

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2025-21-4-79-88>

УДК [633.15+633.34]:631.53.027.325



Оптимизация параметров замачивания кукурузы и сои для повышения эффективности проращивания

Д. Нзейимана, Н.А. Бугаец✉, О.В. Руденко

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кубанский государственный технологический университет»;
г. Краснодар, Российская Федерация
✉kubanochka23@yandex.ru*

Аннотация. Введение. Актуальность исследований обусловлена необходимостью оптимизации технологических процессов замачивания зерна злаковых и бобовых культур как ключевого этапа в производстве функциональных продуктов питания. Существующие методы требуют совершенствования с целью повышения эффективности и энергоэффективности процесса. **Цель исследования.** Цель исследования заключалась в определении оптимальных условий замачивания зерна кукурузы и бобов сои, обеспечивающих достижение уровня влажности, достаточного для начала прорастания, при минимальных затратах времени и энергии. **Объекты и методы.** Экспериментальные исследования включали замачивание зерна кукурузы сорта TZBR (composite) и бобов сои сорта 449/6/16 при температуре от 20 °С до 30 °С и гидромодулях 1:2-1:3 в течение 2-6 ч. Влажность образцов определяли гравиметрическим методом. Для математического моделирования использовали регрессионный анализ и бикубические сплайны в программных средах Statistica и MathCad. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что для прорастания бобов сои требуется влажность 30 %, достигаемая при температуре 18 °С и продолжительности замачивания 1,16 ч, а для зерен кукурузы – 20 % при температуре 28,4 °С и продолжительности замачивания 3,72 ч. Построенные регрессионные модели показали высокую степень адекватности ($R^2 = 0,95-0,99$). Определено, что повышение температуры ускоряет процесс влагонакопления, однако при температуре выше 40 °С снижается жизнеспособность зародыша. **Заключение.** Оптимизация параметров замачивания позволяет существенно сократить продолжительность подготовки зернового сырья к проращиванию и повысить качество готового продукта. Полученные данные могут быть использованы при разработке энергосберегающих технологий в агропромышленном комплексе и в производстве продуктов питания на основе пророщенного зерна.

Ключевые слова: замачивание, кукуруза, соя, пророщенное зерно, влажность, гидромодуль, температура, регрессионный анализ, оптимизация, Statistica, MathCad

Для цитирования: Нзейимана Д., Бугаец Н.А., Руденко О.В. Оптимизация параметров замачивания кукурузы и сои для повышения эффективности проращивания. *Новые технологии / New technologies*. 2025; 21(4): 79-88. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2025-21-4-79-88>

Optimization of corn and soybean soaking parameters to improve germination efficiency

D. Nzeyimana, N.A. Bugaets✉, O.V. Rudenko

*Kuban State Technological University; Krasnodar, the Russian Federation
✉kubanochka23@yandex.ru*

© Д. Нзейимана, Н.А. Бугаец, О.В. Руденко, 2025

Abstract. Introduction. The relevance of the research is driven by the need to optimize technological processes for soaking cereal and legume grains as a key step in the production of functional foods. Existing methods require improvement to improve the efficiency and energy efficiency of the process. **The goal of the research** was to determine optimal soaking conditions for corn and soybeans to achieve a moisture level sufficient for germination while minimizing time and energy consumption. **The objectives and methods.** The experimental studies included soaking of TZBR (composite) corn grains and 449/6/16 soybeans at temperatures ranging from 20°C to 30°C and water ratios of 1:2-1:3 for 2-6 h. The moisture content of the samples was determined gravimetrically. Regression analysis and bicubic splines in Statistica and MathCad software environments were used for mathematical modeling. **The results and discussion.** It has been found that soybean germination requires 30% moisture content, achieved at a temperature of 18°C and a soaking time of 1.16 h, while for corn grains it requires 20% at a temperature of 28.4°C and a soaking time of 3.72 h. The constructed regression models have shown a high degree of adequacy ($R^2 = 0.95-0.99$). It has been determined that increasing temperature accelerates the moisture accumulation process; however, at temperatures above 40°C, embryo viability decreases. **Conclusion.** Optimization of soaking parameters significantly reduces the time required to prepare grain for germination and improves the quality of the finished product. The obtained data can be used in the development of energy-saving technologies in the agro-industrial complex and in the production of food products based on sprouted grain.

Keywords: soaking, corn, soybeans, sprouted grain, moisture, water content, temperature, regression analysis, optimization, Statistica, MathCad

For citation: Nzeyimana D., Bugaets N.A., Rudenko O.V. Optimization of corn and soybean soaking parameters to improve germination efficiency. *Novye tehnologii / New technologies*. 2025; 21(4): 79-88. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2025-21-4-79-88>

Введение. Проращивание семян представляет собой ключевую стадию в технологиях переработки зерновой и бобовой культур, поскольку активизация ферментативных систем и метаболических процессов начинается с этапа набухания (имбибиции). При поглощении воды семена переходят из сухого состояния в гидратированное, что инициирует последовательность биохимических реакций, необходимых для последующего прорастания. Недостаточная или неравномерная имбибиция может привести к замедлению развития зародыша и снижению общей эффективности технологии.

В условиях агропромышленного производства важным аспектом является не только достижение требуемой степени набухания, но и оптимизация временных и энергетических затрат данного процесса. Увеличение продолжительности замачивания или повышение температуры хотя и способствуют ускорению водопоглощения, одновременно повышают риски микробиологической контаминации, потери жизнеспособности зародышей и возникновения

градиентов влажности внутри семени. В связи с этим актуальной задачей становится поиск баланса между скоростью гидратации и сохранением качества семян при минимальных ресурсных затратах.

Современные научные исследования значительное внимание уделяют моделированию кинетики водопоглощения семенами. В работе Wang et al. (2022) изучена кинетика гидратации четырех сортов сои при температурах от 5 °C до 40 °C с использованием моделей типа Page. Установлено, что повышение температуры ускоряет поглощение влаги, но одновременно усиливает потери растворимых соединений, что ограничивает диапазон оптимальных условий [1]. Zhang et al. (2021) применяли ультразвуковую обработку при замачивании сои, добившись значительного повышения скорости водопоглощения и улучшения функциональных свойств семян. Оптимальными параметрами признаны температура 37 °C, мощность 144 Вт и продолжительность обработки 214 минут [2]. Полученные данные свидетельствуют о пер-

спективности комбинированных методов воздействия (температура + ультразвук) для оптимизации режимов замачивания.

Внимания заслуживают исследования, посвященные замачиванию злаковых культур, в частности, кукурузы, которые представлены в научной литературе в меньшем объеме. Miranda et al. в рамках статистического моделирования кинетики замачивания кукурузы и сои продемонстрировали значительное влияние температуры и времени на параметры гидратации [3]. Эти результаты подтверждают, что подходы, эффективные для бобовых культур, не могут быть автоматически перенесены на злаковые без соответствующей адаптации.

В отечественных исследованиях вопросы предпосевной подготовки и стимуляции семян часто рассматриваются в рамках агротехнических приемов. Например, работа А.П. Жигайловой (2023) посвящена совершенствованию дозирования семян вакуумным аппаратом на примере кукурузы, где анализируются преимущественно механические и технологические аспекты подачи семян, без детального рассмотрения кинетики замачивания [4]. Исследование И.В. Смотряевой и соавт. (2024) затрагивает вопросы применения российских сортов кукурузы в солодовом производстве и описывает отдельные влажностные характеристики зерна, однако не детализирует динамику имbibции [5].

Международные исследования, такие как работы Mukherjee et al. [6] и Kumar et al. [7], расширяют понимание физико-химических изменений при замачивании и инновационных методов обработки. Отечественные исследования вносят значительный вклад в изучение процессов замачивания. Работы Колесниченко И.С. и соавт. [8], Петриченко В.В. [9], Михайловой Е.В. [10] выявили критическую зависимость качественных показателей продукции от режимов замачивания, в то время как исследования Гумерова А.В. [11], Артюновой М.В. [12] и Конева М.С. [13] де-

монстрируют возможности совершенствования технологических процессов.

Таким образом, при наличии значительного количества тематически близких исследований практически отсутствуют работы, посвященные одновременной оптимизации параметров замачивания (время, температура, гидромодуль) для кукурузы и сои в рамках единого экспериментального подхода с использованием кинетического моделирования. Разработка такой методики позволила бы выработать научно обоснованные рекомендации по снижению временных затрат и повышению энергоэффективности в агропищевых технологиях.

Целью настоящего исследования является определение оптимальных режимов замачивания (время, температура, гидромодуль) для зерен кукурузы и бобов сои, обеспечивающих достижение влажности, достаточной для начала прорастания, при минимальных временных и энергетических затратах с учетом кинетики водопоглощения.

Для достижения поставленной цели предусмотрено решение следующих задач:

- провести серию экспериментов по замачиванию зерен кукурузы и бобов сои при варьируемых температурных режимах, значениях гидромодуля и продолжительности процесса;
- построить экспериментальные кривые набухания и выполнить их аппроксимацию регрессионными моделями;
- определить оптимальные условия замачивания для каждой культуры с учетом минимизации временных и энергетических затрат;
- разработать практические рекомендации для агропроизводства и технологических процессов переработки пророщенного зерна.

Объекты и методы исследований. В качестве объектов исследования использовали бобы сои сорта 449/6/16 и зерно кукурузы сорта TZBR (composite), выращиваемые в Республики Бурунди, которые были выбраны как широко распространённые куль-

туры, обладающие значительным потенциалом для переработки в пищевой промышленности. Перед началом опытов зерно и бобы подвергались стандартной подготовке: удалялись посторонние примеси, проводилась сортировка по размеру и визуальная оценка качества, после чего образцы промывали проточной водой и подсушивали при комнатной температуре. Исходная влажность семян, определённая гравиметрическим методом, составила 3,90 % для сои и 3,63 % для кукурузы, что соответствовало требованиям к исходным образцам для дальнейших исследований. Замачивание проводили в лабораторных условиях с использованием стеклянных цилиндров объёмом 1 литр, при этом гидромодуль для бобов сои составлял 1:3, а для кукурузы – 1:2 (семена: вода по массе). Эксперименты выполняли при контролируемых температурных режимах 20 °C, 25 °C и 30 °C и продолжительности процесса 2, 4 и 6 часов. Для поддержания стабильности условий использовался лабораторный термостат с точностью регулирования $\pm 0,5$ °C, что позволило исключить влияние внешних колебаний температуры на результаты.

Через заданные интервалы времени семена извлекали из замочной жидкости, обсушивали фильтровальной бумагой до удаления поверхностной влаги и проводили взвешивание с использованием аналитических весов с точностью до 0,001 г. Массовую долю влаги определяли в соответствии с ГОСТ Р 54951-2012 (ИСО 6496:1999) Корма для животных. Определение содержания влаги.

Каждое измерение выполняли в трёх повторностях, что позволило получить усреднённые значения и оценить вариацию результатов. Для обеспечения корректности экспериментальных данных дополнительно рассчитывались доверительные интервалы, а коэффициент вариации не превышал 5 %, что свидетельствовало о высокой воспроизводимости опыта.

Математическая обработка данных проводилась с использованием программных пакетов Statistica и MathCad, что обеспечи-

вало широкий спектр методов для анализа и интерпретации полученных результатов. Построение зависимостей «влажность – время – температура» выполнялось с применением регрессионного анализа и интерполяции сплайн-функциями, что позволило выявить нелинейный характер изменения гидратации в процессе набухания. Для аппроксимации экспериментальных данных применялись полиномиальные модели второй степени, которые продемонстрировали высокое соответствие результатам наблюдений: коэффициенты детерминации R^2 составляли 0,95-0,99, что подтверждало адекватность выбранных зависимостей. Дополнительно проводилась оптимизация методом минимизации ошибки, позволившая определить экстремальные значения факторов, при которых достигается целевая влажность семян.

В качестве критериев оптимальности рассматривались минимальные значения времени и температуры, обеспечивающие достижение влажности, необходимой для начала прорастания: для сои – 30 %, для кукурузы – 20 %. Для нахождения оптимальных параметров использовали анализ поверхности Парето, позволивший выделить область компромиссных решений, где одновременно минимизировались энергозатраты и продолжительность процесса.

Результаты. Анализ полученных данных показал, что процесс набухания бобов сои и зерен кукурузы имеет ярко выраженный нелинейный характер и может быть представлен в виде типичных кривых имбибии с начальными участками интенсивного поглощения влаги и последующей стадией замедления, связанной с достижением равновесного состояния. Как видно из экспериментальных данных (табл. 1), исходная влажность семян составляла 3,90 % для сои и 3,63 % для кукурузы, что соответствует литературным сведениям о низкой гигроскопичности исходного сырья [4, 5].

При замачивании в условиях гидромодуля 1:3 для сои и 1:2 для кукурузы наблю-

далась закономерная зависимость: повышение температуры среды от 20 °С до 30 °С сопровождалось ростом скорости набухания и сокращением времени достижения критических значений влажности.

В ходе эксперимента определяли минимальную продолжительность замачивания и температуру замачивания, при которых

зерно кукурузы и бобы сои достигают влажности необходимой для начала процесса прораствания.

Одним из способов решения поставленной задачи является визуальный анализ интерполяционной поверхности отклика, образованной сплайн функциями и реализованный в программной среде Statistica.

Таблица 1. Исходные характеристики исследуемого сырья
Table 1. Initial characteristics of the studied raw materials

Культура	Сорт	Исходная влажность, %	Гидромодуль	Масса навески, г
Соя	449/6/16	3,90	1:3	50
Кукуруза	TZBR (composite)	3,63	1:2	50

Для процесса замачивания откликом является влажность (y , %), а независимыми переменными – время замачивания (x_1) и температура (x_2). Необходимо рассчитать такие значения фактор-аргументов, при которых y будет принимать необходимые значения, причем x_1 и x_2 должны стремиться к минимуму.

Проведя интерполяцию с помощью бикубического сплайна в программе Статистика, можно выделить точку оптимальности на графике поверхности функции $y(x_1, x_2)$ (рис. 1).

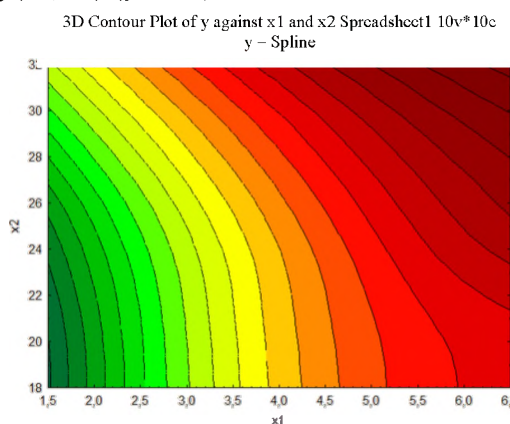


Рис. 1. Условия достижения влажности бобов сои 30 % при замачивании

Fig. 1. Conditions for achieving 30% moisture content in soybeans during soaking

На графике поверхности Парето фронт находится в левом нижнем углу и там можно выделить одну оптимальную точку со значениями $x_1 = 1,5$, $x_2 = 18$ при достижении влажности 30 %.

Для получения численного результата воспользуемся явным выражением целевой функции $y(x_1, x_2)$, которую можем получить в программе Статистика с помощью регрессионного анализа. Для нашего эксперимента спецификацией модели будет полином второй степени (рис. 2):

$$z(x, y) = 33,5 + 5,8 \cdot x_1 - 1,1 \cdot x_2 - 0,36 \cdot x_1^2 + 0,031 \cdot x_2^2 \quad (1)$$

Коэффициент детерминации R^2 равен 0,99, скорректированный R^2 тоже равен 0,99. Adjusted R^2 равен обычному R^2 , что говорит о том, что модель хорошо объясняет вариацию данных.

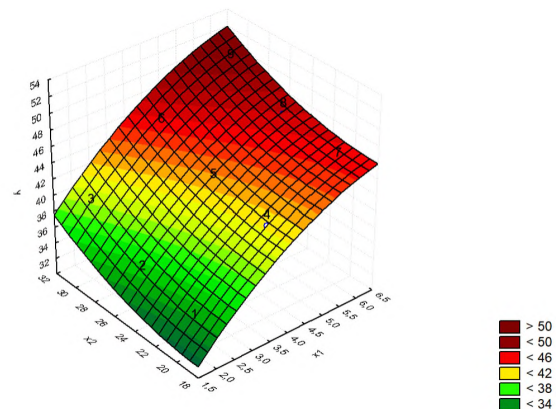


Рис. 2. Поверхность для целевой функции $y(x_1, x_2)$ при замачивании бобов сои

Fig. 2. Surface for the objective function $y(x_1, x_2)$ when soaking soybeans

Найден экстремум функции $y(x_1, x_2)$ при условии достижения целевой функции значения влажности 30 % в программе MathCad.

$$Z_{xy}(x, y) := \frac{-\frac{d}{dy}z(x, y)}{\frac{d}{dx}z(x, y)} \quad x := 0 \quad y := 0$$

Given

$$\begin{aligned} Z_{xy}(x, y) &= 0 & 1 < x < 7 \\ z(x, y) &= 30 & 18 < y < 40 \\ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &:= \text{Minerr}(x, y) & \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1,163 \\ 18 \end{pmatrix} \\ z(x, y) &= 30 \end{aligned}$$

Зависимость массовой доли влаги зерен кукурузы от продолжительности и температуры замачивания представлена на рисунке 3.

Синим цветом выделен фронт Парето для значения влажности ($y > 20$ %), белая точка – предлагаемое сужение в виде одного решения ($x_1 = 4,9$; $x_2 = 27$) при наименьшем расстоянии от «идеальной» точки (обозначена звездочкой).

3D Contour Plot of y against x1 and x2 Spreadsheet1 10v*10c
y = Spline

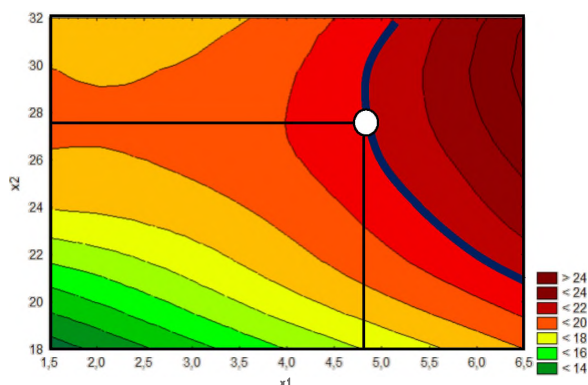


Рис. 3. Условия достижения влажности зерна 20 % при замачивании кукурузы

Fig. 3. Conditions for achieving 20% grain moisture when soaking corn

Спецификацией модели при регрессионном анализе также будет полиномиальная функция (рис. 4):

$$y = -17,081 - 0,11 \cdot x_1 + 2,5 \cdot x_2 + 0,143 \cdot x_1^2 - 0,044 \cdot x_2^2 \quad (2)$$

Коэффициент детерминации R^2 равен 0,96, скорректированный R^2 равен 0,95.

Найден экстремум функции $y(x_1, x_2)$ при условии достижения целевой функции значения в 20 % в программе MathCad.

$$Z_{xy}(x, y) := \frac{-\frac{d}{dy}z(x, y)}{\frac{d}{dx}z(x, y)} \quad x := 0 \quad y := 0$$

Given

$$\begin{aligned} Z_{xy}(x, y) &= 0 & 2 < x < 6 \\ z(x, y) &= 20 & 18 < y < 40 \\ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &:= \text{Minerr}(x, y) & \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 3,72 \\ 28,409 \end{pmatrix} \\ z(x, y) &= 20 \end{aligned}$$

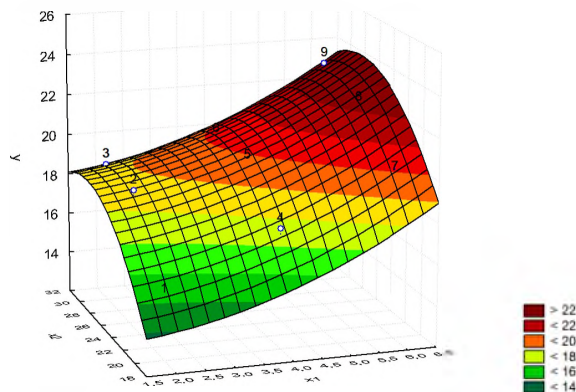


Рис. 4. Поверхность для целевой функции

$y(x_1, x_2)$ при замачивании зерен кукурузы

Fig. 4. Surface for the objective function $y(x_1, x_2)$ when soaking corn grains

Построенные кривые имбибиции (рис. 1, рис. 2) показали, что в первые 30-40 минут происходит наиболее интенсивное поглощение влаги, что согласуется с результатами Wang et al. [1], установивших аналогичную закономерность для четырёх сортов сои. Для сои достижение целевой влажности 30 % фиксировалось при температуре 18 °C за 1,16 ч, что указывает на наличие оптимума, позволяющего минимизировать энергозатраты без ухудшения качества семян. Для кукурузы критическая влажность 20 % достигалась за 3,72 ч при температуре 28,4 °C.

Сравнительный анализ полученных моделей показал высокую степень их соответствия экспериментальным данным: коэффициенты детерминации R^2 составили 0,95-0,99, что свидетельствует о достоверности построенных зависимостей. На поверхности отклика «влажность – время – температура» (рис. 3, 4) отчётливо проявляется зона компромиссных параметров, где минимизируются энергозатраты и временные показатели при достижении требу-

емого уровня влаги. Эти результаты согласуются с зарубежными работами по моделированию процессов гидратации [3, 7], а также подтверждают выводы российских исследователей о необходимости строгого контроля условий замачивания [14].

Следует отметить, что при температуре 30 °С кривые набухания имели более выраженное плато и сопровождалось увеличением потерь растворимых веществ, что отмечалось также Zhang и др. [2] при изучении ультразвукового замачивания. Это указывает на необходимость осторожного выбора температурных режимов: избыточное ускорение процесса приводит к снижению технологической ценности зерна. В то же время результаты отечественных исследований [15] свидетельствуют, что длительное замачивание без контроля температуры может приводить к развитию микрофлоры, снижению всхожести и ухудшению качества конечного продукта.

Заключение. Установлены закономерности изменения влажности зерен кукурузы и бобов сои в процессе замачивания при различных температурных режимах и гидромодулях. Показано, что процесс набухания (имbibitions) зерна нелинейный, и характеризуется высокой скоростью поглощения влаги на начальных стадиях и

последующим замедлением до установления равновесного состояния. Установлены параметры критической влажности 20 % и 30 % для кукурузы (1) и бобов сои (2) соответственно при следующих условиях: 1) 28,4 °С; 3,72 ч; 2) 18 °С; 1,16 ч. Подтверждены преимущества комплексной оптимизации параметров замачивания для двух культур одновременно, что ранее практически не рассматривалось.

Построены регрессионные модели с коэффициентами детерминации R^2 на уровне 0,95-0,99, которые продемонстрировали высокую адекватность и востребованы для прогнозирования производственных условий. Рекомендованы следующие параметры замачивания зерна в производственных условиях: для кукурузы – гидромодуль 1:2, температура 28-30 °С, продолжительность 3,5-4,0 ч; для бобов сои – гидромодуль 1:3, температура 18-20 °С, продолжительность 1,0-1,5 ч; В указанных режимах достигается требуемая влажность семян для начала прорастания при минимальных временных и энергетических затратах. Внедрение разработанных математических моделей в системы цифрового мониторинга технологических процессов позволит повысить управляемость и предсказуемость производства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kinetic study on soybean hydration during soaking and resulting softening kinetic during cooking / Wang D. [et al.] // Journal of Food Science. 2021. Vol. 87, No. 1. P. 266-279. 10.1111/1750-3841.15984. DOI: 10.1111/1750-3841.15984 EDN: QRRHEY.
2. Improving soaking efficiency of soybeans through ultrasonic assisted soaking / Zhang L. [et al.] // Food & Bioproducts Processing. 2021. Vol. 130. P. 244-252. doi:10.1016/j.fbp.2021.08.011.
3. Statistical modelling of the soaking kinetics of corn and soybean cultivars. / Miranda L.B. [et al.] // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2019. Vol. 23, No. 5. P. 355-362. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n5p355-362.
4. Жигайлова А.П. Совершенствование дозирования семян вакуумным аппаратом точного высева на примере кукурузы // Вестник аграрной науки Дона. 2023. № 4 (64). DOI: 10.55618/20756704_2023_16_4_22-31. EDN: YECFFS.

5. Витман В.Е., Баланов П.Е., Смотраева И.В. Исследование возможности применения российских сортов кукурузы для производства солода // *Journal of Agriculture and Environment*. 2024. № 5(45). DOI: 10.60797/JAE.2024.45.5. EDN: FYNXUM.
6. Mukherjee R., Chakraborty R., Dutta A. Soaking of soybean meal: evaluation of physicochemical properties and kinetic studies // *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2019. Vol. 13. P. 390-403. DOI: 10.1007/s11694-018-9954-6. DOI: 10.1007/s11694-018-9954-6 EDN: YWZWCM.
7. Innovations in legume processing: ultrasound-based strategies for enhanced legume hydration and processing / Kumar G. [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2023. Vol. 145. P. 123-136. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.03.025. EDN: KFZGBY.
8. Ростовская М.Ф., Боярова М.Д., Клыков А.Г. Влияние условий замачивания ячменя на содержание белковых веществ в солоде // *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50, № 2. С. 319-328. DOI: 10.21603/2074-9414-2020-2-319-328. EDN: EFTOSJ.
9. Хамдамова Ч.Х., Ахмедов А.Н., Суннатова С.Ф. Анализ и значения гидротермической переработки зерна перед дроблением и исследования // *Universum: технические науки*. 2022. № 3-4 (96). С. 52-55. DOI: 10.32743/UniTech.2022.96.3.13220. EDN: VQQAIM.
10. Wang N., Xu B., Chang S.K.C. Effects of cooking methods on nutritional composition and antinutritional factors in legumes // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 274. P. 467-474.
11. Осадченко И.М., Горлов И.Ф., Николаев Д.В. Технология получения зеленых кормов путем стимуляции замачивания и проращивания семян пшеницы с использованием электроактивированных растворов // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2014. № 1(111). С. 080-083. EDN: RUVNE.
12. Равшанов С., Мирзаев Ж., Мусаев Х. Влияние гидротермической обработки в повышении прочности оболочки зерна пшеницы при подготовке к сортовому помолу // *Химия и химическая технология*. 2020. № 2(68). С. 71-75. DOI: 10.51348/UWBU2815. EDN: NWYJMX.
13. Optimization of soaking stage in technological process of wheat germination by hydroponic method when objective function is defined implicitly / M.S. Koneva [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series* (Tomsk, 17-20 янв. 2018 г.). Tomsk, 2018. P. 032018. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032018. EDN: XYCSLR.
14. Гринюк Д.А., Карпук П.О. Модернизация системы автоматизации процесса увлажнения зерна перед помолу // *Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития: сборник материалов студенческой научно-технической конференции в рамках XXI Международной научно-технической конференции БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике» и LXXIX студенческой научно-технической конференции БНТУ (18-19 мая 2023 г.)*. Минск: БНТУ, 2023. С. 66-72.
15. Зенькова М.Л., Мельникова Л.А. Микробиологическая оценка процесса проращивания зерна пшеницы и гречихи // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51, № 4. С. 795-804. DOI: 10.21603/2074-9414-2021-4-795-804. EDN: AQPJDW.

REFERENCES

1. Kinetic study on soybean hydration during soaking and resulting softening kinetic during cooking / Wang D. [et al.] // *Journal of Food Science*. 2021. Vol. 87, No. 1. P. 266-279. DOI: 10.1111/1750-3841.15984. EDN: QRRHEY.
2. Improving soaking efficiency of soybeans through ultrasonic assisted soaking / Zhang L. [et al.] // *Food & Bioproducts Processing*. 2021. Vol. 130. P. 244-252. DOI: 10.1016/j.fbp.2021.08.011.
3. Statistical modelling of the soaking kinetics of corn and soybean cultivars / Miranda L.B. [et al.] // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2019. Vol. 23, No. 5. P. 355-362. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n5p355-362.
4. Zhigailova A.P. Sovershenstvovanie dozirovaniya semyan vakuumnym apparatom tochnogo vyseva na primere kukuruzy // *Vestnik agrarnoy nauki Dona* [Don Agricultural Science Bulletin]. 2023. No. 4 (64). DOI: 10.55618/20756704_2023_16_4_22-31. EDN: YECFFS. [In Russ.]
5. Vitman V.E., Balanov P.E., Smotraeva I.V. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya rossiyskikh sortov kukuruzy dlya proizvodstva soloda // *Journal of Agriculture and Environment*. 2024. No. 5 (45). DOI: 10.60797/JAE.2024.45.5. EDN: FYNXUM. (In Russ.)

6. Mukherjee R., Chakraborty R., Dutta A. Soaking of soybean meal: evaluation of physicochemical properties and kinetic studies // Journal of Food Measurement and Characterization. 2019. Vol. 13. P. 390-403. DOI: 10.1007/s1169401899546. EDN: YWZWCN.
7. Innovations in legume processing: ultrasound-based strategies for enhanced legume hydration and processing / Kumar G. [et al.] // Trends in Food Science & Technology. 2023. Vol. 145. P. 123-136. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.03.025. EDN: KFZGBY.
8. Rostovskaya M.F., Boyarova M.D., Klykov A.G. Vliyanie usloviy zamachivaniya yachmenya na sodержanie belkovykh veshchestv v solode [Effect of barley soaking conditions on protein content in malt] // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2020. Vol. 50, No. 2. P. 319-328. DOI: 10.21603/2074-9414-2020-2-319-328. EDN: EFTOSJ. [In Russ.]
9. Khamdamova Ch.Kh., Akhmedov A.N., Sunnatova S.F. Analiz i znacheniya gidrotermicheskoy pererabotki zerna pered drobleniem i issledovaniya // Universum: tekhnicheskie nauki. 2022. No. 3-4 (96). P. 52-55. DOI: 10.32743/UniTech.2022.96.3.13220. EDN: VQQAIM. [In Russ.]
10. Wang N., Xu B., Chang S.K.C. Effects of cooking methods on nutritional composition and antinutritional factors in legumes // Food Chemistry. 2019. Vol. 274. P. 467-474.
11. Osadchenko I.M., Gorlov I.F., Nikolaev D.V. Tekhnologiya polucheniya zelenykh kormov putem stimulyatsii zamachivaniya i prorashchivaniya semyan pshenitsy s ispol'zovaniem elektroaktivirovannykh rastvorov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. No. 1 (111). P. 080-083. EDN: RUVNEJ. [In Russ.]
12. Ravshanov S., Mirzaev J., Musaev H. Vliyanie gidrotermicheskoy obrabotki v povyshenii prochnosti obolochki zerna pshenitsy pri podgotovke k sortovomu pomolu // Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. 2020. No. 2 (68). P. 71-75. DOI: 10.51348/UWBU2815. EDN: NWYJMX. (In Russ.)
13. Optimization of soaking stage in technological process of wheat germination by hydroponic method when objective function is defined implicitly / Koneva M.S. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series (Tomsk, 17-20 Jan. 2018). Tomsk, 2018. P. 032018. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032018. EDN: XYCSLR.
14. Grinyuk D.A., Karpuk P.O. Modernizatsiya sistemy avtomatizatsii protsessa uvlazhneniya zerna pered pomolom // Inzhiniring i ekonomika: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: sbornik materialov studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii v ramkakh XXI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii BNTU «Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike» i LXXIX studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii BNTU (18-19 May 2023). Minsk: BNTU, 2023. P. 66-72. [In Russ.]
15. Zenkova M.L., Melnikova L.A. Mikrobiologicheskaya otsenka protsessa prorashchivaniya zerna pshenitsy i grechikhi // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2021. Vol. 51, No. 4. P. 795-804. DOI: 10.21603/2074-9414-2021-4-795-804. EDN: AQPJDW. [In Russ.]

Информация об авторах / Information about the authors

Диомед Нзейимана, аспирант по научной специальности 4.3.3 «Пищевые системы» кафедры общественного питания и сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет»; 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2770-6309>, e-mail: nzeyimanadiomede@gmail.com

Бугаец Наталья Алексеевна, доцент кафедры общественного питания и сервиса, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет»; 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4012-8837>, e-mail: kubanochka23@yandex.ru

Руденко Ольга Валентиновна, доцент кафедры вычислительных технологий, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет»; 350040, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1831-621X>

Diomed Nzeyimana, Postgraduate student in the scientific specialty 4.3.3 «Food Systems», the Department of Public Catering and Service, Kuban State Technological University; 350072, the Russian Federation, Krasnodar, 2 Moskovskaya St., ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2770-6309>, e-mail: nzeyimanadiomede@gmail.com

Natalya A. Bugayets, PhD (Eng.), Associate Professor, the Department of Public Catering and Service, Kuban State Technological University; 350072, the Russian Federation, Krasnodar, 2 Moskovskaya St., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4012-8837>, e-mail: kubanochka23@yandex.ru

Olga V. Rudenko, PhD (Eng.), Associate Professor, the Department of Computer Technologies, Kuban State University; 350040, the Russian Federation, Krasnodar, 149 Stavropolskaya St., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1831-621X>, e-mail: olga_ned

Заявленный вклад авторов

Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Claimed contribution of the authors

All authors of the research were directly involved in the planning, execution, and analysis of the research. All authors of the article have reviewed and approved the final version.

Поступила в редакцию 15.09.2025

Поступила после рецензирования 13.10.2025

Принята к публикации 14.10.2025

Received 15.09.2025

Revised 13.10.2025

Accepted 14.10.2025