

Оптимизация режимов сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой

Сергей В. Роднищев	¹	sergey.2587@ya.ru	 0009-0006-3413-9782
Дмитрий В. Дмитриев	²	rosagro.kr@yandex.ru	 0009-0000-9947-174X
Игорь А. Бакин	³	bakin@rgau-msha.ru	 0000-0001-5678-1975
Сергей В. Шахов	¹	s_shahov@mail.ru	 0000-0002-5865-2357
Ирина А. Глотова	⁴	glotova-irina@ya.ru	 0000-0002-9991-1183
Александр С. Муравьев	¹	hntrun@mail.ru	 0000-0002-5989-0752

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

² ООО «НПО КВИНОА ЦЕНТР», ул. Кооперативная, 81, г. Новокубанск, Краснодарский край, 352240, Россия

³ Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия

⁴ Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных исследований первичных технологических процессов переработки семян киноа отечественной селекции на пилотной сушильной установке. Цель исследования – выявить рациональные значения параметров процесса послеуборочной сушки семян в барабанной сушилке непрерывного действия. Объектом исследований являлся процесс конвективной сушки семян киноа отечественной селекции НПО «КВИНОА ЦЕНТР», г. Новокубанск Краснодарского края, сорта Кади, урожая 2024 года. Эксперимент проведен на пилотной установке барабанной сушилки с канальными насадками для поперечной подачи сушильного агента. Изучено влияние на процесс основных технологических параметров (температура и расход теплоносителя, производительность по влажному материалу). Оптимизация сушки проводилась из условия минимизации удельных энергозатрат при достижении влажности семян киноа до 8,0–8,5 % на выходе из сушилки. Многокритериальная задача оптимизации решалась с использованием метода трехфакторного планирования эксперимента Бокса-Уилсона. Дисперсионный анализ проводился по методу ANOVA. Для анализа и визуализации экспериментальных данных использована методология поверхности отклика. Нахождение области оптимальных значений проводилось по функции желательности Харрингтона. Из анализа массива решений установлены рациональные интервалы значений входных факторов: температура теплоносителя на входе в барабан 323–325 град. К; расход теплоносителя 0,312–0,316 м³/с; производительность по влажным семенам 1583,8–1586,12 кг/ч. Применение указанных режимов удаления влаги из семян киноа обеспечивает минимизацию энергозатрат на процесс сушки при требуемых показателях хранения.

Ключевые слова: киноа отечественной селекции, послеуборочная обработка, интенсивный режим сушки, многокритериальная оптимизация.

Optimizing quinoa seed drying modes in a drum dryer with a channel nozzle

Sergey V. Rodnishchev	¹	sergey.2587@ya.ru	 0009-0006-3413-9782
Dmitrij V. Dmitriev	²	rosagro.kr@yandex.ru	 0009-0000-9947-174X
Igor A. Bakin	³	bakin@rgau-msha.ru	 0000-0001-5678-1975
Sergey V. Shakhov	¹	s_shahov@mail.ru	 0000-0002-5865-2357
Irina A. Glotova	⁴	glotova-irina@ya.ru	 0000-0002-9991-1183
Alexander S. Muravyev	¹	hntrun@mail.ru	 0000-0002-5989-0752

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

² LLC "Scientific and Production Association Quinoa Center", Cooperative st., 81 Novokubansk, Krasnodarskiy Territory, 352240, Russia

³ Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy Climent A. Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49 Moscow, 127434, Russia

⁴ Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina st., 1 Voronezh, 394087, Russia

Abstract. The article presents the results of experimental studies of primary technological processes for processing quinoa seeds of domestic selection on a pilot drying unit. The purpose of the study is to identify rational values of the parameters of the post-harvest seed drying process in a continuous drum dryer. The object of the study was the process of convective drying of quinoa seeds of domestic selection of NPO "KVINOA CENTER", Novokubansk, Krasnodar Territory, variety Kadi, harvest of 2024. The experiment was carried out on a pilot unit of a drum dryer with channel nozzles for transverse feeding of the drying agent. The influence of the main process parameters (temperature and flow rate of the heat carrier, productivity for wet material) on the process was studied.

Для цитирования

Роднищев С.В., Дмитриев Д.В., Бакин И.А., Шахов С.В., Глотова И.А., Муравьев А.С. Оптимизация режимов сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 95–105. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-95-105

For citation

Rodnishchev S.V., Dmitriev D.V., Bakin I.A., Shakhov S.V., Glotova I.A., Muravyev A.S. Optimizing quinoa seed drying modes in a drum dryer with a channel nozzle. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 95–105. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-95-105

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Drying optimization was carried out based on the condition of minimizing specific energy consumption when reaching the moisture content of quinoa seeds up to 8.0–8.5% at the outlet of the dryer. The multicriterial optimization problem was solved using the three-factor design of the Box-Wilson experiment. The dispersion analysis was carried out using the ANOVA method. The response surface methodology was used to analyze and visualize the experimental data. Finding the region of optimal values was carried out using the Harrington desirability function. Rational intervals of input factor values were established from the analysis of the array of solutions: heat carrier temperature at the inlet to the drum 323-325 deg. K; heat carrier flow rate 0.312-0.316 m³/s; productivity for wet seeds 1583.8-1586.12 kg/h. The use of these modes of moisture removal from quinoa seeds ensures the minimization of energy costs for the process drying at the required storage parameters.

Keywords: domestically bred quinoa, post-harvest processing, intensive drying mode, multi-criteria optimization.

Введение

Киноа (*Chenorodium Chenopodium quinoa Willd.*) считается культурой с высоким потенциалом для обеспечения глобальной продовольственной безопасности. Помимо традиционного использования её в виде крупы, перспективными продуктами переработки являются экстракты в виде порошкообразных концентратов, изолятов [1], а также экструдированных хлопьев [2]. Киноа продуцирует высококачественный белок с минимальным воздействием на окружающую среду, при этом дает хорошие урожаи в зоне с засушливыми и жаркими климатическими условиями, включая засоленные почвы [3, 4]. Это соответствует целям устойчивого развития, утвержденным Генеральной Ассамблеей ООН [5].

Для России киноа является новой перспективной высокобелковой культурой, которая относится к семейству амарантовые (*Amaranthaceae*) [1, 2, 6]. Родиной киноа являются склоны Анд в Южной Америке, ареал культивирования киноа по данным за 2018 год включает более 120 стран [7]. В России данная культура практически не распространена, известны единичные опыты по возделыванию, в частности на территории Краснодарского края. В компании ООО «Научно-производственное объединение КВИНОА ЦЕНТР» (г. Новокубанск Краснодарского края) изучены и выведены три отечественных сорта киноа [6].

В связи с фенологическими особенностями киноа послеуборочная обработка семян имеет особенности, по сравнению с другими белковыми культурами. Известно, что созревание киноа происходит постепенно, на протяжении периода от 90 до 220 дней, под влиянием погодных условий и других факторов [3]. Ранее установлено, что причиной изменчивости сроков созревания становится то, что у каждого растения киноа вырастает несколько метелок или ветвей, которые на одном и том же растении могут созревать в разное время [4]. Рекомендовано уборку семян проводить в фазе полной спелости зёрен, т. к. если собрать урожай слишком рано, киноа не будет готова, а в случае, если сделать это слишком поздно, семена могут осыпаться,

что приведёт к большим потерям [8]. При традиционной технологии послеуборочную сушку семян киноа проводят на воздухе или с использованием ленточных сушилок, что приводит к потерям зерна, в том числе из-за теплового повреждения, в связи со сложностью обеспечения оптимальных режимов процесса сушки [9].

С учетом результатов исследований по оптимизации формы насадок барабанных сушилок, имеются рекомендации по использованию канальных поверхностей, что позволяет интенсифицировать процесс дегидратации капиллярно-пористых сыпучих продуктов [10–12]. В то же время отсутствуют исследования, учитывающие конструктивные особенности барабанной сушилки с канальной насадкой, в связи с чем актуальны исследования по изучению и оптимизации технологических процессов послеуборочной сушки семян киноа с учетом агротехнических допусков.

Цель работы – выявить рациональные значения параметров процесса послеуборочной сушки семян в барабанной сушилке непрерывного действия.

Материалы и методы

Объектом исследований являлся процесс конвективной сушки семян киноа отечественной селекции НПО «КВИНОА ЦЕНТР», г. Новокубанск Краснодарского края, сорта Кади, урожая 2024 года. В исследовании процесс сушки рассматривался как элемент системы процессов послеуборочной обработки. Для интенсификации процесса сушки семян киноа в барабанной сушилке предложено использовать канальные насадки с поперечной подачей сушильного агента (рисунок 1). Исследования проводились на усовершенствованной конструкции барабанной сушильной установки с канальной насадкой [13]. Данное конструктивное решение показало возможность интенсификации процессов сушки в осциллирующих режимах для семян зерновых культур [14]. В исследованиях использовалась пилотная установка для изучения процесса сушки семян киноа в условиях, сочетающих преимущества шахтной сушилки и сушки мелкодисперсных объектов в активном

гидродинамическом режиме, с учетом термических характеристик биополимерных матриц продуктов переработки семян киноа [15, 16].

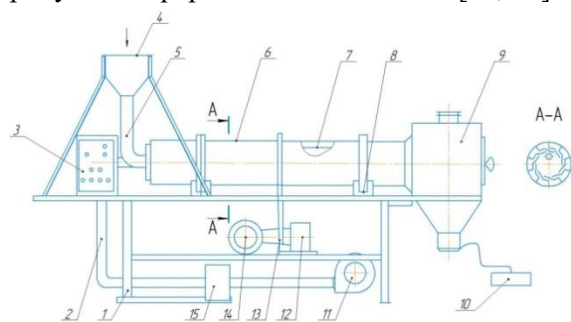


Рисунок 1. Общий вид барабанной сушилки с каналной насадкой: 1 – рама; 2 – трубопровод для теплоносителя; 3 – блок управления; 4 – бункер загрузки семян; 5 – патрубок подачи; 6 – барабан; 7 – каналная насадка; 8 – опорные ролики; 9 – бункер разгрузочный; 10 – датчик контроля влажности; 11 – вентилятор; 12 – редуктор; 13 – цепная передача; 14 – привод; 15 – калорифер

Figure 1. General view of a drum dryer with a channel nozzle: 1 – frame; 2 – discharge pipeline for coolant; 3 – control panel; 4 – loading hopper; 5 – product supply pipe; 6 – drying drum; 7 – channel nozzles; 8 – support rollers; 9 – unloading hopper; 10 – humidity sensor; 11 – fan; 12 – gearbox; 13 – chain drive; 14 – engine; 15 – heater

В проведенном исследовании многокритериальная задача оптимизации решалась с использованием метода Бокса–Уилсона, с реализацией матрицы трехфакторного планирования эксперимента с верхней и нижней «звездными» точками [17]. Результаты эксперимента обрабатывались в системе программирования *Mathcad*, используя встроенные функции, позволяющие анализировать данные статистическими методами регрессионного и корреляционного анализа. Полученные данные обрабатывались с использованием методологии поверхности отклика [18, 19]. Для проведения процедуры дисперсионного анализа результатов эксперимента и статистической оптимизации применялся программный модуль ANOVA [20]. Таблицы дисперсионного анализа использовались для обобщения результатов, при этом определялись статистически значимые различия (p -значение принималось равным 0,05) между средними значениями в независимых группах расчетных и экспериментальных данных [21].

Статистический анализ предусматривал построение математической модели с получением функций отклика в виде зависимостей $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ и $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ с учетом межфакторных взаимодействий на основе аппроксимации данных численного эксперимента. Для проведения процедуры регрессионного анализа и получения полиномиальных моделей второго порядка использовался ранее

апробированный статистический подход [22]. Далее строились поверхности отклика в виде трехмерного изображения и контуров на плоскости, по которому делалось предположение о необходимости учета межфакторных взаимодействий.

Метод поиска оптимума в виде комбинации числовых значений уровней количественных факторов на основе пошаговой процедуры движения к точке оптимума включал нахождение области оптимальных значений с использованием функции желательности Харрингтона (D) [23].

В экспериментальных исследованиях в качестве варьируемых факторов изучались: температура теплоносителя на входе в сушильный барабан (X_1 , град. К); объемный расход теплоносителя (X_2 , м³/с); производительность по влажным семенам, (X_3 , кг/ч). Поиск оптимальных параметров производился из условия минимизации удельных энергозатрат для достижения влажности семян на выходе из сушилки в пределах значений 8,0–8,5 %. Для выбранных факторов производилась проверка отсутствия корреляции. Пределы факторов в натуральных значениях приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Пределы изменения входных факторов процесса сушки

Table 1.

Limits of input factors changes of the drying process

Условия планирования Planning conditions	Кодированное значение Coded values	Значения факторов в точках плана Values		
		X_1	X_2	X_3
		T_e, K	$V_e, m^3/c$	$G_m, kg/h$
Основной уровень Main level	0	324,0	0,315	1945
Интервал варьирования Variation interval	Δ	8,0	0,045	215
Верхний уровень Upper level	+1	332,0	0,36	2160
Нижний уровень Lower level	-1	316,0	0,27	1730
Верхняя «звездная» точка Upper "star" point	+1,680	337,4	0,39	2306
Нижняя «звездная» точка Lower "star" point	-1,680	310,6	0,24	1584

Критериями оценки влияния входных факторов на процесс сушки являлись: Y_1 – влажность высушенного продукта, %; Y_2 – удельные энергозатраты на 1 кг готовой продукции, (кВт×ч/кг).

Результаты и обсуждение

На первом этапе в конструкции пилотной сушильной установки реализован план эксперимента сушки семян киноа из 20 опытов (таблица 2).

Результаты проведенного дисперсионного анализа полученных экспериментальных данных приведены в таблицах 3–4.

Таблица 2.

Матрица планирования и результаты экспериментов

Table 2.

Planning matrix and experimental results

№	Кодированные значения факторов Coded factor values			Натуральные значения факторов Natural factor values			Влажность высушенного продукта Y_1 , % Moisture content of dried product Y_1 , %	Удельные энергозатраты Y_2 , (кВт×ч/кг) Specific energy consumption Y_2 , (kWh/kg)
	X_1	X_2	X_3	$T_в, K$	$V_в, м^3/с$	$G_{вм}, кг/ч$		
1	-1,000	-1,000	-1,000	316	0,27	1730	10,13	0,2486
2	1,000	-1,000	-1,000	332	0,27	1730	10,32	0,2676
3	-1,000	1,000	-1,000	316	0,36	1730	7,835	0,3163
4	1,000	1,000	-1,000	332	0,36	1730	8,351	0,3553
5	-1,000	-1,000	1,000	316	0,27	2160	13,8	0,3431
6	1,000	-1,000	1,000	332	0,27	2160	12,08	0,4021
7	-1,000	1,000	1,000	316	0,36	2160	9,783	0,3608
8	1,000	1,000	1,000	332	0,36	2160	8,404	0,4398
9	1,680	0,000	0,000	337,44	0,315	1945	9,574	0,4097
10	-1,680	0,000	0,000	310,56	0,315	1945	10,58	0,3274
11	0,000	1,680	0,000	324	0,3906	1945	7,721	0,4075
12	0,000	-1,680	0,000	324	0,2394	1945	12,74	0,3191
13	0,000	0,000	1,680	324	0,315	2306,2	11,49	0,3687
14	0,000	0,000	-1,680	324	0,315	1583,8	8,37	0,2183
15	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
16	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
17	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
18	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
19	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
20	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428

Таблица 3.

Таблица дисперсионного анализа ANOVA для квадратичной модели сушки (Y_1)

Table 3.

ANOVA table for quadratic model of dried product moisture content (Y_1)

Индекс Index	Сумма квадратов отклонений Sum of squared deviations	Количество степеней свободы (df) Degrees of freedom (df)	Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	F-значение F value	p-значение p value
Модель Model	46,96	9	5,22	$1,645 \times 10^6$	<0,0001
X_1	1,22	1	1,22	$3,853 \times 10^5$	<0,0001
X_2	30,47	1	30,47	$9,607 \times 10^6$	<0,0001
X_3	11,77	1	11,77	$3,711 \times 10^6$	<0,0001
$X_1 X_2$	0,0556	1	0,0556	17536,49	<0,0001
$X_1 X_3$	1,81	1	1,81	$5,707 \times 10^5$	<0,0001
$X_2 X_3$	1,47	1	1,47	$4,635 \times 10^5$	<0,0001
X_1^2	0,0306	1	0,0306	9645,23	<0,0001
X_2^2	0,1452	1	0,1452	45781,09	<0,0001
X_3^2	0,0005	1	0,0005	159,85	<0,0001

Таблица 4.

Таблица дисперсионного анализа ANOVA для квадратичной модели удельных энергозатрат (Y_2)

Table 4.

ANOVA table for the quadratic model of specific energy consumption of finished product (Y_2)

Индекс Index	Сумма квадратов отклонений Sum of squared deviations	Количество степеней свободы (df) Degrees of freedom (df)	Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	F-значение F value	p-значение p value
Модель Model	0,0543	9	0,0060	$8,371 \times 10^6$	<0,0001
X_1	0,0082	1	0,0082	$1,137 \times 10^7$	<0,0001
X_2	0,0095	1	0,0095	$1,314 \times 10^7$	<0,0001
X_3	0,0273	1	0,0273	$3,795 \times 10^7$	<0,0001
$X_1 X_2$	0,0002	1	0,0002	$2,777 \times 10^5$	<0,0001
$X_1 X_3$	0,0008	1	0,0008	$1,111 \times 10^6$	<0,0001
$X_2 X_3$	0,0013	1	0,0013	$1,736 \times 10^6$	<0,0001
X_1^2	0,0012	1	0,0012	$1,659 \times 10^6$	<0,0001
X_2^2	0,0008	1	0,0008	$1,051 \times 10^6$	<0,0001
X_3^2	0,0044	1	0,0044	$6,089 \times 10^6$	<0,0001

Как следует из таблиц 3–4 значения критерия Фишера (F-значения) для статистических моделей Y_1 и Y_2 равны соответственно 1.645×10^6 и 8.371×10^6 , т. е. обе модели статистически значимы, при рассчитанных значениях коэффициентов для выбранного квадратичного уравнения регрессии. Оценка адекватности моделей, проведенная с использованием коэффициента детерминации R^2 , показала, что значение прогнозируемого R^2 , равного 1,00, хорошо согласуется со скорректированным табличным значением R^2 .

После статистической обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии, с учетом значимости коэффициентов, описывающие процесс при воздействии выбранных для исследования факторов, в виде выражений:

$$Y_1 = 9,94 - 0,29X_1 - 1,49X_2 + 0,92X_3 + 0,08X_1X_2 - 0,47X_1X_3 - 0,42X_2X_3 + 0,04X_1^2 + 0,11X_2^2 - 0,01X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,342 + 0,024X_1 + 0,026X_2 + 0,044X_3 + 0,004X_1X_2 + 0,01X_1X_3 - 0,012X_2X_3 + 0,009X_1^2 + 0,007X_2^2 - 0,017X_3^2 \quad (2)$$

Для анализа и визуализации экспериментальных данных использована методология поверхности отклика. Графическая интерпретация уравнений (1) и (2), на основе которых определяются эффекты взаимодействия и влияния входных факторов $X_i, i = \overline{1,3}$ на выходные Y_1 и Y_2 , приведены на рисунках 2–7.

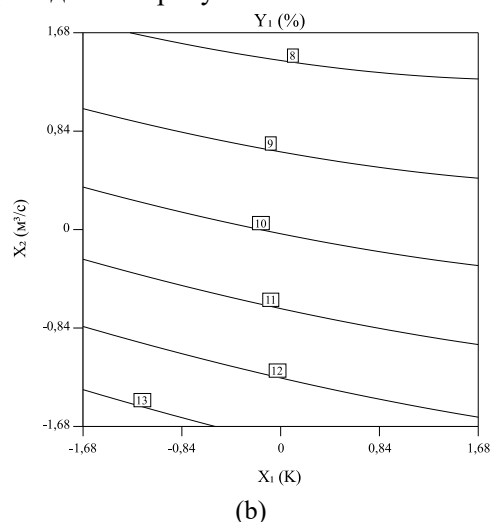
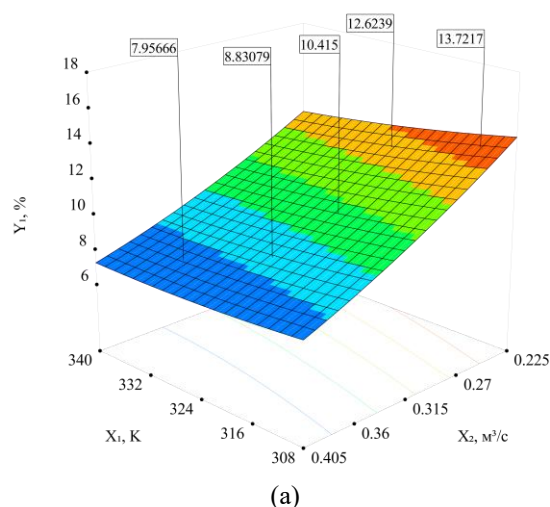


Рисунок 2. Совместное влияние на влажность высушенного продукта (Y_1 , %) температуры теплоносителя на входе в барабан (X_1 , К) и расхода теплоносителя (X_2 , м³/с): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 2. Combined effect of the temperature of the coolant at the drum inlet (X_1 , K) and the coolant flow rate (X_2 , m³/s) on the humidity of the dried product (Y_1 , %): а – response surface; б – curves of equal values

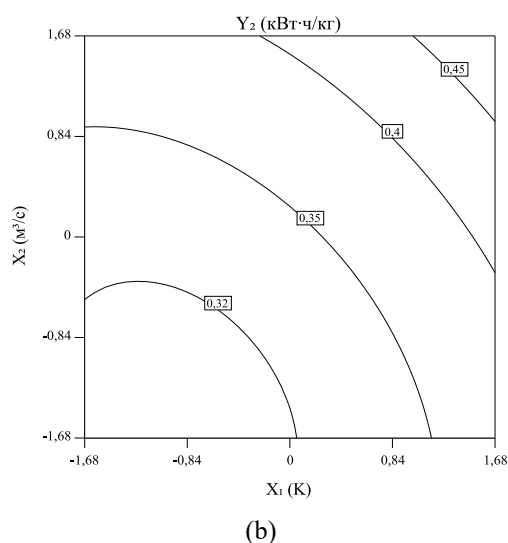
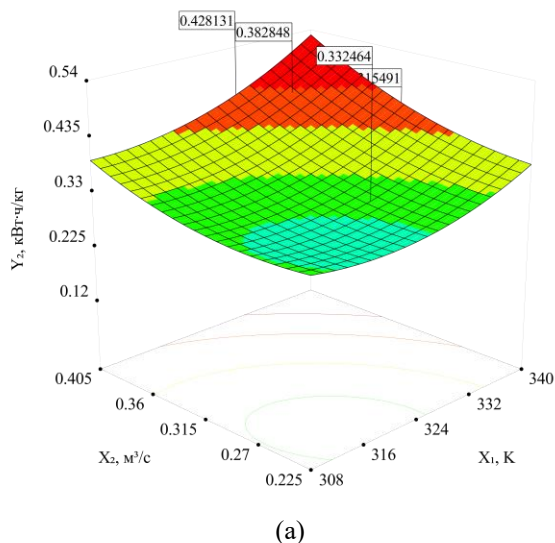


Рисунок 3. Совместное влияние на удельные энергозатраты на 1 кг готовой продукции (Y_2 , кВт·ч/кг) температуры теплоносителя на входе в барабан (X_1 , К) и расхода теплоносителя (X_2 , м³/с): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 3. Combined effect on specific energy consumption per 1 kg of finished product (Y_2 , kW·h/kg) of the coolant temperature at the drum inlet (X_1 , K) and the coolant flow rate (X_2 , m³/s): а – response surface; б – curves of equal values

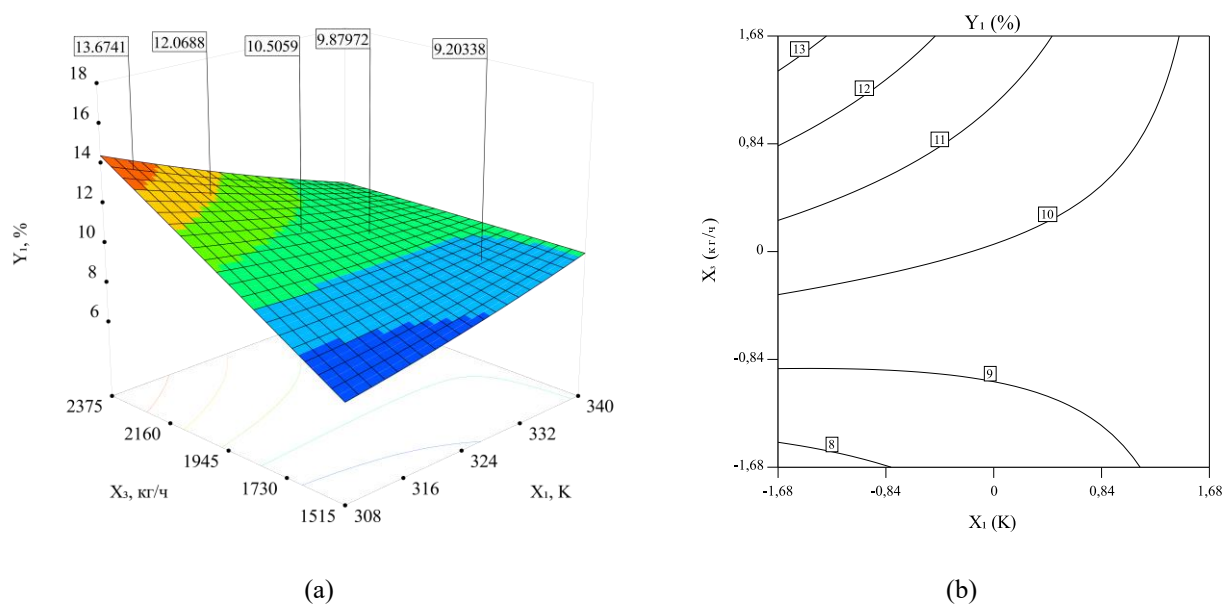


Рисунок 4. Совместное влияние на влажность высушенного продукта (Y_1 , %) температуры теплоносителя на входе в барабан (X_1 , K) и расхода влажного материала на входе в сушилку (X_3 , кг/ч): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 4. Combined effect of the temperature of the coolant at the drum inlet (X_1 , K) and the flow rate of wet material at the dryer inlet (X_3 , kg/h) on the humidity of the dried product (Y_1 , %): а – response surface; б – equal value curves

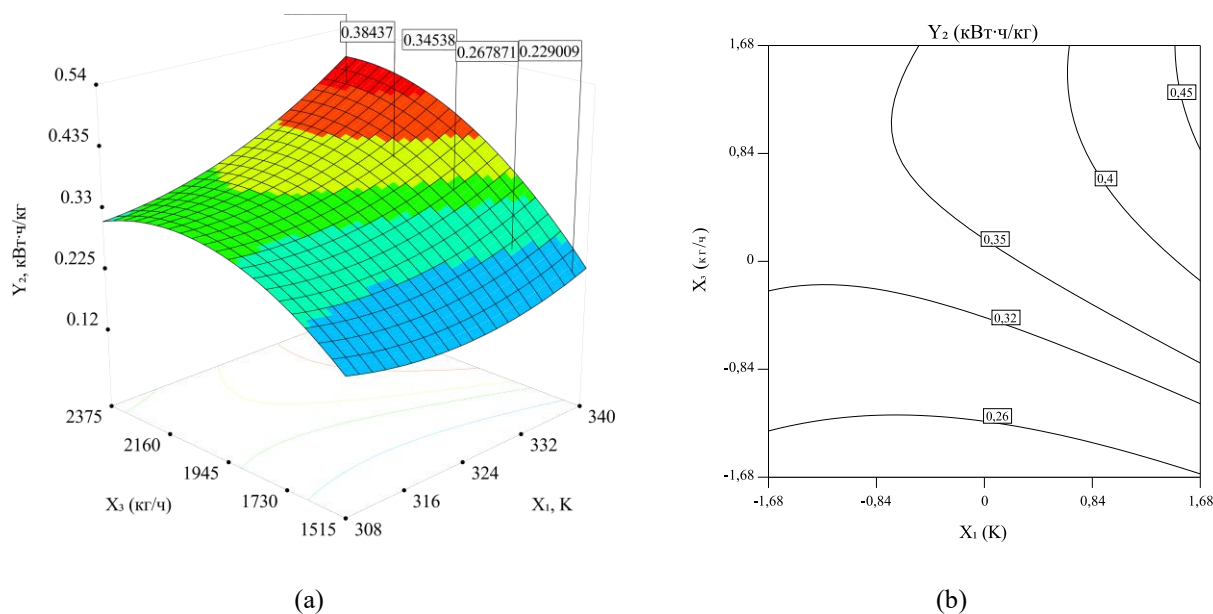


Рисунок 5. Совместное влияние на удельные энергозатраты на 1 кг готовой продукции (Y_2 , кВт·ч/кг) температуры теплоносителя на входе в барабан (X_1 , K) и расхода влажного материала на входе в сушилку (X_3 , кг/ч): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 5. Combined effect on specific energy consumption per 1 kg of finished product (Y_2 , kW·h/kg) of the coolant temperature at the drum inlet (X_1 , K) and the flow rate of wet material at the dryer inlet (X_3 , kg/h): а – response surface; б – equal value curves

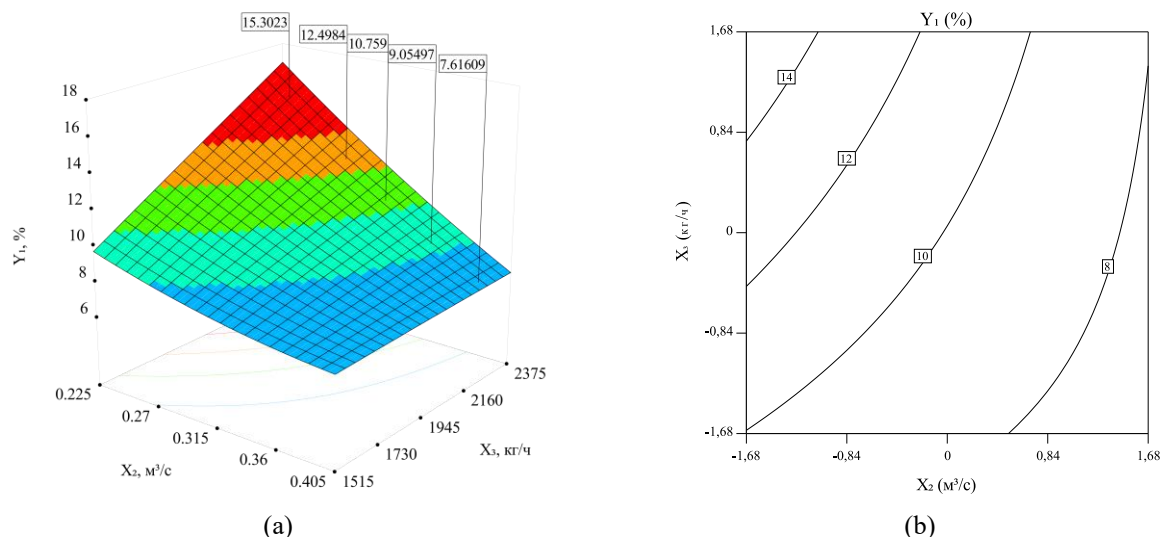


Рисунок 6. Совместное влияние на влажность высушенного продукта (Y_1 , %) расхода теплоносителя (X_2 , м³/с) и расхода влажного материала на входе в сушилку (X_3 , кг/ч): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 6. Combined effect of heat carrier flow rate (X_2 , m³/s) and wet material flow rate at the dryer inlet (X_3 , kg/h) on the humidity of the dried product (Y_1 , %): а – response surface; б – equal value curves

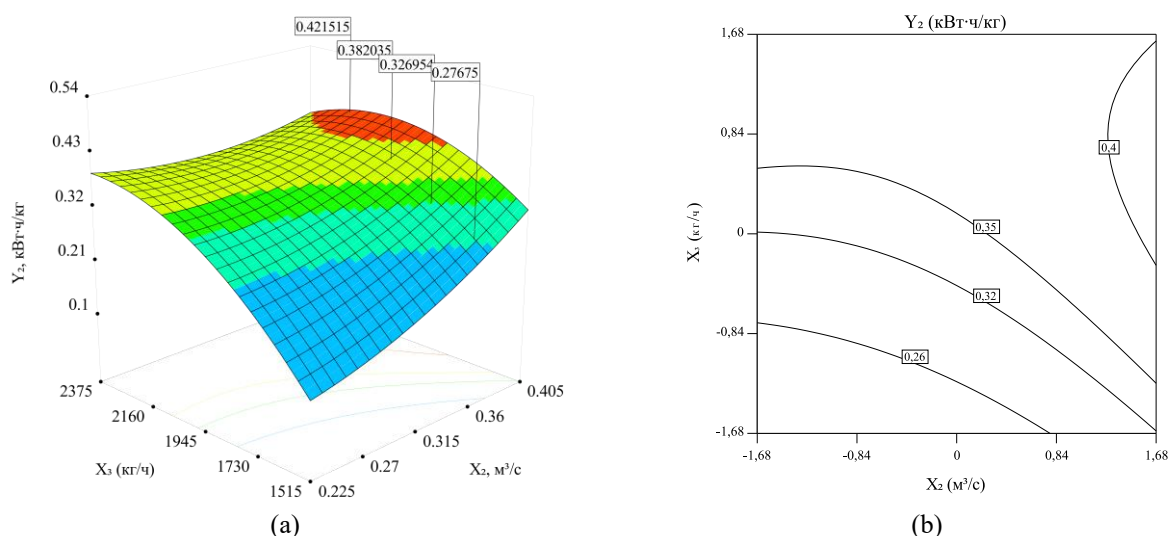


Рисунок 7. Совместное влияние на удельные энергозатраты на 1 кг готовой продукции (Y_2 , кВт·ч/кг) расхода теплоносителя (X_2 , м³/с) и расхода влажного материала на входе в сушилку (X_3 , кг/ч): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 7. Combined effect on specific energy consumption per 1 kg of finished product (Y_2 , kW·h/kg) of heat carrier flow rate (X_2 , m³/s) and flow rate of wet material at the dryer inlet (X_3 , kg/h): а – response surface; б – equal value curves

На следующем этапе исследований проводился поиск оптимальных режимных параметров процесса. Нахождение оптимума и решения задачи оптимизации реализовано с использованием частной функции желательности d [23], при этом выходной параметр Y_i переводился в параметрический вид функции $d_i \in \{0 \dots 1\}$. Если целевая функция Y_i определяет оптимум (максимальное или минимальное значение), или же оптимальное значение является заданным, например, экономической целесообразностью, то значения функции $d_i = 1$. В случае, когда оптимальное

значение не соответствует интервалу заданных значений $Y_i \notin \{0 \dots 1\}$, то функция $d_i = 0$. Для нахождения максимальных значений функции желательности d_i использовано выражение:

$$D = (d_1 d_2 \dots d_i)^{(1/j)}. \quad (3)$$

Задача оптимизации процесса сушки проводилась из условия достижения минимального значения удельных энергозатрат и значений влажности готового продукта, которые должны находиться в диапазоне 8,0÷8,5 % (таблица 5). Полученные решения из первых 24 вариантов задачи оптимизации сведены в таблицу 6.

Постановка задачи оптимизации

Table 5.

Statement of the optimization problem

Фактор Factor	Цель Targe	Нижний предел Lower Limit	Верхний предел Upper Limit	Вес нижний Lower Weight	Вес верхний Upper Weight	Важность Importance
X ₁	в диапазоне in range	323	326	1	1	3
X ₂		0,2394	0,3906	1	1	3
X ₃		1583,8	2306,2	1	1	3
Y ₁		8,0	8,5	1	1	3
Y ₂	мин min	0,2183	0,4398	1	1	3

Таблица 6.

Массив вариантов решений оптимизационной задачи

Table 6.

An array of possible solutions to an optimization problem

Решение Solution	X ₁ , К	X ₂ , м ³ /с	X ₃ , кг/ч	Y ₁ , %	Y ₂ , (кВт×ч/кг)	Функция желательности Desirability function
1	323,000	0,316	1583,800	8,294	0,218	0,952
2	323,000	0,316	1583,909	8,299	0,218	0,951
3	323,000	0,316	1583,800	8,283	0,219	0,951
4	323,000	0,317	1583,800	8,271	0,220	0,951
5	323,000	0,315	1584,848	8,308	0,218	0,951
...	...	...	...	...	...	...
20	325,199	0,314	1583,800	8,467	0,218	0,937
21	325,452	0,313	1583,800	8,489	0,218	0,935
22	325,769	0,313	1583,801	8,517	0,218	0,932
23	325,998	0,313	1583,802	8,537	0,218	0,930
24	325,985	0,312	1586,120	8,564	0,218	0,928

Из полученного массива (таблица 6) значений функции D выбраны значения, при которых $D \rightarrow 1$, для которых рациональные интервалы значений входных факторов равны: $X_1 = 323...325$ К; $X_2 = 0,312...0,316$ м³/с; $X_3 = 1583,800...1586,120$ кг/ч.

Заклучение

В результате экспериментальных исследований технологических процессов послеуборочной сушки семян киноа отечественной селекции на пилотной установке барабанной сушилки с канальными насадками установлены оптимальные интервалы значений входных факторов: температура теплоносителя на входе в барабан 323–325 град. К; расход теплоносителя 0,312–0,316 м³/с; производительность по влажным

семенам 1583,8–1586,12 кг/ч. Оптимизация процесса сушки проводилась из условия минимизации удельных энергозатрат при достижении влажности семян киноа до 8,0–8,5 % на выходе из сушилки.

Применение указанных режимов удаления влаги из семян киноа при послеуборочной обработке с использованием барабанной сушилки с канальной насадкой позволит минимизировать энергозатраты на процесс сушки, при этом позволит улучшить качество продукта в процессе хранения и последующей переработки. Полученные режимные параметры первичных процессов переработки семян могут быть использованы в будущем для усовершенствования технологий и достижения экономически эффективного способа конвективной сушки.

Литература

- 1 Romano N., Ureta M.M., Guerrero-Sánchez M. et al. Nutritional and technological properties of a quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) spray-dried powdered extract // Food Research International. 2020. Vol. 129. 108884. doi: 10.1016/j.foodres.2019.108884
- 2 Kuktaite R., Repo-Carrasco-Valencia R., Mendoza C. et al. Innovatively processed quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) food: chemistry, structure and end-use characteristics // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2021. Vol. 102. P. 5065–5076. doi: 10.1002/jsfa.11214
- 3 Manjarres Hernández E.H., Morillo Coronado A.C., Cárdenas Chaparro A. et al. Yield, phenology and triterpene saponins in Colombian quinoa // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2022. Vol. 6. 919885. doi: 10.3389/fsufs.2022.919885
- 4 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
- 5 Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации за 2018 год / под ред. С.Н. Бобылева, Л.М. Григорьева. М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2018. 172 с.

- 6 Воршева А.В. Квиноа – новая перспективная крупная культура для России, питательная ценность и история возделывания: обзор // *АгроЭкоИнфо*. 2024. № 1(61). doi: 10.51419/202141131
- 7 Alandia G., Rodríguez J.P., Jacobsen S.E. et al. Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region // *Global Food Security*. 2020. Vol. 26. 100429. doi: 10.1016/j.gfs.2020.100429
- 8 Moscon E., Blum L.E., Spehar C. et al. Kinetics and quality of quinoa seeds after drying and during storage // *Journal of Agricultural Science*. 2020. Vol. 12. № 2. P. 71–81. doi: 10.5539/jas.v12n2p71
- 9 Bakhtavar M.A., Afzal I. Climate smart Dry Chain Technology for safe storage of quinoa seeds // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 12554. doi: 10.1038/s41598-020-69190-w
- 10 Ахунбаев А.А. Оптимизация формы насадки барабанных сушилок // *Universum: технические науки*. 2023. № 6-1(111). С. 21–26. doi: 10.32743/UniTech.2023.111.6.15705
- 11 Бакин И.А., Шахов С.В., Мустафина А.С. и др. Оптимизация параметров технологии сушки и хранения сублимированной растительной продукции // *ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия*. 2023. Т. 20. № 7. С. 49–58.
- 12 Кач В.В., Шевцов А.А. Виртуальный испытательный стенд для компьютерного проектирования барабанных сушилок по кинетическим закономерностям процесса сушки // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2023. Т. 50. № 1. С. 152–160. doi: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-152-160
- 13 Пат. 2367865 С1 Российская Федерация, МПК F26B 11/04. Барабанная сушилка с канальной насадкой / Антипов С.Т., Шахов С.В., Гавриленков А.М.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. № 2008128107; заявл. 09.07.2008; опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26.
- 14 Воронов С.С., Кузнецов И.В., Гавриленков А.М. и др. Реализация осциллирующих режимов сушки в барабанном сушильном агрегате // *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 5-1. С. 161–165.
- 15 Jabir K., Palwasha G., Qingyun L. et al. Drying kinetics and thermodynamic analysis; enhancing quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) quality profile via pre-treatments assisted germination and processing // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2025. Vol. 117. 107337. doi: 10.1016/j.ultsonch.2025.107337
- 16 Орлова Т.В., Айдер М. Крахмал зерна квиноа (*Chenopodium quinoa* Willd.): состав, морфология и физико-химические свойства // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51. № 1. С. 98–112. doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-98-112
- 17 Бойко А.Ф., Воронкова Н.М. Теория планирования многофакторных экспериментов. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. 75 с.
- 18 Subramani D., Tamilselvan S., Murugesan M. et al. Optimization of sand puffing characteristics of quinoa using response surface methodology // *Current Research in Nutrition and Food Science*. 2020. Vol. 8. № 2. P. 469–478. doi: 10.12944/CRNFSJ.8.2.16
- 19 Макарова Д.Ю., Новикова Е.К., Александрова Л.Ю. Методология поверхности отклика в количественном определении полисахаридов в корнях купены лекарственной // *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2023. Т. 22. № 4. С. 208–213. doi: 10.37903/vsgma.2023.4.28
- 20 Carvalho A.M.X., Souza M.R., Marques T.B. et al. Familywise type I error of ANOVA and ANOVA on ranks in factorial experiments // *Ciencia Rural*. 2023. Vol. 53. № 7. e20220146. doi: 10.1590/0103-8478cr20220146
- 21 Tabatabaei M., Hartikainen M., Miettinen K. et al. ANOVA-MOP: ANOVA decomposition for multiobjective optimization // *SIAM Journal on Optimization*. 2018. Vol. 28. № 4. P. 3260–3289. doi: 10.1137/16M1096505
- 22 Коршунов А.О., Лаврентьева Е.А., Лазарев М.А. и др. Оптимизация процесса омыления таллового пека методом планирования эксперимента // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2022. № 1(385). С. 173–187. doi: 10.37482/0536-1036-2022-1-173-187
- 23 Захachatнов В.Г., Попов В.М., Афонькина В.А. Функция желательности Харрингтона как критерий оптимального выбора зерносушилки // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022. № 2(94). С. 110–114. doi: 10.37670/2073-0853-2022-94-2-110-114

References

- 1 Romano N., Ureta M.M., Guerrero-Sánchez M. et al. Nutritional and technological properties of a quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) spray-dried powdered extract. *Food Research International*. 2020. vol. 129. p. 108884. doi: 10.1016/j.foodres.2019.108884
- 2 Kukkaite R., Repo-Carrasco-Valencia R., Mendoza C. et al. Innovatively processed quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) food: chemistry, structure and end-use characteristics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. vol. 102. pp. 5065–5076. doi: 10.1002/jsfa.11214
- 3 Manjarres Hernández E.H., Morillo Coronado A.C., Cárdenas Chaparro A. et al. Yield, phenology and triterpene saponins in Colombian quinoa. *Front. Sustain. Food Syst*. 2022. vol. 6. p. 919885. doi: 10.3389/fsufs.2022.919885
- 4 Sultanova Z.S., Toderich K.N. Vozdelyvanie Kinoa v Usloviyah Yuzhnogo Priaral'ya. *Science Review*. 2019. no. 8(25). (in Russian). doi: 10.31435/rsglobal_sr/31102019/6749
- 5 Doklad o chelovecheskom razvitii v Rossijskoj Federacii za 2018 god. Ed. by Bobylev S.N., Grigoriev L.M. Moscow: Analiticheskii tsentr pri Pravitel'stve Rossijskoj Federatsii, 2018. 172 p. (in Russian)
- 6 Vorsheva A.V. Quinoa is a new promising cereal crop for Russia, nutritional value and history of cultivation: an overview. *AgroEkoInfo*. 2024. no. 1(61). (in Russian). doi: 10.51419/202141131
- 7 Alandia G., Rodríguez J.P., Jacobsen S.E. et al. Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. *Glob. Food Sec*. 2020. vol. 26. p. 100429. doi: 10.1016/j.gfs.2020.100429

- 8 Moscon E., Blum L.E., Spehar C. et al. Kinetics and quality of quinoa seeds after drying and during storage. *Journal of Agricultural Science*. 2020. vol. 12. no. 2. pp. 71–71. doi: 10.5539/jas.v12n2p71
- 9 Bakhtavar M.A., Afzal I. Climate smart Dry Chain Technology for safe storage of quinoa seeds. *Sci Rep*. 2020. vol. 10. p. 12554. doi: 10.1038/s41598-020-69190-w
- 10 Axunbaev A.A. Optimization of the shape of the nozzle of drum dryers. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2023. no. 6–1(111). pp. 21–26. (in Russian). doi: 10.32743/UniTech.2023.111.6.15705
- 11 Bakin I., Shahov S. et al. Optimization of drying and storage parameters for freeze-dried plant products. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2023. no. 20. pp. 49–58. (in Russian)
- 12 Tkach V.V., Shevtsov A.A. Virtual test bench for computer-aided design of drum dryers based on kinetic laws of the drying process. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2023. vol. 50. no. 1. pp. 152–160. (in Russian). doi: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-152-160
- 13 Pat. 2367865 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK F26B 11/04. Barabannaya sushilka s kanal'noj nasadkoj / Antipov S.T., Shahov S.V., Gavrilencov A.M.; zayavitel' Voronezh. gos. tekhnol. akad. № 2008128107; zayavl. 09.07.2008; opubl. 20.09.2009. (in Russian)
- 14 Voronov S.S., Kuznetsov I.V., Gavrilencov A.M. et al. Realizaciya oscilliruyushchih rezhimov sushki v barabannom sushil'nom aggregate. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014. no. 5–1. p. 161. (in Russian)
- 15 Jabir K., Palwasha G., Qingyun L., Kunlun L. Drying kinetics and thermodynamic analysis; enhancing quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) quality profile via pre-treatments assisted germination and processing. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2025. vol. 117. p. 107337. doi: 10.1016/j.ultsonch.2025.107337
- 16 Orlova T.V., Aider M. Starch Grain Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, Morphology and Physico-Chemical Properties. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021. vol. 51. no. 1. pp. 98–112. (in Russian). doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-98-112
- 17 Boyko A.F., Voronkova N.M. Teoriya planirovaniya mnogofakturnykh eksperimentov. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2020. 75 p. (in Russian)
- 18 Subramani D., Tamilselvan S., Murugesan M. et al. Optimization of sand puffing characteristics of quinoa using response surface methodology. *Curr Res Nutr Food Sci*. 2020. vol. 8. no. 2. doi: 10.12944/CRNFSJ.8.2.16
- 19 Makarova D.Yu., Novikova E.K., Alexandrova L.Yu. Response surface methodology in the quantitative determination of polysaccharides in the roots of the *polygonatum officinale*. *Vestnik Smolenskoj gosudarstvennoj medicinskoj akademii*. 2023. vol. 22. no. 4. pp. 208–213. (in Russian). doi: 10.37903/vsgma.2023.4.28
- 20 Carvalho A.M.X.De, Souza M.R.De, Marques T.B. et al. Familywise type I error of ANOVA and ANOVA on ranks in factorial experiments. *Ciencia Rural*. 2023. vol. 53. no. 7. doi: 10.1590/0103-8478cr20220146
- 21 Tabatabaei M., Hartikainen M., Miettinen K. et al. ANOVA-MOP: ANOVA decomposition for multiobjective optimization. *SIAM Journal on Optimization*. 2018. vol. 28. no. 4. pp. 3260–3289. doi: 10.1137/16M1096505
- 22 Korshunov A.O., Lavrenteva E.A., Lazarev M.A. et al. Optimization of tall oil pitch saponification by experimental design. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2022. no. 1(385). pp. 173–187. doi: 10.37482/0536-1036-2022-1-173-187
- 23 Zakhakhatnov V.G., Popov V.M., Afonkina V.A. The Harrington desirability function as a criterion for the optimal choice of a grain dryer. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022. no. 2(94). pp. 110–114. (in Russian). doi: 10.37670/2073-0853-2022-94-2-110-114

Сведения об авторах

Сергей В. Роднищев аспирант, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sergey.2587@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0006-3413-9782>

Дмитрий В. Дмитриев учредитель, ООО «Научно-производственное объединение КВИНОА ЦЕНТР», ул. Кооперативная, 81, г. Новокубанск., Краснодарский край, 352240, Россия, rosagro.kr@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9947-174X>

Игорь А. Бакин д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, bakin@rgau-msha.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5678-1975>

Сергей В. Шахов д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, s_shahov@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5865-2357>

Information about authors

Sergey V. Rodnischchev graduate student, machines and equipment for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sergey.2587@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0006-3413-9782>

Dmitrij V. Dmitriev CEO, LLC "Scientific and Production Association Quinoa Center", Cooperative st., 81 Novokubansk, Krasnodarskiy Territory, 352240, Russia, rosagro.kr@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9947-174X>

Igor A. Bakin Dr. Sci. (Engin.), professor, processes and apparatus for processing industries department, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49 Moscow, 127434, Russia, bakin@rgau-msha.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5678-1975>

Sergey V. Shakhov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and equipment for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, s_shahov@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5865-2357>

Ирина А. Глотова д.т.н., профессор, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, glotova-irina@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9991-1183>

Александр С. Муравьев к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, hntrun@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5989-0752>

Вклад авторов

Сергей В. Роднищев предложил методику проведения эксперимента

Дмитрий В. Дмитриев обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты

Игорь А. Бакин обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты

Сергей В. Шахов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Ирина А. Глотова консультация в ходе исследования

Александр С. Муравьев консультация в ходе исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Irina A. Glotova Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina st., 1 Voronezh, 394087, Russia, glotova-irina@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9991-1183>

Alexander S. Muravyev Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, machines and equipment for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, hntrun@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5989-0752>

Contribution

Sergey V. Rodnishchev proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Dmitrij V. Dmitriev review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Igor A. Bakin review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Sergey V. Shakhov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Irina A. Glotova consultation during the study

Alexander S. Muravyev consultation during the study

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 21/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 22/04/2025
Received 21/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 22/04/2025