является то, что одним из основных продуктов питания для африканцев является мука из маниока (кассава), которую производят из его высушенных клубней, для чего и применяют пневматические сушилки.

Значительная часть этих исследований выполнена под руководством А. Charuis и М. Precorre. Ими были разработаны конструкция и подробные спецификации для строительства пневматической сушилки для маниоки, на которой были выполнены эксперименты, включая определение лучшей геометрии трубы и рациональных параметров процесса (рис. 2) [22, 24, 25].

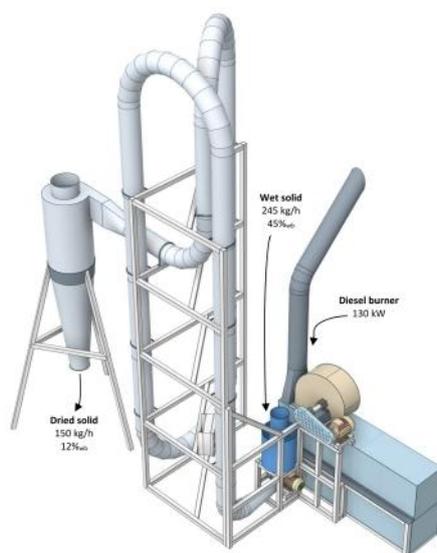


Рис. 2. Пневматическая сушилка для маниока (М. Precorre [24])
Pneumatic flash dryer for cassava (M. Precorre [24])

В результате экспериментов было установлено, что энергетические характеристики пневматических сушилок могут быть улучшены за счет снижения массового расхода воздуха. Энергетические характеристики сушилок также могут быть улучшены за счет использования более длинных сушильных каналов для увеличения времени пребывания в них сырья и, таким образом, достижения термодинамического равновесия при более низкой температуре воздуха [26]. Было установлено, что время нахождения частицы материала в сушилке, которое в основном определяется длиной трубы и скоростью воздуха, является наиболее значимым фактором сушки и должно быть максимальным [27]. Использование сушильных труб длиной более

25 м позволяет сушить крахмал из маниоки при ограниченном массовом расходе воздуха (т. е. низком коэффициенте разбавления), что имеет решающее значение для обеспечения хорошей энергоэффективности и поддержания низкой температуры продукта, сохраняющей его качество. Температура воздуха в сушилке должна быть установлена на максимум, ограниченный условием сохранения качества продукта [27].

М. Пресорре на основе экспериментальных данных и теоретических моделей были выполнены компьютерные симуляции изменения параметров процесса сушки мелкодисперсного материала (измельченный маниок) в зависимости от положения частицы в трубе сушилки, важные для понимания процесса (рис. 3) [25].

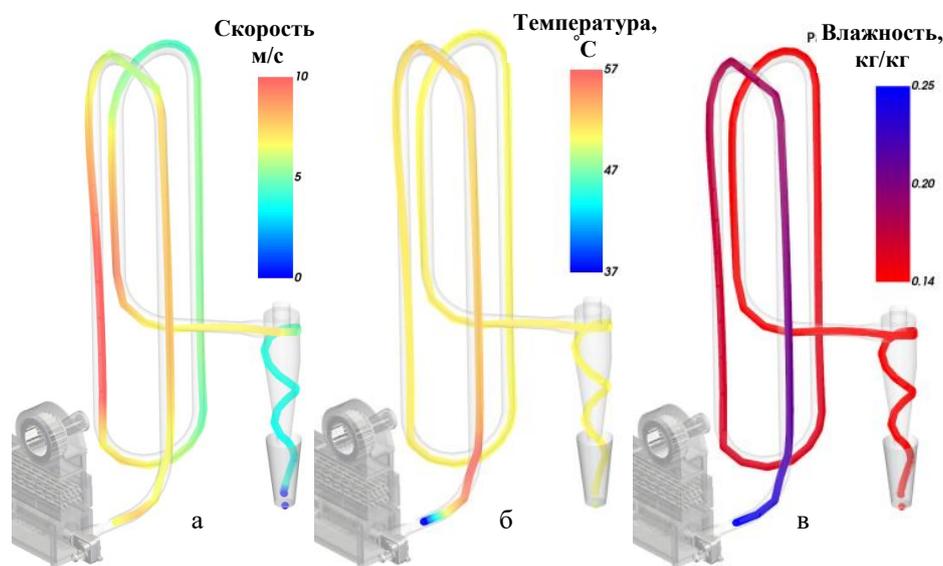


Рис. 3. Компьютерные симуляции изменения параметров процесса сушки в зависимости от положения частицы материала в трубе пневматической сушилки (М. Пресорре [25]):

а – скорость частиц материала; б – температура частиц; в – влажность частиц
 Computer simulations of changes in drying process parameters depending on the position of the material particle in the tube of the pneumatic flash dryer (M. Precoppe [25]):
 а – material particle velocity; б – particle temperature, в – particle moisture content

Проведенные позже А. Шарпис и М. Пресорре эксперименты на пневматической сушилке подтвердили результаты моделирования и симуляции поведения частиц растительного материала при сушке [28].

Опубликованы многочисленные результаты экспериментов, исследующие частные вопросы пневматической сушки растительного сырья. Например, результаты экспериментов по сушке измельченного маниока, выполненные под руководством S.A. Adegbite, показали, что наиболее эффективной являлась модель сушилки с

одним циклоном [29]. Он установил, что пневматическая сушка позволяет снизить начальное содержание влаги в маниоке с 47,1 до 9,6 % [30]. E. Ngowi et al. сообщают, что при температуре воздуха на входе сушилки 150 °С и скорости нагретого воздуха 12 м/с влажные кукурузные отруби были высушены с 37 до 10 % [18]. H. Zhang et al. установили, что снижение расхода газа-теплоносителя при пневматической сушке измельченных стеблей растений повышает эффективность сушки [31].

Результаты экспериментов показали, что пневматические сушилки способны снизить влажность материала с 40–50 до 10 %. Таким образом, пневматические сушилки с успехом могут применяться в перерабатывающей промышленности для сушки мелкодисперсных растительных материалов, например муки и крахмала.

М. Hidayat установил, что скорость сушки в пневматической сушилке уменьшается вдоль осевого направления трубы из-за уменьшения движущей силы [23]. Скорость сушки показывает незначительное уменьшение в U-образном изгибе трубы и сразу после него, что обусловлено в основном значительным накоплением частиц материала у внешней стенки U-образного изгиба. После U-образного изгиба трубы частицы рассеиваются и скорости проскальзывания высоки, что вызывает небольшое увеличение скорости сушки.

К сожалению, научных статей на русском языке по исследуемой теме очень мало. Можно отметить лишь работы А.А. Селиверстова с соавт., посвященные решению проблемы налипания материала (хлорида калия) на внутренней поверхности трубы-сушилки, которая решается организацией движения потоков в су-

шилке и полностью исключает возможность контакта частиц материала с внутренней стенкой трубы на начальном ее участке [20, 32]. Этой же теме посвящена статья Е.Н. Тимашевой [19].

Экспериментальные исследования пневматической сушки мелкодисперсного сырья предоставили ценные данные для оптимизации этого процесса. Они охватывают широкий спектр параметров и материалов, что делает их важными для промышленного применения.

Вихревые сушилки. Недостатки пневматических сушилок позволяют преодолеть использование вихревых сушилок (spin flash dryers). Основной принцип вихревой сушки заключается в одновременном воздействии горячего газа и механического движения рабочих органов на обрабатываемый материал, что в совокупности обеспечивает высокую эффективность сушки и качество конечного продукта [10].

Отличием вихревых сушилок от пневматических является использование не прямого, а закрученного потока газа-теплоносителя, что позволяет в несколько раз увеличить скорость движения частиц мелкодисперсного материала и газа и повысить концентрацию материала в сушилке [11, 12] (рис. 4).

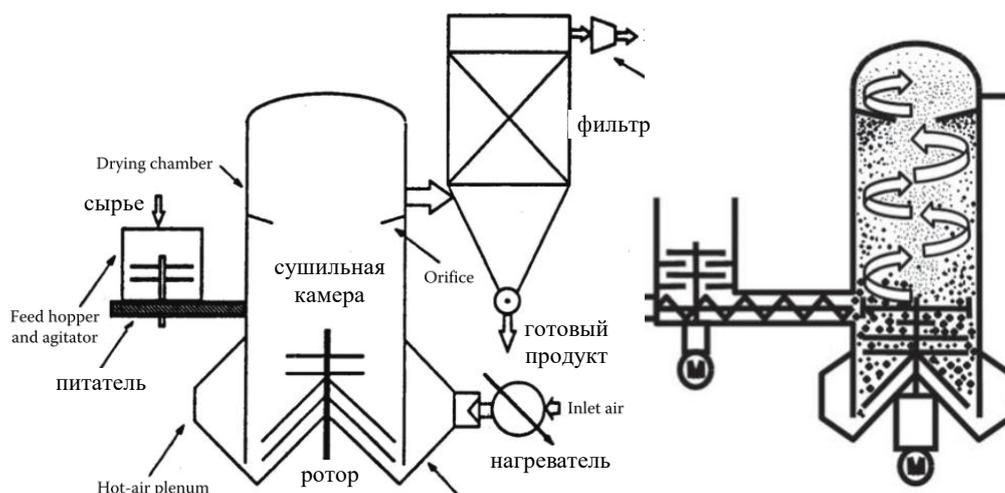


Рис. 4. Схема конструкции и принцип работы вихревой сушилки (Borde I., Levy A. [12], Gursch J. et al. [33])
 Construction scheme and principle of operation of a spin flash dryer (Borde I., Levy A. [12], Gursch J. et al. [33])

В сушильную камеру вихревой сушилки через тангенциальный ввод подается нагретый газ, а через питатель – влажное измельченное сырье. В нижней части сушильной камеры с коническим дном влажный материал подвергается воздействию высокоскоростного вращающегося

аксиального ротора, который разбивает материал на мелкие частицы и создает интенсивную турбулентность [13]. Под воздействием вращающегося ротора в сушильной камере формируется сильный вихревой поток. Этот поток образуется в результате комбинированного дейст-

вия механического перемешивания и тангенциально направленного потока горячего воздуха, поступающего в нижнюю часть сушильной камеры [10, 34]. Благодаря этому влажный материал подвергается многофакторному воздействию – ударным нагрузкам, трению и сдвиговым силам, что приводит к его эффективному измельчению и диспергированию. Быстрое вращение создает условия, при которых каждая частица материала равномерно контактирует с потоком сушильного агента. Горячий воздух вступает во взаимодействие с диспергированным материалом, обеспечивая мгновенное испарение влаги. Благодаря высокой относительной скорости между твердой и газовой фазами достигается интенсивный теплообмен, что яв-

ляется ключевым фактором высокой эффективности процесса [12, 33].

Частицы материала с меньшим содержанием влаги и меньшим размером поднимаются вверх вращающимся воздушным потоком, продолжая процесс сушки. В верхней части сушильной камеры расположен классификатор, через который проходят взвешенные мелкие частицы, в то время как более крупные частицы остаются в воздушном потоке для дальнейшей сушки и измельчения [12, 13]. Эта особенность вихревой сушки обеспечивает классификацию материала, что способствует получению продукта с более однородными характеристиками (рис. 5) [13, 14, 35]. Система сбора готового продукта вихревой сушилки включает в себя рукавный фильтр.

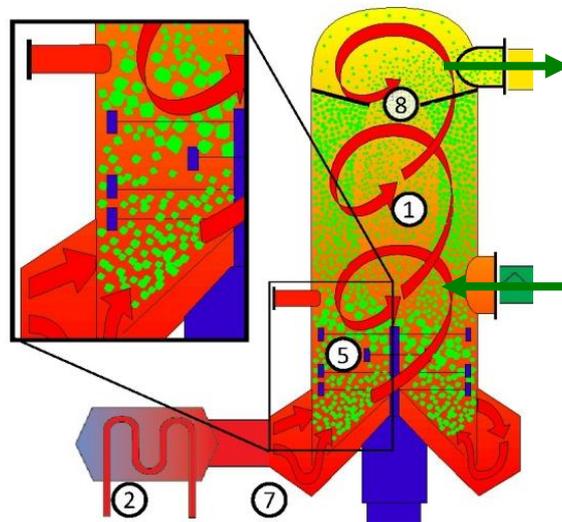


Рис. 5. Процесс сушки диспергированного материала в вихревой сушилке (J.D. Redlinger-Pohn [35])
Drying process of dispersed material in a spin flesh dryer (J.D. Redlinger-Pohn [35])

Средняя продолжительность нахождения частиц материала в вихревой сушилке больше, чем в пневматической сушилке. Этот фактор в сочетании с высокой интенсивностью процесса вихревой сушки позволяет обезвоживать материалы со значительным количеством связанной влаги, что характерно для растительного сырья [10, 34].

Сушильная камера является центральным элементом сушилки и может быть разделена на несколько функциональных зон. Она делится на четыре зоны снизу вверх: зона перемешивания и вихревой сушки, зона вращающейся псевдооживленной сушки, зона воздушного потока и зона классификации [13, 14, 35]. В зоне перемешивания и вихревой сушки, расположенной в нижней части камеры, происходит испарение 60–80 % содержащейся в материале влаги.

Одним из главных преимуществ механического воздействия в вихревой сушилке является интенсивное диспергирование влажного материала. Вращающийся аксиальный ротор разбивает влажное сырье на мелкие частицы, что приводит к значительному увеличению площади поверхности, доступной для контакта с горячим газом [13, 35]. Этот процесс играет решающую роль в повышении скорости испарения влаги, поскольку скорость сушки прямо пропорциональна площади контакта между материалом и сушильным агентом [14]. Действующие на материал элементы ротора могут иметь различную форму.

Механизм диспергирования особенно важен при обработке мелкодисперсных материалов с высокой вязкостью. Без эффективного механического воздействия такие материалы трудно

поддаются сушке традиционными методами из-за их склонности к образованию комков и агломератов [14, 34]. Вращающийся ротор разрушает эти агломераты, обеспечивая доступ горячего воздуха ко всей массе обрабатываемого материала. Непрерывное механическое перемешивание предотвращает комкование, обеспечивая непрерывное разделение частиц и поддержание их во взвешенном состоянии.

Благодаря короткому времени пребывания материала в зоне высоких температур, обеспечиваемому воздушным потоком, создаваемым ротором, предотвращаются прилипание материала к стенкам сушильной камеры и деградация термочувствительных материалов [35]. Это особенно важно при сушке растительного сырья с высоким содержанием липких веществ, таких как сахара и белки, которые склонны к прилипанию к поверхностям при нагревании.

Одним из наиболее важных механизмов повышения эффективности сушки за счет механического движения является создание интенсивной турбулентности в сушильной камере. Быстрое вращение ротора создает турбулентные потоки, которые значительно увеличивают коэффициенты тепло- и массопереноса между частицами материала и окружающим их горячим воздухом [13].

В условиях турбулентного потока слой неподвижного воздуха, окружающий каждую частицу, становится тоньше, что снижает сопротивление переносу тепла и массы [10, 13]. Это приводит к более интенсивному нагреву частиц и испарению влаги. Турбулентность также способствует непрерывному обновлению контактной поверхности между частицами и воздухом, что предотвращает локальное насыщение воздуха влагой и поддерживает высокую движущую силу процесса массопереноса [11, 13].

Механическое воздействие в вихревой сушилке приводит не только к диспергированию материала, но и к структурным изменениям в нем [13, 35]. Под действием ударных, фрикционных и сдвиговых сил происходит разрушение первоначальной структуры частиц материала, что облегчает высвобождение влаги из их внутренних областей. Для материалов с высоким содержанием связанной влаги механическое воздействие может быть ключевым фактором, определяющим скорость сушки [12, 35]. Механические силы способны разрушать клеточные стенки, капилляры и другие структуры расти-

тельного сырья, в которых удерживается влага, делая ее более доступной для испарения. Это особенно важно на финальных стадиях сушки, когда удаление остаточной влаги становится наиболее энергозатратным процессом.

Скорость вращения ротора является критическим параметром, влияющим на эффективность процесса вихревой сушки [10]. Высокая скорость вращения обеспечивает более интенсивное диспергирование и турбулентность, что способствует повышению скорости сушки. Но чрезмерно высокая скорость приводит к перегреву материала из-за механического трения и избыточному измельчению частиц, поэтому ее необходимо регулировать в диапазоне 200–500 об/мин. Интенсивность механического перемешивания должна соответствовать температуре и расходу горячего воздуха, обеспечивая эффективное использование тепловой энергии и предотвращая локальный перегрев материала [11].

Одним из ключевых параметров вихревой сушки является рабочая температура газа, которая обычно находится в диапазоне от 120 до 220 °С. Правильный выбор температурного режима имеет решающее значение для обеспечения эффективности процесса сушки и сохранения качества конечного продукта.

Таким образом, достоинством вихревых сушилок является различная продолжительность пребывания частиц материала в сушильной камере в зависимости от их размера и их измельчение и диспергирование ротором в процессе сушки. Данная конструкция позволяет сушить растительные материалы с высокой влажностью и вязкостью, предотвращая их комкование и налипание на поверхности сушильной камеры и рабочих органов. Интенсивная низкотемпературная сушка позволяет удалить не только поверхностную влагу, но и часть связанной влаги, обеспечивая при этом сохранение термолабильных питательных веществ.

Возможное применение вихревых сушилок. Вихревые сушилки могут эффективно обрабатывать мелкодисперсные материалы с широким диапазоном влажности (20–80 %), что делает их универсальным решением для различных производственных задач. Синергетический эффект механического и теплового воздействия особенно важен при обработке термочувствительных материалов, в т. ч. растительных. Благодаря интенсификации процесса тепло- и массообмена сушка таких материалов может осу-

ществляться при более низких температурах или в течение более короткого времени, что минимизирует риск термического повреждения питательных веществ.

Нами не было найдено информации об использовании вихревых сушилок в кормопроизводстве и пищевой промышленности. Но анализ приведенных выше сведений показал, что вихревые сушилки могут найти широкое применение в производстве кормов для животных и продуктов питания благодаря своей способности быстро и эффективно обрабатывать различные виды растительного сырья с сохранением его питательной ценности. Они позволяют эффективно обрабатывать различные виды растительного сырья, включая экстракты и белковые компоненты. Благодаря быстрой сушке при относительно низких температурах, достигаемой за счет интенсивного механического воздействия, минимизируется деградация термочувствительных компонентов, таких как протеины, витамины и ферменты. Сохранение протеина в процессе термической обработки кормов является одной из ключевых проблем в производстве кормов и продуктов питания. Традиционные методы сушки часто приводят к денатурации растительного белка из-за длительного воздействия высоких температур, что снижает

его биологическую ценность и усвояемость. Вихревая сушка, благодаря интенсивному механическому воздействию, обеспечивает быстрое удаление влаги из сырья при более низких температурах, что способствует лучшему сохранению структуры белка и его питательных свойств.

Экспериментальные исследования вихревых сушилок. В отличие от пневматических сушилок экспериментальным исследованиям вихревой сушки посвящено небольшое число научных работ. К сожалению, среди них нет публикаций, в которых объектом исследования является растительное сырье.

Наиболее интересной является статья Y. Yuan et al., посвященная моделированию вихревой сушки методом вычислительной гидродинамики (CFD) и его подтверждению экспериментами с порошком карбоната кальция [34]. Анализировались распределение скорости, температуры и давления в сушильной камере, и экспериментальные результаты оказались в основном согласованы с результатами моделирования. Y. Yuan установил, что в процессе вихревой сушки скорость частиц материала, температура и давление у стенок сушильной камеры выше, чем в центральной области, и уменьшаются с высотой (рис. 6).

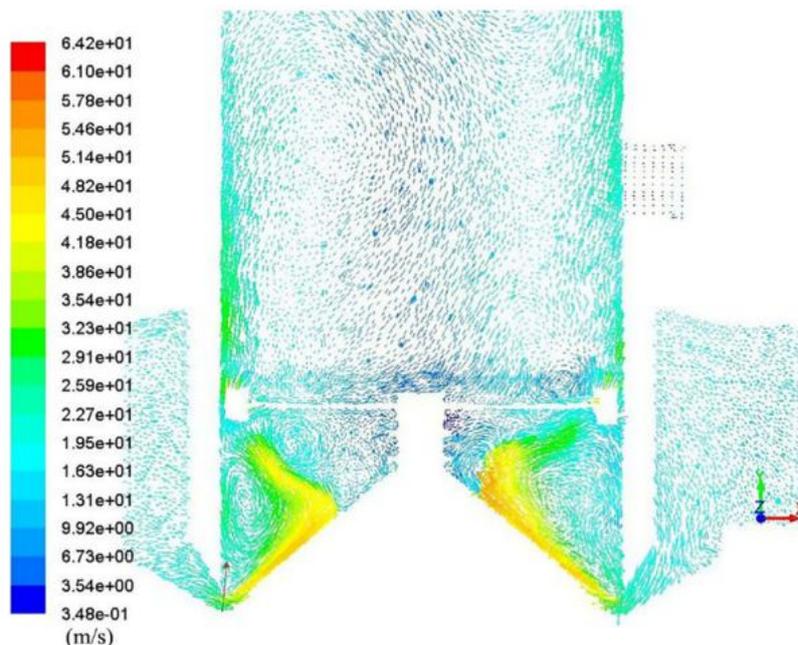


Рис. 6. Распределение скоростей частиц материала в сушильной камере вихревой сушилки (Y. Yuan et al. [34])

Velocity distribution of material particles in the drying chamber of a spin flesh dryer (Y. Yuan et al. [34])

Различные значения скорости воздуха на входе сушилки, его температуры и скорости вращения ротора по-разному влияют на эффективность вихревой сушки [34]. Увеличение скорости всасываемого воздуха приводит к увеличению скорости и температуры на выходе и перепада давления в сушильной камере, а также к уменьшению времени пребывания материала, что благоприятно для сушки термочувствительных материалов. При увеличении температуры входящего воздуха повышается общая температура в сушильной камере, увеличивается перепад давления и возрастают потери энергии. Поэтому температура входящего воздуха должна быть как можно меньше, но при условии обеспечения качества сушки. Увеличение ско-

рости ротора оказывает определенное влияние на радиальную скорость частиц материала, но не оказывает явного влияния на перепад давления. Таким образом, изменение скорости вращения ротора не приведет к значительному улучшению эффективности вихревой сушки.

J. Tan et al. выполнили экспериментальное исследование вихревой сушки антарктического криля [36]. Эксперименты проводили при температурах от 120 до 180 °С с измерением различных параметров для лучшего понимания процесса сушки. Были получены графики зависимости скорости сушки и содержания влаги от времени нахождения материала в вихревой сушилке при различной температуре (рис. 7).

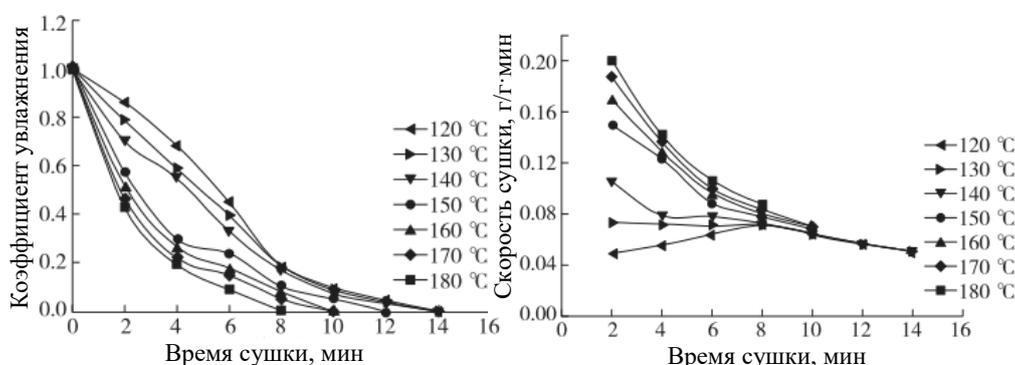


Рис. 7. Зависимости скорости сушки и содержания влаги от времени нахождения материала в вихревой сушилке при различной температуре (J. Tan et al. [36])
 Dependences of drying rate and moisture content on the time of material residence in the spin flesh dryer at different temperatures (J. Tan et al. [36])

Для математического описания процесса вихревой сушки были выбраны шесть распространенных моделей тонкослойной сушки для аппроксимации экспериментальных данных. Исследователи установили, что модель Page наиболее подходит для описания и прогнозирования процесса центробежной вихревой сушки антарктического криля.

J. Tan et al. пришли к выводу, что метод вихревой сушки имеет преимущества в виде высокого коэффициента диффузии влаги, что позволяет эффективно защищать термочувствительные компоненты антарктического криля от повреждения и улучшать качество продукта [36].

J. Gursch et al. сравнили эффективность сушки суспензии фармацевтических препаратов в различных типах сушилок и установили, что вихревая сушилка имеет преимущество в эффективности обезвоживания благодаря простоте ее конструкции [33].

J.D. Redlinger-Pohn также исследовал эффективность сушки порошков и суспензий для приготовления лекарств в вихревой сушилке и определил рациональные режимы ее осуществления [35]. Он установил, что для термочувствительных материалов очень важно поддерживать температуру сушки ниже критической для данного материала, а скорость вращения ротора нужно ограничивать, не допуская излишнего измельчения материала с разрушением его структуры.

Анализ результатов экспериментов по вихревой сушке различных материалов показал, что вихревые сушилки способны снижать влажность материала с 70–80 до 3–4 %, что значительно превосходит показатели пневматических сушилок.

Как видно из этого краткого обзора, процесс вихревой сушки все еще недостаточно изучен в ходе экспериментальных исследований, но уже установлены его важные закономерности.

Математическое моделирование пневматической и вихревой сушки. Важным аспектом организации эффективной сушки мелкодисперсного сырья в пневматических сушилках является его математическое моделирование, позволяющее определить рациональные параметры и режимы процесса.

Моделирование процесса пневматической сушки основано на математическом описании процесса движения потока газа и твердой фазы (частицы материала) и происходящего при этом массо- и теплопереноса [12, 14, 37].

Применялись различные подходы к моделированию процесса пневматической сушки, начиная с одномерных, которые рассматривают поток газа и материала как одномерный и решают уравнения баланса массы, импульса и энергии для газовой и твердой фаз совместно [14, 38]. Так, А.Н. Pelegrina и G.H. Crapiste разработали одномерную модель для пневматической сушки измельченного картофеля [39]. В этой модели исследовались взаимодействия между газом и дисперсной фазой в сочетании с внутренними процессами в материале. Модель учитывала изменения свойств газа и твердого тела в зависимости от температуры и влажности, а также усадку частиц твердого тела во время сушки. Предполагалось, что внутреннее сопротивление не контролирует перенос массы и энергии между твердыми частицами и газом [39]. Но эксперименты показали неполную корреляцию этой математической модели с их результатами [14].

Двумерное моделирование процесса сушки дает большую информацию о свойствах потока в каждой точке расчетной области [12, 14]. Двумерные модели, учитывающие радиальные вариации, основанные на подходе Эйлера, больше подходят для анализа распределения частиц и температурных градиентов в пневматической сушилке [14].

Двумерное моделирование основано на математическом описании двухфазного потока газа и твердых частиц. Для моделирования двухфазного потока в пневматической сушилке используют два типа теоретических подходов: двухжидкостную модель и эйлерову гранулярную теорию (Эйлерова модель гранулярного течения) [12].

Эти два метода основаны на подходе Эйлера, в котором каждая фаза рассматривается как сплошная среда (континуум) и описывается своими уравнениями движения в фиксирован-

ной системе координат [14]. Как двухжидкостная теория, так и эйлерова гранулярная теория основаны на макроскопических уравнениях баланса массы, импульса и энергии для газовой и твердой фаз [12]. В двухжидкостной теории обе фазы рассматриваются как непрерывные жидкости с усредненными свойствами и обменом между фазами [40]. Гранулярная теория использует кинетическую теорию разреженных газов для моделирования свойств твердой фазы, которая рассматривается как крупнозернистый (гранулированный) материал [14].

Для трехмерного моделирования процесса пневматической и вихревой сушки мелкодисперсного сырья используют метод дискретных элементов (DEM) либо дискретную фазовую модель (DPM) [11, 14, 41]. Метод дискретных элементов (DEM) основан на подходе Эйлера – Лагранжа, в котором газовая фаза считается непрерывной и охватывающей каждую точку расчетной области, а частицы твердой фазы занимают дискретные точки расчетной области, для каждой из которых может быть решено уравнение баланса массы и энергии [12]. Но такое моделирование является очень сложным и требует больших вычислительных мощностей.

I. Skuratovsky et al. разработали стационарную двумерную модель сушки, основанную на предположении о балансе массы, импульса и энергии для твердой частицы, с использованием модели фиксированного слоя для расчета действующих сил [42, 43]. Модель основана на двухжидкостной теории и была решена для двумерного стационарного состояния с учетом осевого и радиального профилей переменных потока. В модели принят двухстадийный процесс пневматической сушки. На первой стадии сушки теплообмен управляет испарением с насыщенной влагой внешней поверхности частицы в окружающий ее газ. На втором этапе частицы имеют влажную сердцевину и сухую внешнюю кору, а процесс испарения влаги из частицы регулируется диффузией через ее поверхность и конвекцией в газовой среде. По мере испарения влажное ядро сжимается и частица высыхает.

T.F. de Padua et al. смоделировали процесс пневматической сушки частиц диаметром 0,5–1,0 мм с помощью эйлеровой модели гранулярного течения [44]. Моделирование по методу Эйлера позволило получить близкие к экспери-

ментальным оценки падения давления в зависимости от расстояния в трубе-сушилке.

S.M. El-Behery et al. моделировали пневматическую сушку на основе подхода Эйлера – Лагранжа с учетом параметров, которыми другие ученые ранее пренебрегали, а именно – числа Рейнольдса, размера частиц и массового расхода твердых частиц [45, 46]. Эта математическая модель согласуется с экспериментальными данными лучше, чем предыдущие модели [14].

M. Mezhericher et al. выполнили трехмерное моделирование процесса пневматической сушки, основанное на двухфазном подходе Эйлера – Лагранжа с учетом кинетики сушки [47]. Модель была использована для моделирования процесса сушки влажных частиц ПВХ и диоксида кремния в вертикальной пневматической сушилке. Влияние тепловых граничных условий на стенке трубы было исследовано путем принятия известного значения температуры стенки или адиабатического потока в сушилке. Было предсказано неравномерное качество готового продукта из-за различных условий сушки в центральной и периферийной зонах трубы-сушилки. Более того, для случая неизолированных стенок трубы такая неравномерность качества продукта была оценена как значительно большая, чем в случае с теплоизолированной сушильной камерой.

Вихревая сушка дисперсного материала включает механическое вращение для интенсификации процесса, что делает ее математическое моделирование более сложным из-за дополнительных факторов, таких как центробежные силы. Поэтому процесс вихревой сушки еще недостаточно изучен.

Вихревая сушка включает в себя двухфазный тепло- и массообмен между газом и твердым телом (частицы материала), псевдооживление, перемешивание и диспергирование материала [14, 34]. Y. Yuan et al. смоделировали процесс вихревой сушки материала на основе подхода Эйлера – Лагранжа [34]. В ходе моделирования рассматривался двухфазный поток газ – твердое тело, имеющий непрерывную газовую фазу и дискретную твердую фазу. Поле течения непрерывной фазы было получено путем усреднения по времени фиксированной сетки, оно описывалось уравнением Навье – Стокса. Дискретная фаза рассчитывалась по методу Лагранжа, а траектория ее движения получе-

на путем интегрирования уравнений движения большого числа точек массы.

Современные подходы к математическому моделированию, такие как двухжидкостная теория, эйлерова модель гранулярного течения и метод дискретных элементов, предоставляют удобные методы анализа поведения потоков газа и твердой фазы в пневматических и вихревых сушилках. Эти методы позволяют учитывать сложные взаимодействия между частицами материала и окружающим их газом, что важно для точного описания и прогнозирования процесса сушки мелкодисперсных материалов.

Математические модели, дополненные численными методами и процедурами валидации, обеспечивают надежную основу для проектирования и оптимизации конструкции пневматических сушилок. Но необходимы дополнительные исследования для учета в имеющихся математических моделях таких параметров процесса, как температура сушки, скорость подачи материала, концентрация материала в сушилке. Кроме того, необходимо разработать надежные математические модели для описания процесса вихревой сушки.

Заключение. Проведенный обзор научной литературы по пневматическим и вихревым сушилкам для обезвоживания мелкодисперсного растительного сырья выявил их значительный потенциал для повышения эффективности сушки, особенно в пищевой и комбикормовой промышленности. Технологии пневматической и вихревой сушки, основанные на конвективном теплообмене, демонстрируют высокую скорость обезвоживания растительного сырья, что позволяет уменьшить габариты сушильных установок, повысить их энергоэффективность, снизить эксплуатационные затраты и сохранить питательные свойства термочувствительных веществ, таких как протеины, витамины и ферменты.

Пневматические сушилки, принцип действия которых основан на совмещении процессов транспортировки и обезвоживания мелкодисперсного материала в потоке горячего газа, отличаются простотой конструкции, компактностью и энергоэффективностью, а также кратковременностью контакта частиц материала с газом-теплоносителем. Они способны снизить влажность материала с 40–50 до 10 %. Однако их применение в промышленности ограничено необходимостью предварительного тщательно-

го измельчения сырья и неравномерной продолжительностью пребывания его частиц в сушильной камере. Эти недостатки пневматических сушилок частично компенсируются при использовании их конструктивных модификаций, таких как удлиненные и U-образные трубы-сушилки, а также кольцевые системы с рециркуляцией частиц материала.

Вихревые сушилки, как усовершенствованная версия пневматических, преодолевают приведенные выше недостатки за счет создания в сушильной камере закрученного газового потока и дополнительного механического воздействия ротора, что обеспечивает интенсивное диспергирование материала, создание турбулентности потоков газа и материала и возможность удаления из сырья не только поверхностной, но и связанной влаги. Механическое воздействие ротора в вихревых сушилках играет ключевую роль в диспергировании материала, создании турбулентности потока и структурных изменениях сырья, что способствует повышению эффективности сушки. Это позволяет сушить в вихревых сушилках растительные материалы с высокой влажностью и вязкостью, сохраняя при этом в целостности содержащиеся в них ценные питательные вещества. Анализ результатов экспериментов по вихревой сушке различных материалов показал, что вихревые сушилки способны снижать влажность материала с 70–80 до 3–4 %, что превосходит показатели пневматических сушилок.

Экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность технологий пневматической и вихревой сушки. Их результаты показали, что оптимизация параметров процесса сушки, таких как скорость движения газа, температура газа-теплоносителя, продолжительность сушки и конструктивные особенности сушилок, играет решающую роль в достижении высокого качества готового продукта при минимальных энергетических затратах. Для пневматических сушилок ключевыми факторами оптимизации являются длина сушильного канала, скорость газа-теплоносителя и размер частиц материала, что особенно актуально для сушки растительного сырья. Вихревые сушилки демонстрируют преимущества перед пневматическими при обработке вязких и влажных материалов благодаря синергетическому эффекту теплового и механического воздействия на материал.

Но экспериментальное изучение процессов сушки в вихревых сушилках пока еще недостаточно, особенно для обработки растительного сырья. Хотя количество опубликованных результатов исследований для вихревых сушилок существенно меньше, чем для пневматических, отдельные эксперименты подтверждают эффективность вихревой сушки для обезвоживания различных материалов. Экспериментальные исследования вихревой сушки требуют дальнейшего углубления, особенно для обезвоживания растительного сырья.

Математическое моделирование процессов пневматической и вихревой сушки позволяет прогнозировать эффективность работы сушилок при сушке различных материалов, а также оптимизировать их конструкцию. Современные методы моделирования, такие как двухжидкостная теория, эйлерова модель гранулярного течения и метод дискретных элементов, обеспечивают точное описание процесса взаимодействия частиц материала с потоком нагретого газа в процессе сушки. Однако необходимо дальнейшее совершенствование математических моделей, учитывающее все важные параметры процесса сушки, такие как температура газа, скорость подачи материала и его физические свойства. Также требуется дальнейшее развитие разработанных для математического описания пневматической сушки моделей для того, чтобы учесть в них дополнительные факторы процесса вихревой сушки, в т. ч. механическое воздействие ротора сушилки.

Таким образом, пневматические и вихревые сушилки представляют собой перспективные технические решения для обезвоживания растительного сырья. Первые подходят для быстрой сушки мелкодисперсного растительного сырья, а вторые – для сушки растительных материалов с высокой влажностью и вязкостью.

Технологии пневматической и вихревой сушки имеют большой потенциал для дальнейшего развития и применения в кормопроизводстве и пищевой промышленности, так как обеспечивают сохранение питательной ценности растительного сырья и повышение эффективности процесса сушки. Для полного раскрытия их потенциальных возможностей необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования, особенно в области вихревой сушки, а также усовершенствовать описывающие их математические модели, чтобы адаптировать

технологии пневматической и вихревой сушки к современным требованиям по энергоэффективности, экологичности и качеству продукции.

Широкое практическое использование описанных в настоящем обзоре научных результа-

тов в области пневматической и вихревой сушки растительного сырья может существенно повлиять на перерабатывающую промышленность, обеспечив устойчивое производство высококачественных кормов и пищевых продуктов.

Список источников

1. Kudra T., Mujumdar A.S. *Advanced drying technologies*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 438 p. DOI: 10.1201/9781420073898.
2. Mujumdar A.S. *Handbook of industrial drying*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1312 p. DOI: 10.1201/9781420017618.
3. Mujumdar A.S., Xiao H.W. *Advanced drying technologies for foods*. Boca Raton: CRC Press, 2020. 258 p. DOI: 10.1201/9780367262037.
4. Mujumdar A.S., Devahastin S. *Fundamental principles of drying // Industrial transfer processes*. Singapore: National University of Singapore, 2012. P. 1–22.
5. Vijayan S., Arjunan T.V., Kumar A. *Fundamental concepts of drying // Solar drying technology. green energy and technology*. Singapore: Springer, 2017. P. 3–38. DOI: 10.1007/978-981-10-3833-4_1.
6. Mujumdar A.S. *Guide to industrial drying – principles, equipment and new developments*. Mumbai: Colour Publications Pvt. Ltd., 2004. 349 p.
7. Fathi F., Ebrahimi S., Matos L.C., et al. *Emerging drying techniques for food safety and quality: A review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022. Vol. 21, N 2. P. 1125–1160. DOI: 10.1111/1541-4337.12898.
8. Adeyeye S.A.O., Ashaolu T.J., Babu A.S. *Food drying: A review // Agricultural Reviews*. 2022. Vol. 1, N 8. P. 1–8. DOI: 10.18805/ag.R-2537.
9. Castro A.M., Mayorga E.Y., Moreno F.L. *Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review // Journal of Food Engineering*. 2018. Vol. 223. P. 152–167. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.12.012.
10. Dorfeshan M., Mehrzad S. *Pneumatic and flash drying // Particulate Drying*. Boca Raton: CRC Press. 2023. P. 47–61. DOI: 10.1201/9781003207108.
11. Borde I., Levy A. *Pneumatic and flash drying // Handbook of Industrial Drying*. Boca Raton: CRC Press, 2006. P. 350–365. DOI: 10.1201/9781420017618.
12. Borde I., Levy A. *Pneumatic and flash drying // Handbook of Industrial Drying*. Boca Raton: CRC Press, 2015. P. 381–392. DOI: 10.1201/b17208.
13. Dorfeshan M., Mehrzad S. *Pneumatic dryers // Drying Technology in Food Processing*. Woodhead Publishing, 2023. P. 157–173. DOI: 10.1016/B978-0-12-819895-7.00019-5.
14. Banooni S., Hajidavalloo E., Dorfeshan M. *A comprehensive review on modeling of pneumatic and flash drying // Drying Technology*. 2018. Vol. 36, № 1. P. 33–51. DOI: 10.1080/07373937.2017.1298123.
15. Snyder H. *Literature review as a research methodology: An overview and guidelines // Journal of Business Research*. 2019. Vol. 104. P. 333–339. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.
16. Peters M.D., Marnie C., Colquhoun H., et al. *Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application // Systematic Reviews*. 2021. Vol. 10. P. 263. DOI: 10.1186/s13643-021-01821-3.
17. Mengist W., Soromessa T., Legese G. *Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research // MethodsX*. 2020. Vol. 7. P. 100777. DOI: 10.1016/j.mex.2019.100777.
18. Ngowi E., Jeremiah J.M., Kaale L., et al. *Development and testing of small-scale flash dryer for maize bran // Tanzania Journal of Engineering and Technology*. 2024. Vol. 43, № 2. P. 75–90.
19. Тимашева Е.Н. Оптимизация режимов работы пневматической трубы-сушилки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 6. С. 400–405. EDN: UOJADX.
20. Селиверстов А.А., Тимофеев И.Е., Загидуллин С.Х. Совершенствование техники сушки применительно к пневматическим сушилкам // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2013. № 2. С. 5–12. EDN: RMTJHP.

21. Indarto A., Halim Y., Partoputro P. Pneumatic drying of solid particle: Experimental and model comparison // *Experimental Heat Transfer*. 2007. Vol. 20, N 4. P. 277–287. DOI: 10.1080/08916150701418252.
22. Tran T., Abass A., Andrade L.A.T., et al. Cost-effective cassava processing: Case study of small-scale flash-dryer reengineering // *Root, Tuber and Banana Food System Innovations: Value Creation for Inclusive Outcomes*. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 105–143. DOI: 10.1007/978-3-030-92022-7_4.
23. Hidayat M., Rasmuson A. Heat and mass transfer in U-bend of a pneumatic conveying dryer // *Chemical Engineering Research and Design*. 2007. Vol. 85, № 3. P. 307–319. DOI: 10.1205/cherd06162.
24. Precoppe M. Construction guide of a small-scale pneumatic dryer to process cassava. RTB Working Paper, 2020. 22 p.
25. Precoppe M. Scaling out energy-efficient pneumatic drying technology in Tanzania. RTB Working Paper, 2021. 31 p.
26. Precoppe M., Tran T., Chapuis A., et al. Improved energy performance of small-scale pneumatic dryers used for processing cassava in Africa // *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 151. P. 510–519. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.001.
27. Chapuis A., Precoppe M., Méot J.M., et al. Pneumatic drying of cassava starch: Numerical analysis and guidelines for the design of efficient small-scale dryers // *Drying Technology*. 2017. Vol. 35, N 4. P. 393–408. DOI: 10.1080/07373937.2016.1177537.
28. Chapuis A., Lancement C., Giraldo F., et al. Extensive experimental validation of a model for pneumatic drying of cassava starch // *Drying Technology*. 2023. Vol. 41, N 1. P. 122–136. DOI: 10.1080/07373937.2022.2087668.
29. Adegbite S.A., Abass A.B., Olukunle O.J., et al. Mass and energy balance analysis of pneumatic dryers for cassava and development of optimization models to increase competitiveness in Nigeria // *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2019. Vol. 32, N 3. P. 1–11.
30. Adegbite S.A., Asiru W.B., Sartas M., et al. Development of a pilot scale energy efficient flash dryer for cassava flour // *Resources, Environment and Sustainability*. 2023. Vol. 13. P. 100117. DOI: 10.1016/j.resenv.2023.100117.
31. Zhang H., Gao J., Wu L., et al. Experimental study of moisture content stability on the low-speed pneumatic drying process of cut stem // 2018 International Conference on Electrical, Control, Automation and Robotics (ECAR 2018). P. 608–612.
32. Селиверстов А.А., Тимофеев И.Е., Загидуллин С.Х. К вопросу о налипании материала на рабочие поверхности пневматических сушилок // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013. № 2. С. 208–211. EDN: PZGFNZ.
33. Gursch J., Hohl R., Armenante M.E., et al. Continuous drying of small particles for pharmaceutical applications—an evaluation of selected lab-scale systems // *Organic Process Research & Development*. 2015. Vol. 19, N 12. P. 2055–2066. DOI: 10.1021/acs.oprd.5b00309.
34. Yuan Y., Dong P., Xu Y., et al. CFD modeling of heat transfer and flow field in spin flash drying process // *Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 56. P. 3011–3021. DOI: 10.1007/s00231-020-02918-6.
35. Redlinger-Pohn J.D. Using pneumatic dryer in the pharmaceutical industry – a feasibility study. Master thesis. Graz: Graz University of Technology, 2013. 141 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.21576.60162.
36. Tan J., Ouyang J., Ma T., et al. Spin-flash drying characteristics and kinetic model of antarctic krill // *Food and Machinery*. 2023. Vol. 39, N 10. P. 42–48. DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.81117.
37. Tanaka F., Uchino T., Hamanaka D., et al. Mathematical modeling of pneumatic drying of rice powder // *Journal of food Engineering*. 2008. Vol. 88, N 4. P. 492–498. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.03.014.
38. Bhattarai S., Oh J.-H., Euh S.-H., et al. Simulation study for pneumatic conveying drying of sawdust for pellet production. *Drying Technology*. 2014. Vol. 32, N 10. P. 1142–1156. DOI: 10.1080/07373937.2014.884575.
39. Pelegrina A.H., Crapiste G.H. Modelling the pneumatic drying of food particles // *Journal of Food Engineering*. 2001. Vol. 48, N 4. P. 301–310. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00170-9.
40. Levy A., Borde I. Two-fluid model for pneumatic drying of particulate materials. *Drying Technology*. 2001. Vol. 19, N 8. P. 1773–1788. DOI: 10.1081/DRT-100107272.

41. Mezhericher M., Levy A., Borde I. Modeling of droplet drying in spray chambers using 2D and 3D computational fluid dynamics // *Drying Technology*. 2009. Vol. 27, N 3. P. 359–370. DOI: 10.1080/07373930802682940.
42. Skuratovsky I., Levy A., Borde I. Two-fluid, two-dimensional model for pneumatic drying // *Drying Technology*. 2003. Vol. 21, N 9. P. 1645–1668. DOI: 10.1081/DRT-120025502.
43. Skuratovsky I., Levy A., Borde I. Two-dimensional numerical simulations of the pneumatic drying in vertical pipes // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2005. Vol. 44, N 2. P. 187–192. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.012.
44. De Pádua T.F., Béttega R., Freire J.T. Gas-solid flow behavior in a pneumatic conveying system for drying applications: coarse particles feeding with a Venturi device // *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2015. Vol. 5, N 3. P. 225. DOI: 10.4236/aces.2015.53024.
45. El-Behery S.M., El-Askary W.A., Hamed M.H., et al. Numerical simulation of heat and mass transfer in pneumatic conveying dryer // *Computers & Fluids*. 2012. Vol. 68. P. 159–167. DOI: 10.1016/j.compfluid.2012.08.006.
46. El-Behery S.M., El-Askary W.A., Hamed M.H., et al. Eulerian–Lagrangian simulation and experimental validation of pneumatic conveying dryer // *Drying Technology*. 2013. Vol. 31, N 12. P. 1374–1387. DOI: 10.1080/07373937.2013.796483.
47. Mezhericher M., Levy A., Borde I. Three-dimensional modelling of pneumatic drying process // *Powder Technology*. 2010. Vol. 203, N 2. P. 371–383. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.05.032.

References

1. Kudra T, Mujumdar AS. *Advanced drying technologies*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2009. DOI: 10.1201/9781420073898.
2. Mujumdar AS. *Handbook of industrial drying*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2006. DOI: 10.1201/9781420017618.
3. Mujumdar AS, Xiao HW. *Advanced drying technologies for foods*. Boca Raton: CRC Press; 2020. DOI: 10.1201/9780367262037.
4. Mujumdar AS, Devahastin S. Fundamental principles of drying. In: *Industrial transfer processes*. Singapore: National University of Singapore; 2012:1-22.
5. Vijayan S, Arjunan TV, Kumar A. Fundamental concepts of drying. In: *Solar drying technology. Green energy and technology*. Singapore: Springer; 2017:3-38. DOI: 10.1007/978-981-10-3833-4_1.
6. Mujumdar AS. *Guide to industrial drying – principles, equipment and new developments*. Mumbai: Colour Publications Pvt. Ltd.; 2004.
7. Fathi F, Ebrahimi S, Matos LC, et al. Emerging drying techniques for food safety and quality: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022;21(2):1125-1160. DOI: 10.1111/1541-4337.12898.
8. Adeyeye SAO, Ashaolu TJ, Babu AS. Food drying: a review. *Agricultural Reviews*. 2022;1(8):1-8. DOI: 10.18805/ag.R-2537.
9. Castro AM, Mayorga EY, Moreno FL. Mathematical modelling of convective drying of fruits: a review. *Journal of Food Engineering*. 2018;223:152-167. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.12.012.
10. Dorfeshan M, Mehrzad S. Pneumatic and flash drying. In: *Particulate Drying*. Boca Raton: CRC Press; 2023:47-61. DOI: 10.1201/9781003207108.
11. Borde I, Levy A. Pneumatic and flash drying. In: Mujumdar AS, ed. *Handbook of Industrial Drying*. Boca Raton: CRC Press; 2006:350-365. DOI: 10.1201/9781420017618.
12. Borde I, Levy A. Pneumatic and flash drying. In: Mujumdar AS, ed. *Handbook of Industrial Drying*. Boca Raton: CRC Press; 2015:381-392. DOI: 10.1201/b17208.
13. Dorfeshan M, Mehrzad S. Pneumatic dryers. In: *Drying Technology in Food Processing*. Woodhead Publishing; 2023:157-173. DOI: 10.1016/B978-0-12819895-7.00019-5.
14. Banooni S, Hajidavalloo E, Dorfeshan M. A comprehensive review on modeling of pneumatic and flash drying. *Drying Technology*. 2018;36(1):33-51. DOI: 10.1080/07373937.2017.1298123.
15. Snyder H. Literature review as a research methodology: an overview and guidelines. *Journal of Business Research*. 2019;104:333-339. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

16. Peters MD, Marnie C, Colquhoun H, et al. Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application. *Systematic Reviews*. 2021;10:263. DOI: 10.1186/s13643-021-01821-3.
17. Mengist W, Soromessa T, Legese G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*. 2020;7:100777. DOI: 10.1016/j.mex.2019.100777.
18. Ngowi E, Jeremiah JM, Kaale L, et al. Development and testing of small-scale flash dryer for maize bran. *Tanzania Journal of Engineering and Technology*. 2024;43(2):75-90.
19. Timasheva EN. Optimized operation of pneumatic drier. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(6):400-405. (In Russ.).
20. Seliverstov AA, Timofeev IE, Zagidullin SH. Perfection of drying technique with regard to pneumatic conveying driers. *PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology*. 2013;(2):5-12. (In Russ.).
21. Indarto A, Halim Y, Partoputro P. Pneumatic drying of solid particle: experimental and model comparison. *Experimental Heat Transfer*. 2007;20(4):277-287. DOI: 10.1080/08916150701418252.
22. Tran T, Abass A, Andrade LAT, et al. Cost-effective cassava processing: case study of small-scale flash-dryer reengineering. In: *Root, Tuber and Banana Food System Innovations: Value Creation for Inclusive Outcomes*. Cham: Springer International Publishing; 2022:105-143. DOI: 10.1007/978-3-030-920227_4.
23. Hidayat M, Rasmuson A. Heat and mass transfer in U-bend of a pneumatic conveying dryer. *Chemical Engineering Research and Design*. 2007;85(3):307-319. DOI: 10.1205/cherd06162.
24. Precoppe M. Construction guide of a small-scale pneumatic dryer to process cassava. RTB Working Paper. 2020.
25. Precoppe M. Scaling out energy-efficient pneumatic drying technology in Tanzania. RTB Working Paper. 2021.
26. Precoppe M, Tran T, Chapuis A, et al. Improved energy performance of small-scale pneumatic dryers used for processing cassava in Africa. *Biosystems Engineering*. 2016;151:510-519. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.001.
27. Chapuis A, Precoppe M, Méot JM, et al. Pneumatic drying of cassava starch: numerical analysis and guidelines for the design of efficient small-scale dryers. *Drying Technology*. 2017;35(4):393-408. DOI: 10.1080/07373937.2016.1177537.
28. Chapuis A, Lancement C, Giraldo F, et al. Extensive experimental validation of a model for pneumatic drying of cassava starch. *Drying Technology*. 2023;41(1):122-136. DOI: 10.1080/07373937.2022.2087668.
29. Adegbite SA, Abass AB, Olukunle OJ, et al. Mass and energy balance analysis of pneumatic dryers for cassava and development of optimization models to increase competitiveness in Nigeria. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2019;32(3):1-11.
30. Adegbite SA, Asiru WB, Sartas M, et al. Development of a pilot scale energy efficient flash dryer for cassava flour. *Resources, Environment and Sustainability*. 2023;13:100117. DOI: 10.1016/j.resenv.2023.100117.
31. Zhang H, Gao J, Wu L, et al. Experimental study of moisture content stability on the low-speed pneumatic drying process of cut stem. In: *2018 International Conference on Electrical, Control, Automation and Robotics (ECAR 2018)*. 2018:608-612.
32. Seliverstov AA, Timofeev IE, Zagidullin SH. On the issue of material sticking on inner surface of pneumatic conveying drier. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2013;(2):208-211. (In Russ.).
33. Gursch J, Hohl R, Armenante ME, et al. Continuous drying of small particles for pharmaceutical applications—an evaluation of selected lab-scale systems. *Organic Process Research & Development*. 2015;19(12):2055-2066. DOI: 10.1021/acs.oprd.5b00309.
34. Yuan Y, Dong P, Xu Y, et al. CFD modeling of heat transfer and flow field in spin flash drying process. *Heat and Mass Transfer*. 2020;56:3011-3021. DOI: 10.1007/s00231-020-02918-6.
35. Redlinger-Pohn JD. *Using pneumatic dryer in the pharmaceutical industry – a feasibility study*. Graz: Graz University of Technology; 2013. Master's thesis. DOI: 10.13140/RG.2.2.21576.60162.
36. Tan J, Ouyang J, Ma T, et al. Spin-flash drying characteristics and kinetic model of Antarctic krill. *Food and Machinery*. 2023;39(10):42-48. DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.81117.

37. Tanaka F, Uchino T, Hamanaka D, et al. Mathematical modeling of pneumatic drying of rice powder. *Journal of Food Engineering*. 2008;88(4):492-498. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.03.014.
38. Bhattarai S, Oh JH, Euh SH, et al. Simulation study for pneumatic conveying drying of sawdust for pellet production. *Drying Technology*. 2014;32(10):1142-1156. DOI: 10.1080/07373937.2014.884575.
39. Pelegrina AH, Crapiste GH. Modelling the pneumatic drying of food particles. *Journal of Food Engineering*. 2001;48(4):301-310. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00170-9.
40. Levy A, Borde I. Two-fluid model for pneumatic drying of particulate materials. *Drying Technology*. 2001;19(8):1773-1788. DOI: 10.1081/DRT-100107272.
41. Mezhericher M, Levy A, Borde I. Modeling of droplet drying in spray chambers using 2D and 3D computational fluid dynamics. *Drying Technology*. 2009;27(3):359-370. DOI: 10.1080/07373930802682940.
42. Skuratovsky I, Levy A, Borde I. Two-dimensional numerical simulations of the pneumatic drying in vertical pipes. *Drying Technology*. 2003;21(9):1645-1668. DOI: 10.1081/DRT-120025502.
43. Skuratovsky I, Levy A, Borde I. Two-dimensional numerical simulations of the pneumatic drying in vertical pipes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2005;44(2):187-192. DOI: 10.1016/j.ccep.2004.02.013.
44. De Pádua TF, Béttega R, Freire JT. Gas-solid flow behavior in a pneumatic conveying system for drying applications: coarse particles feeding with a Venturi device. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2015;5(3):225-236. DOI: 10.4236/aces.2015.53024.
45. El-Behery SM, El-Askary WA, Hamed MH, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer in pneumatic conveying dryer. *Computers & Fluids*. 2012;68:159-167. DOI: 10.1016/j.compfluid.2012.08.006.
46. El-Behery SM, El-Askary WA, Hamed MH, et al. Eulerian-Lagrangian simulation and experimental validation of pneumatic conveying dryer. *Drying Technology*. 2013;31(12):1374-1387. DOI: 10.1080/07373937.2013.796483.
47. Mezhericher M, Levy A, Borde I. Three-dimensional modelling of pneumatic drying process. *Powder Technology*. 2010;203(2):371-383. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.05.032.

Статья принята к публикации 02.06.2025 / The article accepted for publication 02.06.2025.

Информация об авторах:

Сергей Валерьевич Брагинец¹, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, доктор технических наук

Олег Николаевич Бахчевников², старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, кандидат технических наук

Дмитрий Алексеевич Кузьменко³, инженер отдела переработки продукции растениеводства, аспирант

Information about the authors:

Sergey Valerievich Braginet¹, Leading Researcher, Department of Processing Plant Products, Doctor of Technical Sciences

Oleg Nikolaevich Bakhchevnikov², Senior Researcher, Department of Processing of Plant Products, Candidate of Technical Sciences

Dmitry Alekseevich Kuzmenko³, Engineer at the Department of Processing of Plant Products, Postgraduate student

