

Научная статья

УДК 631.365.22

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-4-3-17

Моделирование процесса сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой

С.В. Шахов^{1*}, С.В. Роднищев¹, Д.В. Дмитриев², А.В. Жучков³, И.А. Глотова⁴¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж²Научно-производственное объединение Киноа Центр, Россия, Новокубанск³Конструкторское бюро механико-кибернетических систем, Россия, Воронеж⁴Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, Россия Воронеж

*s_shahov@mail.ru

Аннотация. Разрабатывали математическую модель процесса сушки семян киноа с использованием пилотной установки барабанной сушилки, в которой поперечная подача сушильного агента осуществляется через каналы насадки. На первом этапе рассмотрена физическая модель барабанной сушилки с канальной насадкой с двухступенчатой системой подачи теплоносителя. Суммарный воздушный поток проходит через высушиваемый материал в первой части барабана сверху вниз и насыщается парами воды, выделяемыми при его сушке. Двухступенчатая система подачи теплоносителя позволяет сократить расход воздуха, энергопотребление установки и время сушки. На втором этапе разработана математическая модель процесса сушки семян киноа, для которой были приняты следующие допущения: высота слоя высушиваемого материала в вертикальной аксиальной плоскости изменяется по линейному закону; температура частиц в барабане равна температуре мокрого термометра, а длина начального участка мала по сравнению с длиной барабана; весь теплоноситель, подаваемый в сушильный барабан, проходит через слой высушиваемого материала; перепад давления по теплоносителю в слое и канальной насадке одинаков в любом сечении по длине барабана. Выявлено, что скорость теплоносителя в слое по длине барабана увеличивается в связи с уменьшением гидравлического сопротивления системы «насадка–слой» из-за уменьшения высоты слоя высушиваемых семян. Влагосодержание теплоносителя, выходящего из слоя высушиваемых семян, по длине барабана уменьшается, а температура теплоносителя увеличивается. Внутри семян киноа устанавливается значительный градиент температуры. Такой подход к управляемой дегидратации семян киноа позволяет реализовать мягкие режимы, применение которых при прогреве капиллярно-пористых коллоидных материалов при различной температуре агента обработки обеспечивает не только сохранность природных свойств материалов, но и уменьшение расхода тепловой энергии от 10 до 15%.

Ключевые слова: сушка сельскохозяйственных культур; математическая модель; семена киноа; барабанная сушилка с канальной насадкой; процесс конвективной сушки

Original article

Modeling the drying process of quinoa seeds in drum dryer with channel nozzle

Sergey V. Shakhov^{1*}, Sergey V. Rodnischev¹, Dmitriy V. Dmitriev², Anatoly V. Zhuchkov³, Irina A. Glotova⁴¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia²Scientific and Production Association Quinoa Center, Novokubansk, Russia³Design Bureau of Mechanical and Cybernetic Systems, Voronezh, Russia⁴Voronezh State Agrarian University n.a. Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

*s_shahov@mail.ru

Abstract. The aim of the work is to develop a mathematical model for the process of drying quinoa seeds using a pilot installation of a drum dryer, in which the transverse supply of the drying agent is carried out through the nozzle channels. At the first stage, a physical model of a drum dryer with a channel packing with a two-stage coolant supply system is considered. The total air flow passes through the material to be dried in the first part of the drum from top to bottom and is saturated with water vapor released during its drying. The two-stage coolant supply system allows to reduce air consumption, energy consumption of the unit, and drying time. At the second stage, a mathematical model of the quinoa seed drying process was developed, for which the following assumptions were made: the height of the layer of the material to be dried in the vertical axial plane changes according to a linear law; the particle temperature in the drum is equal to the wet-bulb temperature and the length of the initial section is small compared to the drum length; all the coolant supplied to the drying drum passes through the layer of the material to be dried; the pressure drop across the coolant in the layer and the channel packing is the same in any section along the drum length. It was found that the speed of the heat carrier in the layer along the drum length increases due to a decrease in the hydraulic resistance of the packing – layer system due to a decrease in the height of the layer of dried seeds. The moisture content of the heat carrier leaving

the layer of dried seeds along the drum length decreases, and the temperature of the heat carrier increases. The significant temperature gradient is established inside the quinoa seeds. This approach to the controlled dehydration of quinoa seeds allows for the implementation of soft processing modes, the use of which when heating capillary-porous colloidal materials at different temperatures of the processing agent ensures not only the preservation of the natural properties of the materials but also a decrease in heat energy consumption from 10 to 15%.

Keywords: drying of agricultural crops; mathematical model; quinoa seeds; drum dryer with channel packing; convective drying process

Введение

В связи с устойчивыми изменениями климата, распространением зон рискованного земледелия на территории Центрально-Азиатского региона и южные регионы России, все большее внимание ученых и специалистов агропромышленного комплекса привлекает киноа (*Chenopodium quinoa* Willd.) в качестве многоцелевой промышленной культуры, которая является «одной из самых питательных продовольственных культур известных в настоящее время» [1].

Киноа позиционируется в качестве перспективной культуры для адаптации и интродукции в условиях Южного Приаралья и Краснодарского края Российской Федерации [1, 2]. Кластер киноа и продуктов его переработки активно формируется в Республике Казахстан [3, 4], включая разработку продукции функционального назначения [5]. В России производство и переработка киноа ориентирована на отечественные сорта, разработанные и запатентованные в ООО «НПО Квиноа Центр» (Новокубанск, Краснодарский край). На родине киноа, в Перу, ассортимент продуктов его переработки включает крупу, муку, экструдаты, печенье, напитки и т.д. Российский сектор АПК по переработке данной культуры ориентирован не только на продукты общего назначения с обогащенным составом, например ржаной хлеб, печенье и пирожные макаронс с добавлением семян или цельнозерновой муки киноа [6–8], но и продукты специализированного назначения [9].

Разнообразием технологических режимов переработки зерен киноа обусловлено проведение исследований термических характеристик биополимерных матриц при их дегидратации [10, 11]. Однако вопросы технического обеспечения процессов управляемой дегидратации семян киноа и продуктов их переработки разработаны недостаточно и требуют теоретического обоснования на основе физического и математического моделирования процессов обезвоживания мелкодисперсных термолабильных материалов применительно к современным единицам технологического оборудования. При этом для решения задач моделирования и оптимизации работы зерносушилок их необходимо рассматривать как сложные динамические системы, с разработкой схемных решений с использованием цифровых платформ [12].

Перспективным оборудованием для сушки мелкодисперсных термолабильных материалов в АПК и отраслях пищевой промышленности являются барабанные сушилки, позволяющие быстро и равномерно снижать влагосодержание обезвоживаемых материалов до заданных значений, не выходя за рамки допустимых изменений вкуса, цвета, пищевой ценности продукта. Специфика обезвоживания материала в барабанной сушилке состоит в том, что влажный материал подается во вращающийся барабан, где контактирует с горячим воздухом. По мере вращения барабана материал перемешивается, постоянно подвергаясь воздействию горячего воздуха. Непрерывное движение и воздействие тепла приводят к испарению влаги из материала, оставляя его в дегидратированном состоянии.

Для интенсификации сушки сыпучих материалов, например зерна, сахара-песка, сыпучих отходов пищевых производств (свекловичного жома, зерно-картофельной барды спиртовых заводов, кукурузных ростков и мезги на крахмалопаточных заводах) используют барабанные сушилки с канальной насадкой. Она способствует непрерывному перемешиванию материала и хорошему контакту с сушильным агентом (воздухом или топочными газами). Это позволяет снизить удельные затраты теплоты на сушку за счет адаптации установки к требованиям процесса (создания двух зон сушки вместо одной), а также более полно использовать сушильный потенциал воздуха благодаря удлинению его пути через материал и увеличению времени их контакта.

Авторами [13, 14] показано, что оснащение барабанных сушилок канальными насадками является фактором интенсификации процессов тепло- и массообмена при дегидратации капиллярно-пористых

сыпучих продуктов. Однако модельные представления о процессе сушки капиллярно-пористых тел ограничиваются начальным этапом структурной идентификации барабанной сушилки как объекта автоматизации в виде математической модели вида «черный ящик» [15], а перспективный подход к управлению процессом сушки сопряжен с решением обыкновенных дифференциальных уравнений, но реализован в работе [16] для барабанной сушилки, работающей в прямоточном режиме.

В работе [17] предложено математическое описание процесса сушки материалов в барабанных сушилках с использованием системы нелинейных уравнений в частных производных, которая моделирует нестационарный температурно-влажностный режим, а модели динамического анализа процесса реализованы в средах MathCad и Matlab Simulink с учетом распределения параметров по длине барабана. Среди различных математических моделей, описывающих сушку семян киноа, модель Midilli показала эффективность для описания кривых сушки, которую проводили в камере с принудительной циркуляцией воздуха при температурах 30, 40, 50°C, а объектом сравнения служил процесс сушки семян киноа в подвесном лотке в естественных условиях с использованием солнечной энергии [18].

Сушильные агрегаты как объекты управления обычно представляют собой нелинейные системы с распределенными параметрами. Для управления такими объектами необходимо решать системы уравнений теплообмена в реальном времени, что в большинстве случаев затруднительно [19].

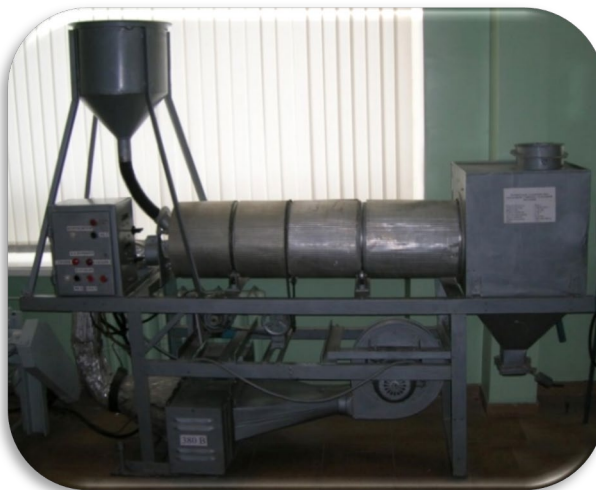
Авторами [20] при системном моделировании нестационарного процесса сушки в барабанной сушилке использованы представления о теплообмене «в кипящем слое влажных твердых тел, движущихся по цилиндрической поверхности», на примере семян подсолнечника в качестве объекта эксперимента. В работе [21] предложена математическая модель для расчета температурного поля компонентов объекта сушки, в качестве которого использован хлопок-сырец, и теплоносителя, в качестве которого использован воздух в прямоточном сушильном барабане. В основу математической модели положено решение краевой задачи параболического типа с использованием системы дифференциальных уравнений Галеркина. Однако недостаточное развитие теории для математического описания и управления процессами тепло- и массообмена перспективных объектов сушки, к которым относятся, в частности, семена киноа отечественной селекции, препятствует разработке, проектированию, внедрению в производство высокоэффективных барабанных агрегатов усовершенствованных конструкций.

Цель данной работы – разработать математическую модель процесса сушки семян киноа с использованием пилотной установки барабанной сушилки, в которой поперечная подача сушильного агента осуществляется через каналы насадки.

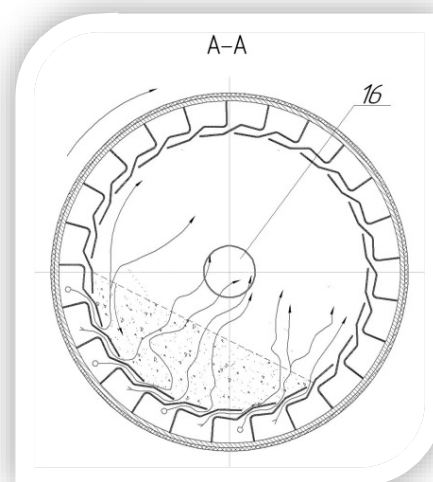
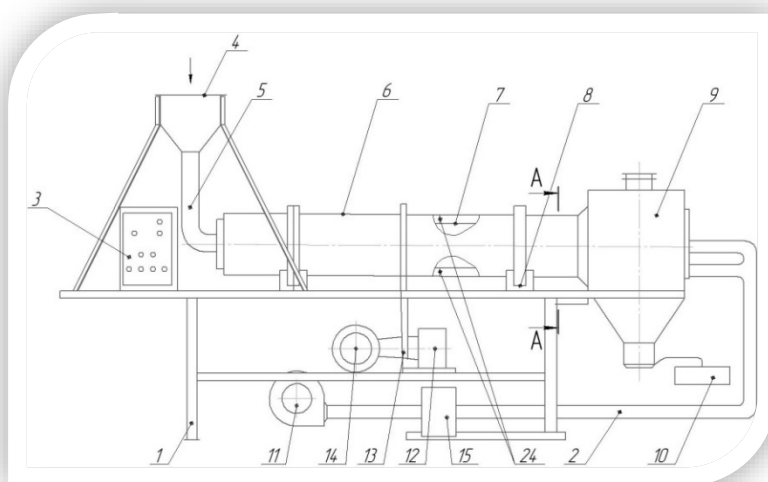
Объект моделирования

Объектом моделирования являлся процесс конвективной сушки семян киноа отечественной селекции НПО Квиноа Центр (Новокубанск, Россия) сорта Кади, урожая 2024 г. Для исследования процесса использовали барабанную сушилку с канальной насадкой [22, 23]. Пилотная установка показана на рисунке 1. Сушилка включает раму 1, нагнетающий трубопровод для теплоносителя 2, пульт управления 3, загрузочный бункер 4, патрубок подачи продукта 5, сушильный барабан 6, профильных канальные насадки 7, опорные ролики 8, разгрузочный бункер 9, датчик влажности 10, вентилятор 11, редуктор 12, цепную передачу 13, двигатель 14, калорифер 15, центральное отверстие для подачи свежего теплоносителя 16, продольные каналы 17, коллекторы 18, 19, входные отверстия 20, 21, выходные отверстия 22, 23, перегородку 24.

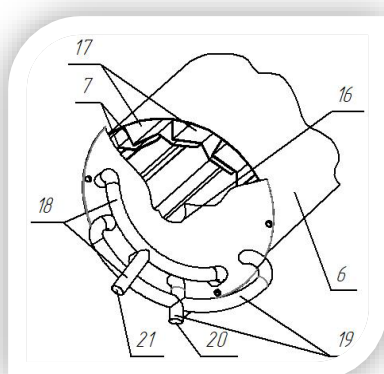
Барабан 6 (рисунок 1б) установлен с возможностью вращения при помощи бандажей, опорного и приводного ролика (не показаны). Устройство подачи нагретого воздуха примыкает к торцам продольных каналов 17 и неподвижно расположенную у загрузочного торца барабана (рисунок 1в) и представляет собой два 18, 19 и более коллектора (рисунок 1 г), каждый из которых соединен патрубками с отдельными источниками генерации нагретого воздуха (не показаны), а выходные отверстия 20, 21 коллекторов 18, 19 при этом чередуются. При этом нагнетающий трубопровод для теплоносителя 2 на два патрубка, один из которых соединен с коллекторами 18, 19, а другой с центральным отверстием для подачи свежего теплоносителя 16. Причем продольные каналы 17, в профильных канальных насадках 7 в средней части сушильного барабана разделены перегородкой 24.



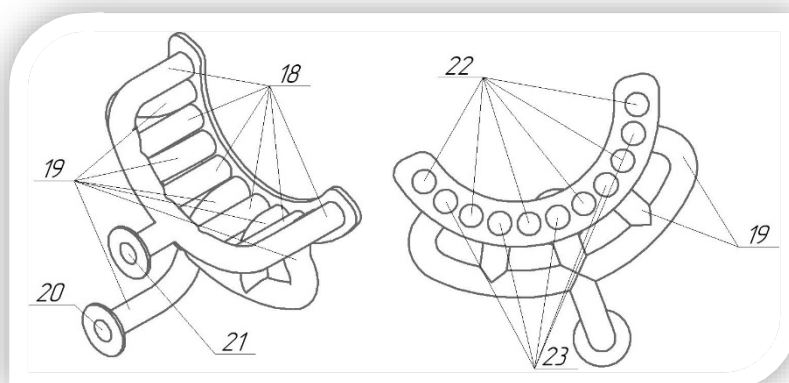
а



б



в



г

Рисунок 1 – Барабанная сушилка с канальной насадкой: а – пилотная установка; б – чертеж общего вида; в – трехмерный фрагмент барабана с канальной насадкой; г – общий трехмерный вид коллектора
Figure 1. Drum dryer with channel packing: а – pilot unit; б – general view drawing; в – three-dimensional fragment of drum with channel packing; г – general three-dimensional view of collector

Барабанная сушилка с канальной насадкой работает следующим образом. Высушиваемый материал через загрузочный бункер 4 поступает внутрь барабана 6 и размещается слоем на поверхности профильных канальных насадок 2, проходящих вдоль всего барабана 6 (рисунок 1г). При помощи

привода, включающего редуктор 12, цепную передачу 13 и двигатель 14 происходит вращение барабана 6, бандажи которого взаимодействуют с опорными роликами 8. Под действием вращения барабана 6 материал перемешиваясь, перемещается к разгрузочному торцу барабана, после чего сыпается в разгрузочную камеру 9, из которой удаляется за пределы сушилки. Одновременно в продольные каналы 17 подается теплоноситель в виде нагретого воздуха в противоположной стороне от загрузки материала. При этом продольные каналы 3 вращающегося барабана 6 примыкают к неподвижному устройству для подачи нагретого воздуха, расположенного таким образом (рисунок 1в), что подача нагретого воздуха происходит только через каналы, находящиеся под слоем материала (рисунок 1б) и чередуется с разной температурой и скоростью путем подачи из выходных отверстий 22, 23 двух 18, 19 и более (условно не показаны) коллекторов (рисунок 1 г), каждый из которых соединен с отдельными источниками генерации теплоносителя в виде, например нагретого воздуха. Теплоноситель, нагретый до температуры T_1 (устройства для нагрева и подачи нагретого воздуха условно не показаны) поступает со скоростью v_1 в подводящую часть одного из каналов 17, а теплоноситель нагретый до температуры T_2 со скоростью v_2 в соседний канал и через продольные щелевые отверстия между профильными канальными насадками 7 по их длине поступает под слой материала и под действием подающего устройства (например, вентилятора) проходит сквозь слой материала, высушивает его и выходит из слоя через его верхнюю поверхность с температурой T_3 (рисунок 1б). Таким образом, осуществление подачи в каналы 17 сушилки воздуха с различными температурами T_1 и T_2 и скоростями v_1 и v_2 обеспечивает более интенсивное влагоудаление при меньших затратах теплоты, чем сушка с постоянной температурой и скоростью воздуха.

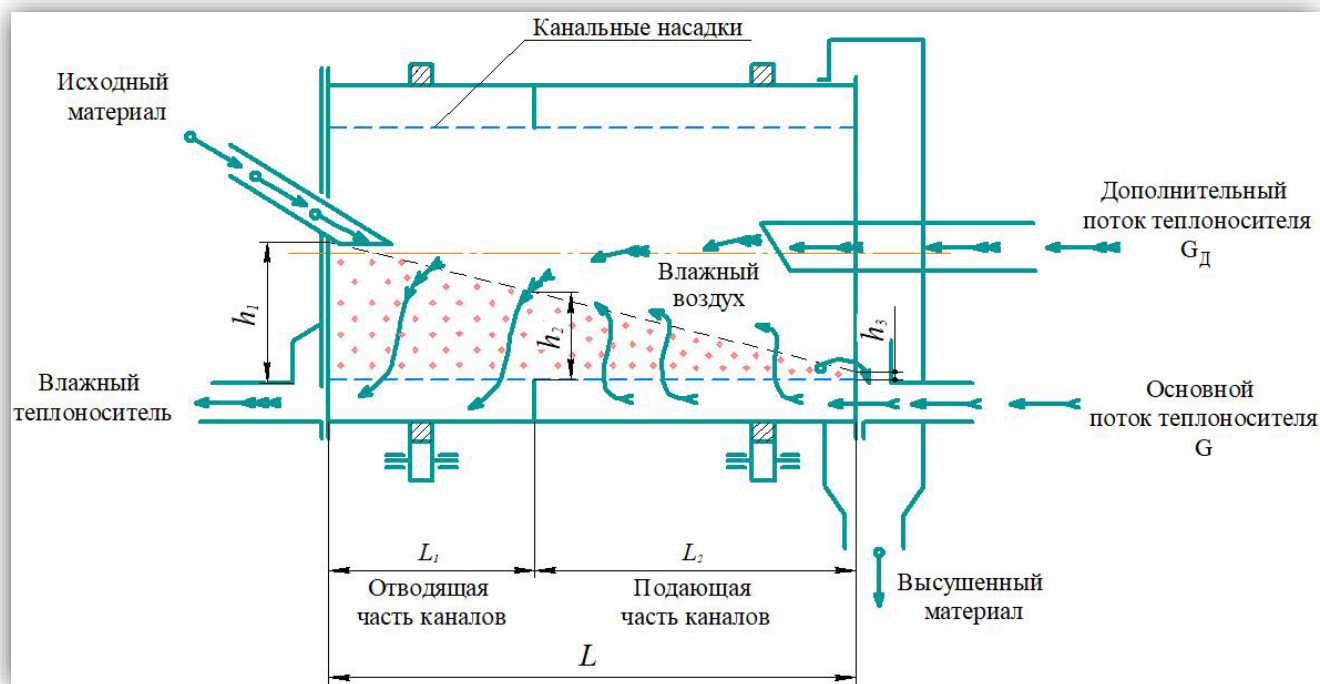
Теплоноситель подается под слой продукта через канальные насадки 7 до перегородки, расположенной в каналах 17. Температура теплоносителя по мере прохождения через слой незначительно падает, а его влагосодержание незначительно увеличивается. Это связано с тем, что на данном периоде сушки, соответствующей падающей скорости сушки удаляется связанная влага, содержащаяся в продукте в небольшом количестве. При выходе из слоя продукта поток теплоносителя в центральной части барабана перемешивается со свежим теплоносителем, дополнительно подаваемым в сушилку через центральное отверстие для подачи свежего теплоносителя 16. Суммарный теплоноситель имеющий высокий сушильный потенциал (высокую но допустимую температуру и небольшое влагосодержание) проходит через высушиваемый материал в первой (левой) части барабана сверху вниз, насыщается парами воды, выделяемыми при сушке материала, и удаляется через канальные насадки 7 после перегородки 24, расположенной в каналах 17.

С учетом рекомендаций [24, 25], для аналитических вычислений применяли программное обеспечение в пакете Mathcad.

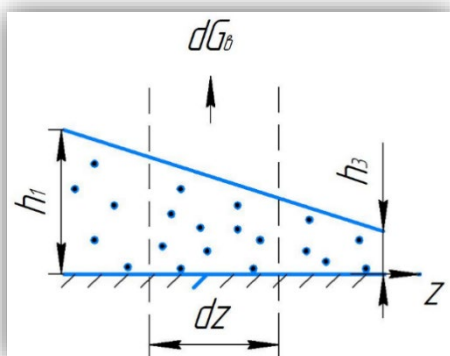
Физическая модель барабанной сушилки с канальной насадкой

Принципиальная схема барабанной сушилки представлена на рисунке 2а. Влажные семена подаются в левую часть барабана, постепенно перемещаются слева направо, и после достижения требуемой конечной влажности 8,0–8,5% выгружаются через разгрузочный бункер. Сушильный теплоноситель (подогретый воздух) поступает в барабан двумя потоками. Первый поток поступает под слой высушиваемого материала и фильтруется через него. Температура теплоносителя по мере прохождения через слой падает, а его влагосодержание увеличивается. Затем этот поток теплоносителя в центральной части барабана перемешивается со свежим воздушным потоком G_d , дополнительно подаваемым в сушилку. Суммарный воздушный поток ($G_1 = G + G_d$) проходит через высушиваемый материал в первой (левой) части барабана сверху вниз и насыщается парами воды, выделяемыми при сушке материала. Такая двухступенчатая система подачи теплоносителя позволяет сократить его расход, энергопотребление установки и время сушки.

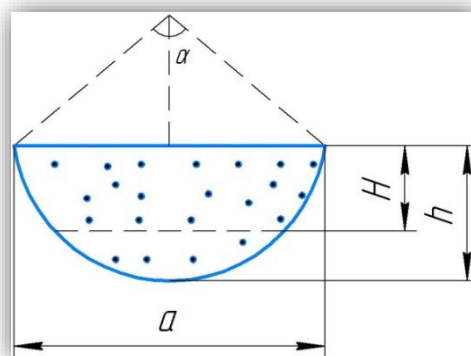
Чтобы сформулировать ряд допущений, необходимых для разработки математической модели процесса сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой, следует рассмотреть движение частиц высушиваемого материала в продольном и поперечном сечении сушильного барабана (рисунок 2б, в).



а



б



в

Рисунок 2 – Принципиальная схема барабанной сушилки (а); движение частиц высушиваемого материала в продольном (б) и поперечном сечении (в) барабана

Figure 2. Schematic diagram of a drum dryer (a); movement of particles of the dried material in the longitudinal (б) and cross-section (в) of the drum

Исходя из физической модели барабанной сушилки с канальной насадкой, моделирование процесса сушки выполнено при следующих допущениях:

- ✓ высота слоя высушиваемого материала в вертикальной аксиальной плоскости изменяется от h_1 до h_3 по линейному закону (рисунок 2б);
- ✓ температура частиц в барабане равна температуре мокрого термометра. Длина начального участка, на котором температура частиц меньше температуры мокрого термометра, мала по сравнению с длиной барабана;
- ✓ весь теплоноситель, подаваемый в сушильный барабан, проходит через слой высушиваемого материала;
- ✓ перепад давления по теплоносителю в слое и канальной насадке одинаков в любом сечении по z (рисунок 2б).

Математическая модель процесса сушки семян киноа

Поскольку высота слоя высушиваемого материала изменяется по z , скорость теплоносителя, проходящего через слой высушиваемого материала, так же будет зависеть от z . Общие потери давления в слое высушиваемого материала определяли соотношением [26]

$$\Delta P = 72 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu v}{d^2} \varphi (H + H_k), \quad (1)$$

где ε – порозность слоя;

μ – динамическая вязкость теплоносителя, Па·с;

v – скорость теплоносителя в слое (на свободное сечение), м/с;

d – эквивалентный диаметр высушиваемых частиц, м;

φ – коэффициент извилистости z каналов;

H – средняя в данном сечении высота высушиваемого материала (рисунок 2в), м;

H_k – эквивалентная высота канальной насадки, м.

Для определения эквивалентной высоты канальной насадки H_k использовали выражения потерь давления при движении теплоносителя в каналах:

$$\Delta P_k = \xi_k \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2)$$

$$\Delta P_k = 72 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu v}{d^2} \varphi H_k, \quad (3)$$

где ξ_k – коэффициент местных гидравлических потерь канала;

ρ – плотность теплоносителя, кг/м³.

Приравнявая (2) и (3) после преобразований получили

$$H_k = \frac{\xi_k \rho v \varepsilon^3 d^2}{144(1 - \varepsilon)^2 \mu \varphi}. \quad (4)$$

Найдем среднюю в сечении z высоту слоя H через ее значение в вертикальной аксиальной плоскости h из условия равенства площадей сегмента и прямоугольника

$$S = \frac{2}{3} a h, \quad (5)$$

$$S = a \cdot H, \quad (6)$$

где a – длина хорды сегмента, м.

Из выражений (5) и (6) следует

$$H = \frac{2}{3} h. \quad (7)$$

По мере снижения высоты слоя высушиваемых семян по длине барабана его гидравлическое сопротивление так же уменьшается, а скорость теплоносителя, проходящего через слой – увеличивается.

Распределение скорости фильтрации теплоносителя при движении через слой получаем из выражения (1) с учетом (7)

$$\Delta P = 48 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \varphi}{d^2} (h + h_k) \cdot v, \quad (8)$$

где h_k – эквивалентная высота каналов барабана, м

$$h_k = \frac{2}{3} H_k$$

или, с учетом (4)

$$h_k = 4,63 \cdot 10^{-3} \frac{\rho v \varepsilon^3 d^2}{(1 - \varepsilon)^2 \mu \varphi}.$$

Полагаем, что высота слоя семян изменяется по линейному закону. Для второго участка высота слоя определяется выражением

$$h(z_2) = h_2 - \frac{h_2 - h_3}{L_2} \cdot z_2, \quad (9)$$

где h_2 – высота слоя высушиваемых семян в аксиальной плоскости на границе между первым и вторым участками барабана, м;

h_3 – высота слоя высушиваемых семян в аксиальной плоскости на выходе из барабана, м;

L_2 – длина второго участка барабана, м;

z_2 – участок длины на втором участке барабана, м.

Из (8) получим выражение для скорости v с учетом (9)

$$v = \frac{C}{\left(h_2 - \frac{h_2 - h_3}{L_2} \cdot z_2 + H_k\right)}, \quad (10)$$

где

$$C = \frac{\Delta P \varepsilon^3 d^2}{48(1 - \varepsilon)^2 \mu \varphi}.$$

Величина $C = \text{const}$ – постоянна по длине слоя, поскольку постоянными остаются все величины в правой части.

Расход теплоносителя через элемент dz_2 слоя равен

$$dG = \rho v a \cdot dz, \quad (11)$$

$$a = 2\sqrt{Dh(z_2) - (h(z_2))^2}, \quad (12)$$

где a – длина хорды сегмента (рисунок 2б), м;

D – диаметр канала, м.

Подставляя (10) и (12) в (11), получили

$$dG = \frac{2\rho C}{h(z_2) + h_k} \sqrt{D \cdot h(z_2) - h(z_2)^2} \cdot dz_2.$$

Постоянную C определяли из условия нормировки:

$$G = \int_0^{L_2} \frac{2\rho C}{h(z_2) + h_k} \sqrt{D \cdot h(z_2) - h(z_2)^2} \cdot dz_2,$$

$$C = \frac{G}{\int_0^{L_2} \frac{2\rho}{h(z_2) + h_k} \cdot \sqrt{D \cdot h(z_2) - h(z_2)^2} \cdot dz_2}.$$

При известном C вычислили скорость теплоносителя в слое семян

$$v(z_2) = \frac{C}{h(z_2) + h_k}.$$

Уравнение теплового баланса для элемента $dz \cdot dy$ (рисунок 3а) имеет вид

$$\alpha_t(t - t_m) \cdot f \cdot a \cdot dz \cdot dy = -\rho v \cdot c_b \cdot dz \cdot a \cdot dt + \rho v \cdot r \cdot a \cdot dz \cdot dx, \quad (13)$$

где α_t – коэффициент теплоотдачи от поверхности частиц к теплоносителю, Вт/м·К;

t – текущая температура теплоносителя, К;

t_m – температура мокрого термометра (поверхности частиц), К;

f – удельная поверхность частиц, м²/м³;

a – длина хорды сегмента (рисунок 2б), м;

c_b – теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·К;

r – теплота испарения воды, Дж/кг;

x – влагосодержание теплоносителя, кг/кг.

Удельная поверхность частиц равна

$$f = \pi d^2 n, \quad (14)$$

где n – концентрация частиц

$$n = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\pi d^3}. \quad (15)$$

Разделив почленно уравнение (13) на $\rho v \cdot c_b \cdot dz \cdot a \cdot dy$ с учетом (14) и (15), получили

$$\frac{dt}{dy} = -A_1(t - t_m) + A_2 \cdot \frac{dx}{dy}, \quad (16)$$

где

$$A_1 = \frac{\alpha_T f}{c_B \rho v},$$

$$A_2 = \frac{r}{c_B},$$

Уравнение переноса массы (влаги) от высушиваемых семян

$$\rho v \frac{dx}{dy} = \frac{\beta f}{R_n T_c} (P_n - P_n), \quad (17)$$

где β – коэффициент массоотдачи с поверхности частиц, м/с;

R_n – газовая постоянная водяного пара, ($R_n = 461$ Дж/кг·К);

T_c – средняя температура теплоносителя в слое, К;

P_n – давление пара у поверхности твердых частиц, Па;

P_n – парциальное давление пара в теплоносителе, Па.

Парциальное давление пара в теплоносителе с его влагосодержанием связывает соотношение

$$x = 0,622 \frac{P_n}{P - P_n}, \quad (18)$$

где P – общее давление влажного теплоносителя в сушильной установке ($P = 10^5$ Па).

Выразим зависимость P_n от x из (18)

$$P_n = \frac{P \cdot x}{x + 0,622}. \quad (19)$$

Разделив уравнение (17) на ρv с учетом (19) получили

$$\frac{dx}{dy} = A_3 \left(P_n - \frac{Px}{x + 0,622} \right), \quad (20)$$

$$A_3 = \frac{\beta f}{R_n \cdot T_c \cdot \rho_B \cdot v_B},$$

где T_c – средняя температура теплоносителя, К.

Коэффициент теплоотдачи α_T от теплоносителя к твердым частицам определяли из критериальной формулы

$$Nu = 0,4 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)^{0,67} \cdot Pr^{0,33}, \quad (21)$$

где $Nu = \frac{\alpha_T d}{\lambda}$ – критерий Нуссельта;

$Re = \frac{vd}{\nu}$ – критерий Рейнольдса;

$Pr = \frac{\nu}{a_t}$ – критерий Прандтля;

λ – теплопроводность теплоносителя, Вт/м·К;

ν – кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с;

a_t – коэффициент температуропроводности теплоносителя м²/с.

Коэффициент массоотдачи β от поверхности частиц к теплоносителю определяли на основании аналогии между процессами тепло- и массообмена

$$Nu_D = 0,4 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)^{0,67} \cdot Sc, \quad (22)$$

где $Nu_D = \frac{\beta d}{D_d}$ – диффузионный критерий Нуссельта;

$Sc = \frac{\nu}{D_d}$ – критерий Шмидта;

D_d – коэффициент диффузии водяного пара в теплоносителе, м²/с.

Коэффициент диффузии водяного пара в теплоносителе определяли по средней температуре теплоносителя

$$D_d = D_0 \left(\frac{T_c}{T_0} \right)^{1,5}, \quad (23)$$

где $D_0 = 2,19 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент диффузии водяного пара в теплоносителе при нормальных условиях;

$T_0 = 273 \text{ К}$ – температура нормальных условий.

Систему дифференциальных управлений (16), (20) решали численно методом Эйлера на дискретной сетке с постоянным шагом Δy .

Дискретные аналогии этих управлений имеют вид

$$\frac{t_j - t_{j-1}}{\Delta y} = A_1(t_{j-1} - t_m) + A_2 \frac{x_j - x_{j-1}}{\Delta y}, \quad (24)$$

$$\frac{t_j - t_{j-1}}{\Delta y} = A_3 \left[P_H - \frac{\Pi \cdot x_{j-1}}{x_{j-1} + 0,622} \right], \quad (25)$$

где j – номер узла дискретной сетки по высоте слоя.

Соотношения (24), (25) позволили вычислить температуру t_j и влагосодержание x_j для последующего угла j , если известны значения этих параметров на предшествующем шаге:

$$x_j = x_{j-1} + \Delta y \cdot A_3 \left[P_H - \frac{\Pi \cdot x_{j-1}}{x_{j-1} + 0,622} \right], \quad (26)$$

$$t_j = t_{j-1} + \Delta y \cdot A_1[t_{j-1} - t_m] + A_2(x_j - x_{j-1}). \quad (27)$$

Расчеты производили в математическом пакете Mathcad, начиная со второго участка барабанной сушилки.

Определяли длину второго участка L_2 и высоту слоя семян h_2 на границе между первым и вторым участками

$$L_2 = L - L_1, \\ h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} \cdot L_1.$$

По формулам (21), (22) определяли распределение скорости теплоносителя по длине барабана $v(z_2)$.

Средняя скорость теплоносителя в слое семян на втором участке

$$v_{2, \text{cp}} = \frac{L}{L_2} \int_0^{L_2} v(z_2) \cdot dz_2.$$

Распределение коэффициентов тепло- и массоотдачи по длине барабана определяли из соотношений (21)–(23).

По формулам (26), (27) определяли распределение температуры t и влагосодержания x по высоте слоя.

В дальнейших расчетах использовали значения $t_h = t_{j1}$ и $x_h = x_{j1}$ на выходе из слоя высушиваемых семян.

Определяли средние значения температуры и влагосодержания теплоносителя, выходящего из высушиваемых семян:

$$t_{h, \text{cp}} = \frac{1}{i_2 + 1} \sum_{i=0}^{i_2} t_{h, i}, \\ x_{h, \text{cp}} = \frac{1}{i_2 + 1} \sum_{i=0}^{i_2} x_{h, i}.$$

Аналогично рассчитывали первый участок барабанной сушилки.

Абсолютная влажность высушиваемых семян на входе в барабан

$$U_H = \frac{W_H}{1 - W_H},$$

где W_H – начальная влажность семян, кг/кг.

Абсолютная влажность высушиваемых семян в конце первого участка барабана

$$U_2 = U_H - \frac{G_1}{G_{\text{сух}}} (x_{h1, \text{cp}} - x_1),$$

где G_1 – расход теплоносителя на первом участке сушилки, кг/с.

$$G_1 = G + G_d,$$

где G – массовый расход теплоносителя, кг/с;

G_d – массовый расход дополнительного потока теплоносителя, кг/с.

Расход сухих семян

$$G_{\text{сух}} = G_n(1 - W_n),$$

где G_n – расход влажных семян, кг/с.

Относительная влажность семян в конце первого участка барабана

$$W_2 = \frac{U_2}{1 - U_2},$$

Абсолютная влажность высушиваемых семян на выходе из барабана

$$U_3 = U_2 - \frac{G}{G_{\text{сух}}} (x_{\text{нсп}} - x_1),$$

Относительная влажность высушиваемых семян на выходе из барабана

$$W_3 = \frac{U_3}{1 - U_3}.$$

Результаты моделирования процесса сушки семян киноа и их обсуждение

Результаты моделирования процесса сушки семян киноа представлены на рисунках 3–5.

Из рисунка 3 видно, что длина участка L_1 , на котором скорость теплоносителя достигает максимального значения, равна 0,8 м, при общей длине L барабана 1,2 м.

Скорость теплоносителя в слое по длине барабана увеличивается (рисунок 3), что объясняется уменьшением гидравлического сопротивления системы «насадка–слой» из-за уменьшения высоты слоя высушиваемых семян.

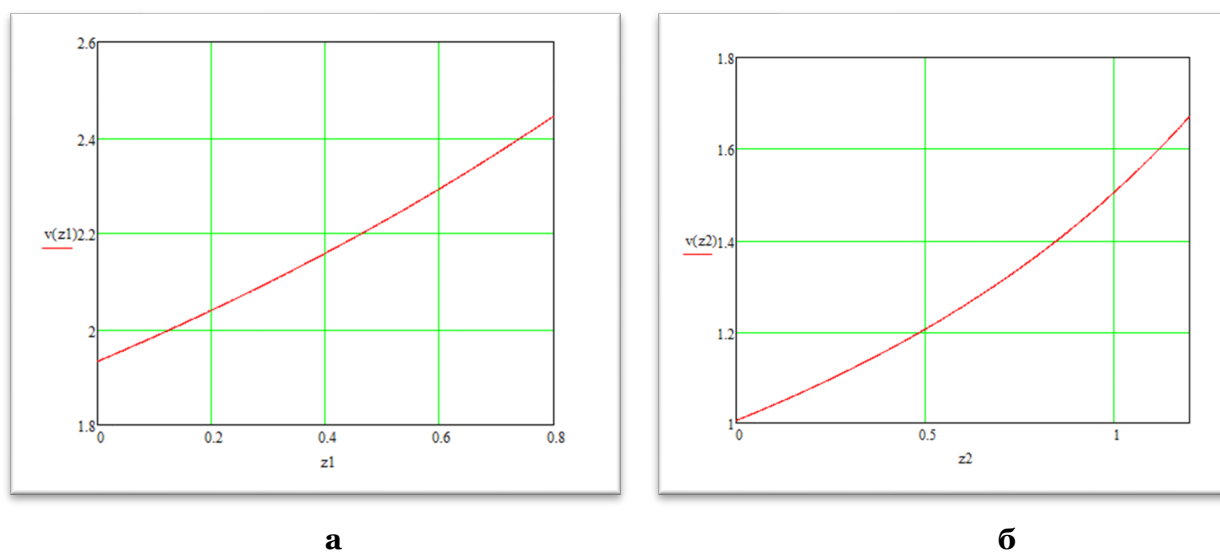


Рисунок 3 – Распределение скорости теплоносителя в слое семян киноа по длине барабана на первом (а) и втором (б) участках
Figure 3. Distribution of the heat carrier velocity in the quinoa seed layer along the length of the drum in the first (a) and second (б) sections

Влагосодержание теплоносителя, выходящего из слоя высушиваемых семян, по длине барабана уменьшается (рисунок 4), а температура теплоносителя – увеличивается (рисунок 5).

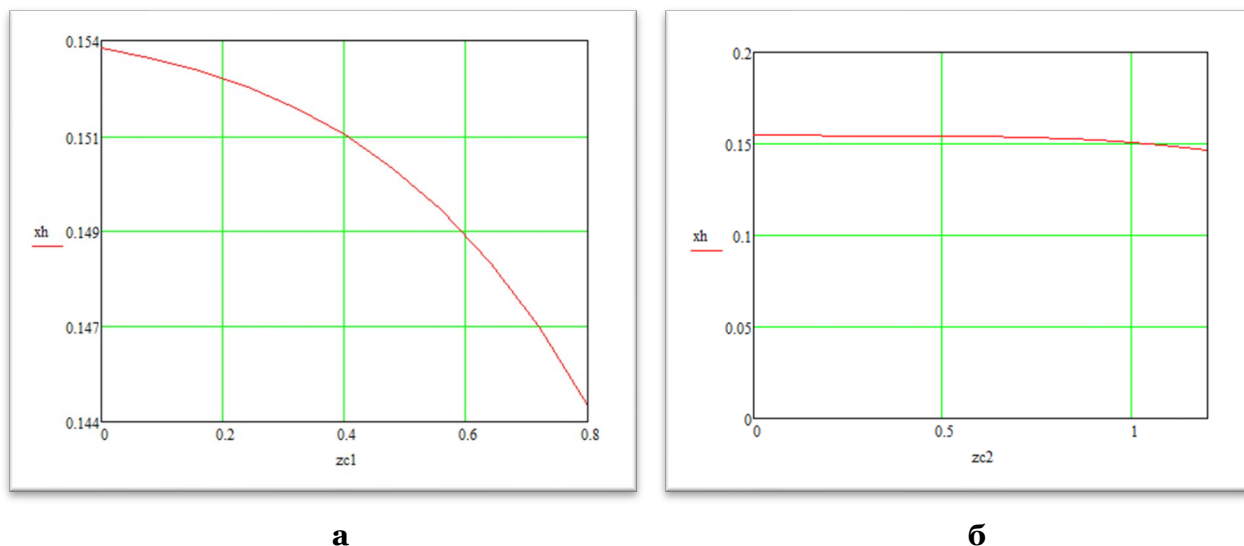


Рисунок 4 – Распределение влагосодержания семян киноа по длине барабана на первом (а) и на втором (б) участках

Figure 4. Distribution of moisture content of quinoa seeds along the length of the drum in the first (a) and second (б) sections

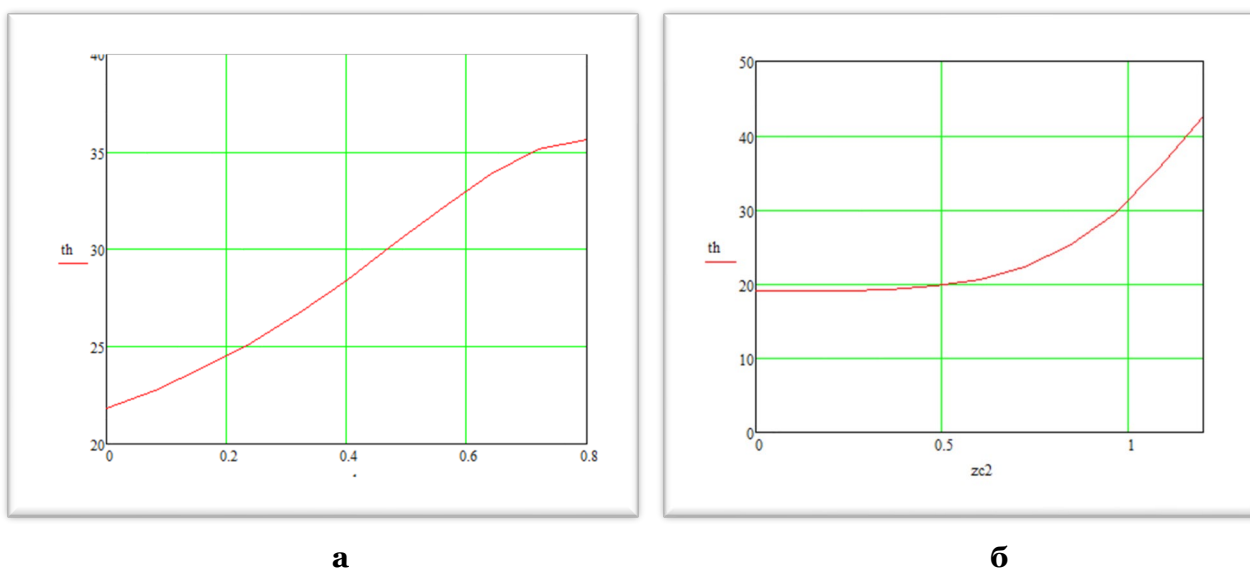


Рисунок 5 – Распределение температуры теплоносителя на выходе из слоя семян киноа по длине барабана первом (а) и втором (б) участках

Figure 5. Distribution of the coolant temperature at the outlet of the quinoa seed layer along the length of the drum in the first (a) and second (б) sections

Относительная влажность высушиваемых семян изменяется от $W_1 = 0,24$ до $W_3 = 0,10$, в конце первого участка она равна $W_2 = 0,164$.

Заключение

Исследования, проведенные посредством моделирования процесса сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой, продемонстрировали значительную эффективность данного оборудования. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования данного оборудования для обработки семян киноа путем управляемой их дегидратации, что обеспечивается оригинальным способом подачи теплоносителя через их слой в барабане. Теплоноситель, проходя через слой семян киноа, повышает свое влагосодержание до точки насыщения, затем смешивается с дополнительным теплоносителем и вторично перемещается через слой семян киноа. То есть увеличение пути контакта материала с теплоносителем обеспечивает его более высокое насыщение влагой и, соответственно, снижает потребность в расходе теплоносителя и теплоты на его нагрев. Для термолабильных материалов (например, зерновых культур) максимальная температура

подаваемого теплоносителя ограничена требованиями к качеству сухого материала, при этом обычно, чем выше его влажность, тем ниже допустимая температура. Поэтому температура подаваемого теплоносителя в известных установках является минимальной допустимой, что ведет к замедлению сушки и, тем самым, к снижению производительности сушилок. В предлагаемой модели сушки теплоноситель подается под слой материала, подсушенного в предшествующей (по ходу материала) части барабана. Соответственно его температура может быть выше, чем в известных аналогичных моделях процесса сушки в барабанной сушилке с канальной насадкой, что ускоряет сушку и повышает производительность установки, а также снижает удельные энергозатраты (известно, что с увеличением температуры удельный расход теплоты на сушку снижается). Таким образом преимущество моделируемого способа сушки заключается в создании в сушилке вместо одной двух зон сушки, обеспечивающих большее соответствие режима сушки требованиям оптимального проведения процесса, повышения температуры и снижения расхода теплоносителя, подаваемого в сушилку, более полного использования сушильного потенциала теплоносителя благодаря удлинению его пути через материал и, соответственно, увеличению времени их контакта.

Литература

1. Султанова З.С., Тодерич К.Н. Возделывание киноа в условиях южного Приаралья // Science Review. 2019. Т. 8. № 25. С. 16–18. DOI: 10.31435/rsglobal_sr/31102019/6749
2. Mendoza V., Mendoza R., Dmitriev D.V. Introduction and adaptation of quinoa varieties (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Krasnodar region of Russia. *Vegetable Crops of Russia*. 2023, no 6, pp. 117–122. DOI: 10.18619/2072-9146-2023-6-117-122
3. Гриднева Е.Е., Калиакпарова Г.Ш., Абдибеков С.У. Инновационная культура – киноа как альтернативный источник продуктов питания в Республике Казахстан // Проблемы агрорынка. 2023. № 3. С. 131–140. DOI: 10.46666/2023-3.2708-9991.13
4. Гриднева Е.Е., Калиакпарова Г.Ш. Организационно-экономический аспект формирования кластера киноа в Казахстане // Вестник университета «Туран». 2024. № 4. С. 35–48. DOI: 10.46914/1562-2959-2024-1-4-35-48
5. Иванникова Н.В., Умирбаева Ш.Д. Использование культуры киноа в производстве кисломолочного продукта функционального назначения // Механика и технологии. 2021. № 2. С. 69–74. DOI: 10.55956/OGPU1792
6. Закурдаева А.А., Емельянов А.М., Уйхо С.К., Расторгуева А.Е., Агаркова Д.В. Разработка рецепта ржаного хлеба с семенами тыквы, киноа и льном // Научная жизнь. 2025. Т. 20, № 1. С. 98–105. DOI: 10.35679/1991-9476-2025-20-1-98-105
7. Горшков В.В. Оценка качества мучных кондитерских изделий (печенье) с добавлением муки киноа // Grand Altai Research & Education. 2024. № 1. С. 35–42. DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2024.01
8. Солодовникова Г.А., Буховец В.А. Разработка пирожных макаронс с использованием цельнозерновой муки киноа и обоснование пищевой и энергетической ценности изделия // Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: сб. тр. Пенза: Пензенский гос. аграрн. ун-т, 2025. С. 235–240.
9. Леушкина Е.В., Донченко Л.В., Садовая Т.Н., Лукьяненко М.В., Чеботарева Е.Н. Перспективы применения киноа российской селекции, выращенной в условиях юга России, для питания военнослужащих // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2024. № 4. С. 17–24. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-4-17-24
10. Роднищев С.В., Шахов С.В., Перегончая О.В., Глотова И.А. Исследование продуктов переработки псевдозлаковых культур методом дифференциального термического анализа // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2024. Т. 21, № 6. С. 62–68.
11. Перегончая О.В., Глотова И.А., Роднищев С.В., Шахов С.В. Кинетические особенности термоллиза продуктов переработки киноа и амаранта // Технологии и экспертиза сельскохозяйственной продукции. 2025. № 1. С. 115–123. DOI: 10.53914/issn3034-6940_2025_1_115
12. Kerimov M., Belinskaia I., Kim O., Klochkov Yu., Evdokimov K. Optimization of grain dryer functioning modes as a complex dynamic system. *Proceedings on Engineering Sciences*. 2024, V. 6, no. 2, pp. 459–466. DOI: 10.24874/PES06.02.003
13. Ахунбаев А.А. Оптимизация формы насадки барабанных сушилок // Universum: технические науки. 2023. № 6–1. С. 21–26. DOI: 10.32743/UniTech.2023.111.6.15705.
14. Ткач В.В., Шевцов А.А. Виртуальный испытательный стенд для компьютерного проектирования барабанных сушилок по кинетическим закономерностям процесса сушки // Вестник Дагестанского гос. техн. ун-та. Технические науки. 2023. Т. 50. № 1. С. 152–160. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-152-160
15. Некрасов А.С., Ткаченко А.Е. Синтез математической модели САУ технологическими режимами сушильной барабанной печи // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сб. тр. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2022. С. 184–187.

16. Friso D. Mathematical modelling of rotary drum dryers for alfalfa drying process control. *Inventions*. 2023, V. 8, no. 1, article 11. DOI: 10.3390/inventions8010011
17. Котов Б., Мироненко В., Степаненко С., Грищенко В., Панцир Ю., Герасимчук И. Математическое моделирование процесса сушки материала в барабанной сушилке как объекта автоматического управления // Конструирование, производство и эксплуатация сельскохозяйственных машин: сб. тр. 2024. № 54, pp. 202–214. DOI: 10.32515/2414-3820.2024.54.202-214
18. Moscon E.S., Blum L.E.B., Spehar C.R., Martin S., Fagioli M., Dias Neto J.J. Kinetics and quality of quinoa seeds after drying and during storage. *Journal of Agricultural Science*. 2020, V. 12, no. 2, pp. 71–81. DOI: 10.5539/jas.v12n2p71
19. Artemova S.V., Kamenskaya M.A., Karasev P.I., Ershov N.S., Chien V. T., Domornikova A.A. A fuzzy control model of an intelligent information-measuring and control system of a drum drying unit. *Transactions of the Tambov State Technical University*. 2024, V. 30, no. 1, pp. 28–41. DOI: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.028-041
20. Antipov S., Klyuchnikov A., Panfilov V. System modelling of non-stationary drying processes. *Foods and Raw Materials*. 2019, V. 7, no. 1, pp. 93–106. DOI: 10.21603/2308-4057-2019-1-93-106
21. Mamatov A., Parpiev A., Shorakhmedova M. Mathematical model for calculating the temperature field of a direct-flow drying drum. *J Phys.: Conf. Ser.* 2021, V. 2131, article 052067. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052067
22. Антипов С.Т., Шахов С.В., Гавриленков А.М. Барабанная сушилка с канальной насадкой: пат. 2 367 865 С1 Российская Федерация. 2009. Бюл. № 26. 8 с.
23. Воронов С.С., Кузнецов И.В., Гавриленков А.М., Шахов С.В. Реализация осциллирующих режимов сушки в барабанном сушильном агрегате // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5–1. С. 161.
24. Аксютин И.В., Шапошников С.А. Программа для аналитического решения линейных дифференциальных уравнений в пакете Mathcad // Потенциал интеллектуально одаренной молодежи – развитию науки и образования: сб. тр. Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. Т. 12. С. 54–56.
25. Краморов А.В. Практическое применение математического пакета Mathcad при выполнении инженерных расчетов // Прикладная математика и фундаментальная информатика: сб. тр. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2019. Т. 3. № 1. С. 189–191.
26. Кретов И.Т., Парфенопуло М.Г., Шевцов А.А. Расчет процесса сушки зерна пшеницы в барабанной сушилке с профильной канальной насадкой // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 1992. № 5–6. С. 60–62.

References

1. Sultanova Z.S., Toderich K.N. Cultivation of quinoa in the conditions of the southern Aral Sea region. *Science Review*. 2019, V. 8, no. 25, pp. 16–18. DOI: 10.31435/rsglobal_sr/31102019/6749. (In Russian)
2. Mendoza V., Mendoza R., Dmitriev D.V. Introduction and adaptation of quinoa varieties (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Krasnodar region of Russia. *Vegetable Crops of Russia*. 2023, no 6, pp. 117–122. DOI: 10.18619/2072-9146-2023-6-117-122
3. Gridneva E.E., Kaliakparova G.Sh., Abdibekov S.U. Innovative crop – quinoa as an alternative food source in the Republic of Kazakhstan. *Problems of AgriMarket*. 2023, no 3, pp. 131–140. DOI: 10.46666/2023-3.2708-9991.13. (In Russian)
4. Gridneva E.E., Kaliakparova G.Sh., Gridneva Ye.E., Kaliakparova G.Sh. Organizational and economic aspect of forming a quinoa cluster in Kazakhstan. *Bulletin of "Turan" University*. 2024, no. 4, pp. 35–48. DOI: 10.46914/1562-2959-2024-1-4-35-48. (In Russian)
5. Ivannikova N.V., Umirbayeva S.D. The use of quinoa cereal in the production of a functional fermented dairy product. *Mechanics & Technologies*. 2021, no. 2, pp. 69–74. DOI: 10.55956/OGPU1792. (In Russian)
6. Zakurdaeva A.A., Yemelyanov A.M., Ushkho S.K., Rastorgueva A.E., Agarkova D.V. Development a recipe for rye bread with pumpkin seeds, quinoa and flax. *Scientific Life*. 2025, V. 20, no. 1, pp. 98–105. DOI 10.35679/1991-9476-2025-20-1-98-105. (In Russian)
7. Gorshkov V.V. Quality evaluation of flour confectionery products (cookies) with the addition of quinoa flour. *Grand Altai Research & Education*. 2024, no. 1, pp. 35–42. DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2024.01. (In Russian)
8. Solodovnikova G.A., Bukhovets V.A. Development of macaroni cakes using whole-grain quinoa flour and substantiation of the nutritional and energy value of the product. *Pishchevyte tekhnologii budushchego: innovacii v proizvodstve i pererabotke sel'skhozaystvennoj produkcii. Collection of works*. Penza, Penza State Agrarian University Publ., 2025, pp. 235–240. (In Russian)
9. Leushkina E.V., Donchenko L.V., Sadovaya T.N., Lukyanenko M.V., Chebotareva E.N. Prospects for use of quinoa of Russian selection, grown in the conditions of southern Russia, for the nutrition of military personnel. *Technologies of the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food*. 2024, no. 4, pp. 17–24. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-4-17-24. (In Russian)
10. Rodnishchev S.V., Shakhov S.V., Peregonchaya O.V., Glotova I.A. Study of processed products of pseudocereals by differential thermal analysis. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2024, V. 21, no 6, pp. 62–68. (In Russian)

11. Peregonchaya O.V., Glotova I.A., Rodnishchev S.V., Shakhov S.V. Kinetic features of thermolysis of products of processing of quinoa and amaranth. *Technologies and Expertise of Agricultural Products*. 2025, no. 1, pp. 115–123. DOI: 10.53914/issn3034-6940_2025_1_115. (In Russian)
12. Kerimov M., Belinskaia I., Kim O., Klochkov Yu., Evdokimov K. Optimization of grain dryer functioning modes as a complex dynamic system. *Proceedings on Engineering Sciences*. 2024, V. 6, no. 2, pp. 459–466. DOI: 10.24874/PES06.02.003
13. Akhunbaev A.A. Optimization of the shape of the nozzle of drum dryer. *Universum: Tekhnicheskie Nauki*. 2023, no. 6-1, pp. 21–26. DOI: 10.32743/UniTech.2023.111.6.15705. (In Russian)
14. Tkach V.V., Shevtsov A.A. Virtual test bench for computer-aided design of drum dryers based on kinetic laws of the drying process. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023, V. 50, no. 1, pp. 152–160. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-152-160. (In Russian)
15. Nekrasov A.S., Tkachenko A.E. Synthesis of a mathematical model of the automatic control system for technological modes of drying drum furnace. *Automatizaciya tekhnologicheskikh ob"ektov i processov. Poisk molodyh. Collection of works*. Donetsk, Donetsk National Technical University Publ. 2022, pp. 184–187. (In Russian)
16. Friso D. Mathematical modelling of rotary drum dryers for alfalfa drying process control. *Inventions*. 2023, V. 8, no. 1, article 11. DOI: 10.3390/inventions8010011
17. Kotov B., Mironenko V., Stepanenko S., Gryshchenko V., Pantsyr Yu., Gerasimchuk I. Mathematical modeling of the material drying process in a drum dryer as an object of automatic control. *Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines. Collection of Works*. 2024, Is. 54, pp. 202–214. DOI: 10.32515/2414-3820.2024.54.202-214. (In Ukrainian)
18. Moscon E., Blum L.E., Spehar C., Martin S., Marcelo F., Dias J. Kinetics and quality of quinoa seeds after drying and during storage. *Journal of Agricultural Science*. 2020, V. 12, no. 2, pp. 71–81. DOI: 10.5539/jas.v12n2p71
19. Artemova S.V., Kamenskaya M.A., Karasev P.I., Ershov N.S., Vu T., Domornikova A.A. A fuzzy control model of an intelligent information-measuring and control system of a drum drying unit. *Transactions of the Tambov State Technical University*. 2024, V. 30, no. 1, pp. 28–41. DOI: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.028-041
20. Antipov S., Klyuchnikov A., Panfilov V. System modelling of non-stationary drying processes. *Foods and Raw Materials*. 2019, V. 7, no. 1, pp. 93–106. DOI: 10.21603/2308-4057-2019-1-93-106.
21. Mamatov A., Parpiev A., Shorakhmedova M. Mathematical model for calculating the temperature field of a direct-flow drying drum. *J Phys.: Conf. Ser.* 2021, V. 2131, article 052067. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052067
22. Antipov S.T., Shakhov S.V., Gavrilencov A.M. Cylinder drier with channel nozzle. *Patent RF*, no. 2 367 865 C1. 2009.
23. Voronov S.S., Kuznetsov I.V., Gavrilencov A.M., Shakhov S.V. Implementation of oscillating drying modes in a drum drying unit. *Modern High Technologies*. 2014, no. 5-1, p. 161. (In Russian)
24. Aksyutina I.V., Shaposhnikov S.A. Program for analytical solution of linear differential equations in the Mathcad package. *Potentsial intellektual'no odarennoi molodezhi – razvitiyu nauki i obrazovaniya. Collection of Work*. Astrakhan, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering Publ. 2023, V. 12, pp. 54–56. (In Russian)
25. Kramorov A.V. Practical application of mathcad math package when performing engineering calculations. *Prikladnaya matematika i fundamental'naya informatika. Collection of Work*. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2019, V. 3, no. 1, pp. 189–191. (In Russian)
26. Kretov I.T., Parfenopulo M.G., Shevtsov A.A. Calculation of the process of drying wheat grain in a drum dryer with a profile channel nozzle. *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 1992, no. 5-6, pp. 60–62. (In Russian)

Информация об авторах

Сергей Васильевич Шахов – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств

Сергей Владимирович Роднищев – аспирант кафедры машин и аппаратов пищевых производств

Анатолий Витальевич Жучков – д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник

Ирина Анатольевна Глотова – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции

Information about the authors

Sergey V. Shakhov, D. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Machines and Apparatus for Food Production

Sergey V. Rodnishchev, Postgraduate Student, Department of Machines and Apparatus for Food Production

Anatoly V. Zhuchkov, D. Sc., Professor, Leading Researcher

Irina A. Glotova, D. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Storage and Processing of Agricultural Products

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 03.09.2025

Одобрена после рецензирования 17.10.2025

Принята к публикации 20.10.2025

The article was submitted 03.09.2025

Approved after reviewing 17.10.2025

Accepted for publication 20.10.2025