





Исследование процесса сушки термолабильных продуктов с использованием теплонасосных технологий





Алексей В. Дранников ¹	drannikov@list.ru	 0000-0002-3060-8688
Яна П. Домбровская ¹	yana_dombrovskaya@inbox.ru	 0000-0003-2363-7648
Евгений М. Сухоруков ¹	suxorukov99.99@mail.ru	 0009-0006-1798-2567
Даниил Р. Кулигин ¹	kuligin470@gmail.com	 0009-0007-3133-4467

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В статье представлена схема и принцип действия энергоэффективной сушильной установки с применением теплонасосной технологии с рециркуляцией и очисткой воздуха, которая ориентирована на получение пророщенных семян льна, покрытых термочувствительной оболочкой на основе растительного глицерина. Актуальность работы обусловлена специфическими требованиями к режиму сушки таких продуктов как пророщенные семена льна, обладающие высоким содержанием витаминов, антиоксидантов и полиненасыщенных жирных кислот (особенно омега-3). Деликатная структура проростков и чувствительная оболочка требуют предельной осторожности при термической обработке. Авторами представлены оптимальные режимные параметры процесса сушки данного продукта, позволяющие достичь высокой эффективности проведения процесса и его экологической целесообразности. При этом экономия удельных энергоресурсов может достигать до 70 % за счет применения теплонасосных технологий, обеспечивающих извлечение тепла из отработанного воздуха (который обычно выбрасывается в атмосферу) и передачи его свежему воздуху, который подготавливают к процессу сушки. Кроме этого, были проведены исследования по определению оптимального коэффициента рециркуляции (КР) отработанного воздуха. Было выявлено, что настройка КР в диапазоне 55-65 % является оптимальной, обеспечивая пиковую энергоэффективность и сохранение стабильности кипящего слоя. В ходе изучения результатов эксперимента по сушке дражированных семян льна на представленной установке, а также на основании параметрического моделирования процесса авторами сделан вывод о том, что необходим постоянный контроль и регулирование параметров процесса в автоматическом режиме за счет мониторинга изменений показателей свежего воздуха. Таким образом, представленная установка и технология сушки позволяет не только существенно снизить энергозатраты предприятия, но и обеспечивает высокую скорость и равномерность сушки продукта, что критически важно для сохранения его биологической ценности и товарного вида.

Ключевые слова: сушка, теплонасосная установка, лён.

Investigation of the drying process of thermolabile products using heat pump technologies

Alexey V. Drannikov ¹	drannikov@list.ru	 0000-0002-3060-8688
Iana P. Dombrovskaya ¹	yana_dombrovskaya@inbox.ru	 0000-0003-2363-7648
Evgeniy M. Sukhorukov ¹	suxorukov99.99@mail.ru	 0009-0006-1798-2567
Daniil R. Kuligin ¹	kuligin470@gmail.com	 0009-0007-3133-4467

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The article presents the scheme and principle of operation of an energy-efficient drying unit using heat pump technology with recirculation and air purification, which is focused on obtaining germinated flax seeds coated with a thermosensitive shell based on vegetable glycerin. The relevance of the work is due to the specific requirements for the drying regime of products such as sprouted flax seeds, which have a high content of vitamins, antioxidants and polyunsaturated fatty acids (especially omega-3). The delicate structure of the seedlings and the sensitive shell require extreme care during heat treatment. The authors present the optimal operating parameters of the drying process of this product, which make it possible to achieve high efficiency of the process and its environmental expediency. At the same time, savings in specific energy resources can reach up to 70% due to the use of heat pump technologies that extract heat from exhaust air (which is usually released into the atmosphere) and transfer it to fresh air, which is prepared for the drying process. In addition, studies have been conducted to determine the optimal exhaust air recirculation coefficient. It was found that the control panel setting in the range of 55-65% is optimal, providing peak energy efficiency and maintaining fluidized bed stability. During the study of the results of the experiment on drying drained flax seeds on the presented installation, as well as on the basis of parametric modeling of the process, the authors concluded that constant monitoring and regulation of the process parameters is necessary in automatic mode by monitoring changes in fresh air parameters. Thus, the presented drying installation and technology allows not only to significantly reduce the energy consumption of the enterprise, but also ensures high speed and uniformity of drying of the product, which is critically important for preserving its biological value and presentation.

Keywords: drying, heat pump unit, flax.

Для цитирования

Дранников А.В., Домбровская Я.П., Сухоруков Е.М., Кулигин Д.Р. Исследование процесса сушки термолабильных продуктов с использованием теплонасосных технологий // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 107–113. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-107-113

For citation

Drannikov A.V., Dombrovskaya Y.P., Sukhorukov E.M., Kuligin D.R. Investigation of the drying process of thermolabile products using heat pump technologies. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 107–113. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-107-113

Введение

Современные пищевая и перерабатывающая промышленности сталкиваются с проблемой повышения энергоэффективности и минимизации негативного воздействия на окружающую среду [11, 19]. Технологические процессы сушки играют ключевую роль в производстве, однако они характеризуются значительными энергозатратами. Традиционные методы сушки требуют больших объёмов тепла, часто получаемого за счёт сжигания ископаемого топлива, что приводит к высоким выбросам углекислого газа [15, 17].

При производстве продуктов питания, технология которых предусматривает высушивание сырья или полуфабрикатов, процесс сушки, предусматривающий подбор необходимых параметров сушильного агента при каждом этапе его подготовки, является определяющим качеством готовой продукции [7, 8].

Особенно тщательно необходимо планировать процесс сушки при производстве качественных продуктов функционального и лечебно-профилактического назначения.

К продуктам питания, обладающим функциональными свойствами, можно отнести пророщенные семена льна [14, 16]. Процесс проращивания активирует в семенах ферменты, многократно увеличивая содержание витаминов, антиоксидантов и полиненасыщенных жирных кислот (особенно омега-3), а также улучшает их усвояемость [4, 14]. Для повышения удобства потребления, сохранения полезных свойств, такие проростки покрывают термочувствительной оболочкой на основе растительного глицерина [9, 13]. Это позволяет не только создать привлекательную форму, но и защитить нежные проростки от окисления, а также инкапсулировать дополнительные витаминные или вкусовые добавки. Особенно важно вести строгий контроль параметров сушки для пророщенных семян льна, покрытых такой оболочкой [4, 15]. При этом следует осуществлять удаление влаги без повреждения хрупкого проростка и без нарушения целостности, прозрачности и функциональных свойств глицериновой пленки [9].

Для этих целей предлагается использование энергоэффективной сушильной установки с применением теплонасосной технологии с рециркуляцией и очисткой воздуха, которая ориентирована именно на такие высокочувствительные продукты [1, 2, 5]. Её ключевое преимущество – непрерывный автоматический контроль параметров входящего воздуха, работы теплообменника, состояния сушильного агента в момент контакта с материалом и показателей выходящего (рециркуляционного) воздуха, что обеспечивает стабильные условия процесса [8, 10, 20].

В связи с этим актуальным является изучение сушки пророщенных семян льна, покрытых оболочкой, с использованием компрессорной теплонасосной установки (ТНУ) и определение оптимальных режимов процесса как с точки зрения температуры сушильного агента, так и с точки зрения гидродинамики кипящего слоя продукта.

Материалы и методы

Исследование процесса сушки проводили на сушильной установке, представленной на рисунке 1.

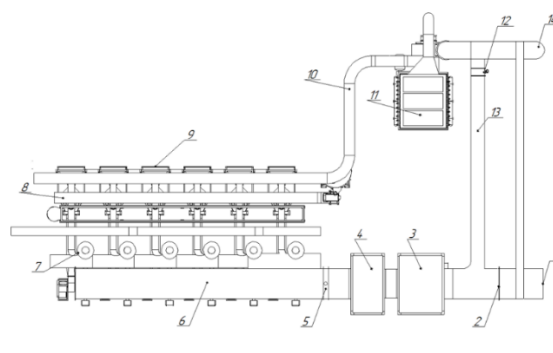


Рисунок 1. Сушильная установка с использованием теплового насоса: 1 – воздухозаборник уличного воздуха, 2 – заслонка регулирования потока входящего воздуха, теплонасосная установка, включающая 3 – испаритель и 4 – конденсатор, 5 – датчик контроля температуры и влажности, 6 – распределительный коллектор, 7 – газовая горелка, 8 – Z-нория, 9 – шесть сушилок, 10 – отводящая труба отработанного сушильного агента, 11 – фильтр-циклон, 12 – заслонка рециркуляционного воздуха, 13 – рециркуляционная труба, 14 – отвод отработанного воздуха

Figure 1. Diagram of the drying agent preparation unit using a heat pump: 1 – outdoor air intake, 2 – intake air flow control valve, heat pump unit (3 – evaporator, 4 – condenser), 5 – temperature and humidity control sensor, 6 – distribution manifold, 7 – gas burner, 8 – Z-noria, 9 – six dryers, 10 – exhaust pipe of the spent drying agent, 11 – cyclone filter, 12 – recirculating air damper, 13 – recirculating pipe, 14 – exhaust air outlet

Как видно по схеме, свежий воздух в систему поступает через воздухозаборник 1, в соответствии с положением заслонки регулирования подачи свежего воздуха 2 и смешивается с рециркуляционным воздухом на пересечении с рециркуляционной трубой 13. После чего воздушная смесь попадает в теплонасосную установку (испаритель 3 и конденсатор 4) где осушается и направляется в распределительный коллектор 6 через датчик контроля влажности и температуры 5. Из коллектора сушильный агент поступает в равных пропорциях в теплообменник, подогреваемый газовой горелкой 7,

при этом достигает необходимой температуры и направляется в шесть сушильных шкафов 9, в которых на поддонах находятся пророщенные семена льна, покрытые термочувствительной оболочкой из растительного глицерина.

В сушильных шкафах 9 осуществляется сушка до требуемой влажности в активном гидродинамическом режиме. Причем скорость сушильного агента подбирается таким образом, чтобы не происходило травмирование семян и не нарушалась сплошность их оболочки.

Отработанный воздух через отводящую трубу 10 поступает в фильтр-циклон 11 и попадает на узел рециркуляции с заслонкой регулирования потока рециркуляционного воздуха 12, частично возвращаясь на подмес со свежим воздухом и частично выходя в атмосферу через отвод отработанного воздуха 14.

В данной сушильной установке основным элементом для подготовки и использования сушильного агента, требуемых режимных параметров, является тепловой насос, работа которого основана на цикле Карно, где хладагент подвергается следующим стадиям: испарение, компрессия, конденсация и дросселирование.

Принцип работы теплового насоса основан на извлечении тепла из отработанного воздуха (который обычно выбрасывается в атмосферу) и передачи его свежему воздуху, который подготавливают к процессу сушки. Это позволяет значительно снизить потребление энергии, поскольку часть тепла используется повторно, а не рассеивается в окружающей среде [6, 11]. Современные теплонасосные установки обеспечивают высокую точность поддержания заданных параметров (температура, влажность, скорость воздушного потока) с минимальными колебаниями, что гарантирует равномерную и щадящую сушку.

Результаты

Использование теплонасосных установок для подготовки воздуха в процессе сушки пророщенных семян льна, покрытых термочувствительной оболочкой из растительного глицерина – это не просто эффективное решение, а настоящая необходимость, обусловленная специфическими требованиями к режиму сушки таких продуктов [8, 15]. Деликатная структура проростков и чувствительная оболочка требуют предельной осторожности при термической обработке [4, 9].

При этом процесс сушки продукта осуществляется таким образом, что удаление влаги происходит без ущерба для его качества,

сохраняются вкус, аромат, цвет, форма и, что особенно важно, ценные питательные компоненты. Традиционные методы нагрева воздуха, основанные на прямом сжигании топлива или использовании электрических нагревателей, недостаточно эффективны и часто приводят к нежелательным последствиям. Главная проблема традиционных систем – нестабильность параметров сушильного агента. Резкие скачки температуры, неравномерное распределение тепла и влажности приводят к перегреву отдельных участков продукта, вызывая его подгорание, деформацию или разрушение клеточной структуры. В результате продукт может потерять свой товарный вид: оболочка из растительного глицерина может потерять прозрачность и эластичность, а проростки – потерять свою биологическую активность. Кроме того, неравномерная сушка может привести к образованию внутренних напряжений, что снижает его качество хранения. Потери тепла при использовании традиционных систем также значительны. Значительная часть энергии уходит вместе с выбросами отработанного воздуха в атмосферу.

Теплонасосные установки радикально меняют ситуацию. Они обеспечивают точное и стабильное регулирование температуры и влажности воздуха, что критически важно для продуктов с термочувствительной оболочкой [11, 12].

Более того, теплонасосные системы позволяют оптимизировать процесс сушки в зависимости от специфики продукта. Например, для пророщенных семян льна с тонкой оболочкой из растительного глицерина можно задать более низкую температуру и повышенную влажность, чтобы исключить их повреждение. Возможности программируемых логических контроллеров (ПЛК) в сочетании с датчиками влажности и температуры позволяют создать индивидуальные режимы сушки для широкого спектра продуктов. Сравнение теплонасосных установок с традиционными системами наглядно демонстрирует их преимущество в плане энергоэффективности и экологичности [6, 11].

Экономия энергии может достигать 70% и более, что существенно снижает операционные расходы. Кроме того, уменьшение выбросов в атмосферу способствует сохранению окружающей среды.

Использование представленной схемы целесообразно для пророщенных семян льна, покрытых термочувствительной оболочкой из растительного глицерина [9]. Производство включает в себя последовательные этапы:

1. Остановка роста проростков: кратковременный (2–4 мин) прогрев пророщенных семян воздухом с температурой 50–60 °С, подаваемым от ТНУ;

2. Дrajирование пророщенных семян раствором растительного глицерина;

3. Сушка дражированных пророщенных семян льна в сушилке до содержания влаги 5–10% (целевая $9 \pm 1\%$). Время сушки составляет 25–30 минут.

Температура сушильного агента не должна превышать 45 °С, но и нельзя допускать ниже 35 °С. В противном случае можно перегреть и повредить теплочувствительный слой из растительного глицерина или использовать сушильный агент, который не будет эффективен для обеспечения интенсивности процесса.

Перед подачей сушильного агента непосредственно в сушилку, он подвергается ряду подготовительных этапов [5, 8]. В теплонасосной установке происходит конденсация лишней влаги в испарителе 3 и предварительное подогревание воздуха в конденсаторе 4 для смещения точки росы и предотвращения выпадения конденсата на этапе конечного нагревания до 35–45 °С. Нагревание происходит через теплообменник, подогреваемый газовой горелкой 7 без контакта воздуха с продуктами горения. Поток, проходящий через сушилку, регулирует нагнетающая турбина в соответствии с заданными параметрами. Осуществление данной подготовки позволяет наиболее тонко нагреть до необходимой температуры сушильный агент и достичь максимальной эффективности сушки за счет минимального уровня влажности.

Отработанный сушильный агент выходит из сушилок 9 по отводящей трубе 10 и проходит очистку в фильтре-циклоне 11 для удаления загрязнений и лишней влаги [1, 18]. Таким образом, при выбросе в атмосферу отработанного воздуха через отвод 14 соблюдаются экологические нормы и появляется возможность часть этого воздуха направить на рециркуляцию по трубе 13. Используя рециркуляционный воздух, можно повысить температуру исходного, чистого воздуха и экономить энергетические ресурсы для подготовки сушильного агента, и, так как воздух очищен, не вызывает загрязнений ТНУ и других агрегатов, продлевая их срок службы [3, 12].

Для количественной оценки эффективности системы и поиска баланса между энергосбережением и качеством процесса был проведен эксперимент по определению оптимального коэффициента рециркуляции (КР) отработанного воздуха.

Коэффициент рециркуляции рассчитывался как отношение объемного расхода рециркуляционного воздуха к общему расходу воздуха, подаваемого в ТНУ. Значение КР контролировалось и изменялось путем регулирования положения заслонки 12 на рециркуляционной трубе 13 при постоянном общем расходе, создаваемом нагнетающей турбиной.

Условия для проведения сушки задавались экспериментальным путем: кипящий слой (разрежение -0.5...-0,7 бар); температура сушильного агента: 38–42 °С; целевая влажность продукта: $9 \pm 1\%$.

Таблица 1.

Результаты экспериментального определения оптимального коэффициента рециркуляции

Table 1.

The results of the experimental determination of the optimal recirculation coefficient

Коэффициент рециркуляции, % Recycling rate, %	Удельное энергопотребление, кВт×ч/кг исп. влаги Specific energy consumption, kWh/kg of used moisture	Стабильность кипящего слоя Fluidized bed stability
30	0.70	Отличная Excellent
45	0.58	Отличная Excellent
60	0.52	Хорошая Good
70	0.55	Удовлетворительная (наблюдается рост влажности агента) Satisfactory (there is an increase in the humidity of the agent)
80	0.65	Нестабильная (высокая влажность агента) Unstable (high humidity agent)

Оптимальный диапазон КР составляет 55–65%. При данных значениях достигается минимальное удельное энергопотребление, и обеспечивается экономия в 45–50% на подогреве против режима без рециркуляции.

Основным ограничивающим фактором при КР свыше 65% является стабильность кипящего слоя. Повышенная влажность и плотность воздушного потока приводят к слипанию частиц продукта, что ухудшает равномерность сушки и увеличивает продолжительность цикла.

Эксплуатация установки в данном диапазоне КР позволяет обеспечить максимальную энергоэффективность при сохранении высокого качества процесса и производительности.

В ходе изучения результатов эксперимента по сушке дражированных семян льна на представленной установке, а также на основании параметрического моделирования процесса, были сделаны следующие промежуточные выводы:

– необходим постоянный контроль температуры воздуха для предотвращения перегрева или недосушивания пророщенных семян льна. Оптимальные параметры зависят от толщины оболочки из растительного глицерина;

– получен четкий оптимум КР в диапазоне 55–65%. При данном значении достигается максимальная энергоэффективность процесса сушки (удельное энергопотребление составляет 0,52–0,58 кВт×ч/кг испаренной влаги) при сохранении стабильности кипящего слоя и приемлемой продолжительности цикла. Превышение КР свыше 65% ведет к слипанию частиц продукта и нарушению равномерности сушки;

– регулирование параметров процесса в автоматическом режиме за счет мониторинга изменений показателей свежего воздуха;

– стабильность кипящего слоя является ключевым индикатором корректности работы установки. При этом он зависит от корректно подобранных КР, температуры и скорости потока сушильного агента.

– необходима своевременная замена ржавых фильтров, что позволяет не допустить снижения эффективности очистки или пропуска твердых частиц.

Заключение

Применение сушильной установки с использованием теплонасосных технологий, системы фильтрации и рециркуляции демонстрирует высокую эффективность проведения процесса сушки и его экологическую целесообразность [1, 2, 6]. Особенно актуально использовать данную схему при сушке пророщенных семян льна, покрытых теплоустойчивой оболочкой из глицерина, так как ведется непрерывный контроль параметров сушильного агента и корректируется работа оборудования в зависимости от изменяющихся факторов [4, 8, 9].

Проведенное параметрическое моделирование подтвердило, что настройка КР в диапазоне 55–65% является оптимальной, обеспечивая пиковую энергоэффективность и сохранение стабильности кипящего слоя. Технология позволяет не только существенно снизить энергозатраты предприятия, но и обеспечивает высокую скорость и равномерность сушки продукта, что критически важно для сохранения его биологической ценности и товарного вида.

Внедрение подобных схем целесообразно для предприятий, ориентированных на достижение высоких показателей как качественных, так и количественных, оптимизацию и автоматизацию трудно контролируемого процесса сушки функциональных продуктов питания.

Литература

- 1 Шевцов А.А., Ткач В.В. Вычислительный эксперимент в создании системы виртуального проектирования барабанных сушилок с тепловым насосом // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23
- 2 Румянцев А.А. Направления развития энергосбережения при вакуумной сушке растительных материалов // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 32–38.
- 3 Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В. Повышение энергоэффективности сушильной установки за счет применения термоэлектрических модулей // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18. № 2. С. 68–77. doi: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-68-77
- 4 Khare B., Sangwan V., Rani V. Influence of sprouting on proximate composition, dietary fiber, nutrient availability, antinutrient, and antioxidant activity of flaxseed varieties // Journal of Food Processing and Preservation. 2021. V. 45. № 4. P. e15344. doi: 10.1111/jfpp.15344
- 5 Байда Б.Ю. Эксергетическое и энергетическое исследование потенциала применения парокомпрессионного теплового насоса для утилизации бросовой теплоты пищевой промышленности // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации. 2022. С. 202–205.
- 6 Дадиомов Р.Ю., Шумихин А.Г., Корнилицин Д.К. Существующие подходы к автоматизации процесса сушки материалов в режиме кипящего слоя // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5 (89). С. 118–129.
- 7 Дранников А.В., Сухоруков Е.М. К вопросу применения процесса дражирования для пророщенных семян льна // Техническое обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30–31 октября 2025 г. Минск: БГАТУ, 2025. С. 298–301.
- 8 Kumar M., Sharma A., Singh O. Energy, exergy and environmental analysis of heat pump drying systems: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2024. V. 434. P. 139876. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139876
- 9 Joo Y., Chang S., Kim S.I., Oh S. Effect of drying kinetics model on energy efficiency of drying systems // Energy. 2024. V. 291. P. 130390. doi: 10.1016/j.energy.2024.130390
- 10 Liu Y., Wang X., Chen Z. Microencapsulation of germinated flaxseed extracts: Optimization of coating materials and drying conditions // Food Chemistry. 2024. V. 432. P. 137221. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137221

- 11 Martinez-Villaluenga C., Peñas E., Frias J. Germinated grains: A comprehensive review on nutritional profile, health benefits and processing // *Food Research International*. 2023. V. 164. P. 112345. doi: 10.1016/j.foodres.2022.112345
- 12 Kaveh M., Abbaspour-Gilandeh Y., Nowacka M. Comparison of different drying techniques and their carbon emissions in green peas // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2021. V. 160. P. 108274. doi: 10.1016/j.cep.2020.108274
- 13 Bangar S.P., Singh A., Trif M. et al. Process Parameter Optimization and Characterization for an Edible Film: Flaxseed Concern // *Coatings*. 2021. V. 11. № 9. P. 1106. doi: 10.3390/coatings11091106
- 14 Gregório M.G., Queiroz A.J.M., Figueirêdo R.M.F. et al. Influence of germination on the production of starchy and oleaginous flours: Evaluation of the drying process, thermodynamic properties and bioactive compounds // *Applied Food Research*. 2025. V. 5. № 2. P. 101096. doi: 10.1016/j.afres.2025.101096
- 15 Zhang Q., Liu Y., Wang H. Recent advances in cyclone separators for fine particle collection: A review // *Powder Technology*. 2024. V. 434. P. 119321. doi: 10.1016/j.powtec.2023.119321
- 16 Kaveh M., Abbaspour-Gilandeh Y., Nadimi M. et al. Review of advanced drying techniques: a path to lower greenhouse gas emissions in agriculture // *Discover Sustainability*. 2025. V. 6. P. 423. doi: 10.1007/s43621-025-01217-6
- 17 Dehghan-Manshadi A., Peighambaroust S.H., Azadmard-Damirchi S., Niakousari M. Effect of infrared-assisted spouted bed drying of flaxseed on the quality characteristics of its oil extracted by different methods // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. V. 100. № 1. P. 74–80. doi: 10.1002/jsfa.9995
- 18 Гусева Т.В., Тихонова И.О., Молчанова Я.П. Повышение ресурсной и экологической эффективности пищевой промышленности // *Актуальная биотехнология*. 2025. № 1. С. 26–30.
- 19 Salehi F. Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: A review // *International Journal of Fruit Science*. 2021. V. 21. № 1. P. 546–555. doi: 10.1080/15538362.2021.1911741
- 20 Loemba A.B.T., Kichonge B., Kivevele T. Comprehensive assessment of heat pump dryers for drying agricultural products // *Energy Science & Engineering*. 2023. V. 11. № 8. P. 2985–3014. doi: 10.1002/ese3.1326

References

- 1 Shevtsov A.A., Tkach V.V. Computational Experiment in the Creation of a Virtual Design System for Drum Dryers with a Heat Pump. *Bulletin of VSUET*. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23 (in Russian).
- 2 Rumyantsev A.A. Directions for the Development of Energy Saving in Vacuum Drying of Plant Materials. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2024. no. 4. pp. 32–38. (in Russian).
- 3 Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. Increasing the Energy Efficiency of a Drying Unit by Using Thermoelectric Modules. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. vol. 18. no. 2. pp. 68–77. doi: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-68-77 (in Russian).
- 4 Khare B., Sangwan V., Rani V. Influence of sprouting on proximate composition, dietary fiber, nutrient availability, antinutrient, and antioxidant activity of flaxseed varieties. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. vol. 45. no. 4. article e15344. doi: 10.1111/jfpp.15344.
- 5 Baida B.Yu. Exergetic and Energy Study of the Potential of Using a Vapor Compression Heat Pump for Waste Heat Recovery in the Food Industry. In: *65 Years of Donetsk State Technical Institute. Science and Practice. Current Issues and Innovations*. 2022. pp. 202–205. (in Russian).
- 6 Dadiomov R.Yu., Shumikhin A.G., Kornilitsin D.K. Existing Approaches to Automation of the Material Drying Process in a Fluidized Bed Mode. *Engineering Bulletin of the Don*. 2022. no. 5 (89). pp. 118–129. (in Russian).
- 7 Drannikov A.V., Sukhorukov E.M. On the Issue of Using the Dragee-Making Process for Germinated Flax Seeds. In: *Technical Support for Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Articles of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, October 30–31, 2025*. Minsk: BSATU, 2025. pp. 298–301. (in Russian).
- 8 Kumar M., Sharma A., Singh O. Energy, exergy and environmental analysis of heat pump drying systems: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2024. vol. 434. article 139876. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139876.
- 9 Joo Y., Chang S., Kim S.I., Oh S. Effect of drying kinetics model on energy efficiency of drying systems. *Energy*. 2024. vol. 291. article 130390. doi: 10.1016/j.energy.2024.130390.
- 10 Liu Y., Wang X., Chen Z. Microencapsulation of germinated flaxseed extracts: Optimization of coating materials and drying conditions. *Food Chemistry*. 2024. vol. 432. article 137221. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137221.
- 11 Martinez-Villaluenga C., Peñas E., Frias J. Germinated grains: A comprehensive review on nutritional profile, health benefits and processing. *Food Research International*. 2023. vol. 164. article 112345. doi: 10.1016/j.foodres.2022.112345.
- 12 Kaveh M., Abbaspour-Gilandeh Y., Nowacka M. Comparison of different drying techniques and their carbon emissions in green peas. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2021. vol. 160. article 108274. doi: 10.1016/j.cep.2020.108274.
- 13 Bangar S.P., Singh A., Trif M. et al. Process Parameter Optimization and Characterization for an Edible Film: Flaxseed Concern. *Coatings*. 2021. vol. 11. no. 9. article 1106. doi: 10.3390/coatings11091106.
- 14 Gregório M.G., Queiroz A.J.M., Figueirêdo R.M.F. et al. Influence of germination on the production of starchy and oleaginous flours: Evaluation of the drying process, thermodynamic properties and bioactive compounds. *Applied Food Research*. 2025. vol. 5. no. 2. article 101096. doi: 10.1016/j.afres.2025.101096.
- 15 Zhang Q., Liu Y., Wang H. Recent advances in cyclone separators for fine particle collection: A review. *Powder Technology*. 2024. vol. 434. article 119321. doi: 10.1016/j.powtec.2023.119321.
- 16 Kaveh M., Abbaspour-Gilandeh Y., Nadimi M. et al. Review of advanced drying techniques: a path to lower greenhouse gas emissions in agriculture. *Discover Sustainability*. 2025. vol. 6. article 423. doi: 10.1007/s43621-025-01217-6.

17 Dehghan-Manshadi A., Peighambaroust S.H., Azadmard-Damirchi S., Niakousari M. Effect of infrared-assisted spouted bed drying of flaxseed on the quality characteristics of its oil extracted by different methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. vol. 100. no. 1. pp. 74–80. doi: 10.1002/jsfa.9995.


18 Guseva T.V., Tikhonova I.O., Molchanova Ya.P. Increasing the Resource and Environmental Efficiency of the Food Industry. *Current Biotechnology*. 2025. no. 1. pp. 26–30. (in Russian).

19 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. pp. 546–555. doi: 10.1080/15538362.2021.1911741.


20 Loemba A.B.T., Kichonge B., Kivevele T. Comprehensive assessment of heat pump dryers for drying agricultural products. *Energy Science & Engineering*. 2023. vol. 11. no. 8. pp. 2985–3014. doi: 10.1002/ese3.1326.

Сведения об авторах


Алексей В. Дранников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, drannikov@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3060-8688>


Яна П. Домбровская к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yana_dombrovskaya@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2363-7648>

Евгений М. Сухоруков аспирант, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, suخورukov99.99@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0006-1798-2567>

Даниил Р. Кулигин студент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kuligin470@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-3133-4467>

Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors


Alexey V. Drannikov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, drannikov@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3060-8688>


Iana P. Dombrovskaya Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yana_dombrovskaya@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2363-7648>

Evgeniy M. Sukhorukov graduate student, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, suخورukov99.99@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0006-1798-2567>

Daniil R. Kuligin student, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kuligin470@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-3133-4467>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 15/12/2025	После редакции 13/01/2026	Принята в печать 23/02/2026
Received 15/12/2025	Accepted in revised 13/01/2026	Accepted 23/02/2026