

Применение различных методов обработки математических моделей при моделировании сушки яблок

Фролов Д.И., Боровков Я.Е.

Аннотация. В настоящей статье модель искусственной нейронной сети сравнивалась с традиционными регрессионными моделями для сушки пищевых материалов. Для обработки ломтиков яблок различной толщины был применен ультразвук высокой интенсивности с амплитудами, установленными на 25%, 50%, 75% и 100% от максимальной. Четыре наиболее часто используемые регрессионные модели для сушки, были подобраны на основе экспериментальных данных, и их применимость была проверена на различных наборах экспериментов. Для создания нейронной сети обратного распространения использовались входные параметры: амплитуда ультразвука, толщина образца и температура сушки. Выходным параметром являлась влажность. После обучения и проверки сетей был проведен статистический анализ и была выбрана лучшая сеть. Нейронные сети показали отличное соответствие экспериментальным данным, независимо от входных параметров, полученных в экспериментах. В отличие от регрессионных моделей, которые прекрасно подходят только к одному набору экспериментальных данных и показывают неадекватное соответствие при небольших изменениях одного или нескольких входных параметров.

Ключевые слова: сушка, яблоко, искусственная нейронная сеть, ультразвук, математическая модель.

Для цитирования: Фролов Д.И., Боровков Я.Е. Применение различных методов обработки математических моделей при моделировании сушки яблок // Инновационная техника и технология. 2022. Т. 9. № 3. С. 84–90.

Application of various methods of processing mathematical models in the simulation of drying apples

Frolov D.I., Borovkov Ya.E.

Abstract. In this article, the artificial neural network model was compared with traditional regression models for drying food materials. High-intensity ultrasound was applied to the processing of apple slices of various thicknesses with amplitudes set at 25%, 50%, 75% and 100% of the maximum. The four most commonly used regression models for drying were selected based on experimental data and their applicability was tested on various sets of experiments. To create a backpropagation neural network, input parameters were used: ultrasound amplitude, sample thickness, and drying temperature. Humidity was the output parameter. After training and testing the networks, a statistical analysis was carried out and the best network was selected. Neural networks showed excellent agreement with the experimental data, regardless of the input parameters obtained in the experiments. In contrast to regression models, which fit perfectly on only one set of experimental data and show inadequate fit for small changes in one or more input parameters.

Keywords: drying, apple, artificial neural network, ultrasound, mathematical model.

For citation: Frolov D.I., Borovkov Ya.E. Application of various methods of processing mathematical models in the simulation of drying apples. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2022. Vol. 9. No. 3. pp. 84–90. (In Russ.).

Введение

Сушка пищевых материалов в больших масштабах зависит от надлежащего контроля операции сушки, времени сушки, температуры, скорости воздуха и других параметров, таких как содержание воды и масса материала [7, 14]. Производительность и характеристики конвективных осушителей обычно определяются после серии экспериментов при различных температурах и скоростях воздуха [4]. Математические модели, основанные на таких экспериментальных данных, сочетают в себе влияние всех параметров и различных комбинаций и коэффициентов [5]. Производительность и характеристики конвективных сушилок обычно определяются путем проведения серии экспериментов при различных температурах и скоростях воздуха [9, 13]. Для проектирования операций сушки необходимы точные модели сушки, которые просты и быстры в использовании [8].

Быстрая сушка до низкой влажности имеет решающее значение, и поиск дальнейших улучшений традиционных процессов сушки привел к экспериментам с ультразвуком высокой интенсивности до или во время фазы сушки [3]. Сочетание процесса сушки и предварительной обработки ультразвуком высокой интенсивности приводит к еще более сложным, дорогостоящим и трудоемким экспериментам, которые выигрывают от реализации качественных математических моделей. Процесс сушки, который включает ультразвуковую обработку с интенсивностью более 10 Вт/см², подходит для изменения физических и химических свойств фруктов и поэтому должен быть тщательно смоделирован, чтобы свести к минимуму потери качества продуктов питания и затраты на процесс [1]. Тестирование и настройка системы на основе предыдущих экспериментальных данных с использованием регрессионных моделей является стандартной практикой в лабораторных и промышленных условиях, но она имеет некоторые серьезные ограничения в сложной установке сушки, в первую очередь в отношении количества используемых переменных (обычно два: содержание влаги и время высыхания) [2]. Современные эмпирические математические модели корреляции между временем высыхания, как входным параметром и содержанием воды, как выходным параметром дают отличные прогнозы для одного конкретного эксперимента. Некоторые из наиболее часто используемых моделей сушки представлены ниже.

$$MR = \exp(-k \cdot t_n) \quad (1)$$

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (2)$$

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c \quad (3)$$

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t) \quad (4)$$

Внесение каких-либо изменений в параметры сушки приводит к неспособности ранее установленной эмпирической модели соответствовать но-

вым экспериментальным данным. Поэтому сложно найти такую модель, которая удовлетворяла бы всему диапазону условий сушки. Основываясь только на одном входном параметре, существующие модели не подходят для промышленного управления процессами сушки воздуха.

Искусственные нейронные сети могут преодолеть это ограничение и при правильном использовании могут включать данные всех входных переменных, давая значения для одной или нескольких выходных переменных. Модели, основанные на использовании нейронных сетей, имеют возможность устанавливать веса для каждой единицы или каждого нейрона в сети. Эти свойства эвристических моделей не требуют параметров физических моделей и могут быть изучены только из экспериментальных данных, даже при работе со сложными системами с нелинейным взаимодействием между несколькими переменными решения. Это позволяет вводить несколько переменных с разными уровнями значимости, что, после обучения, дает значения для соответствующей выходной переменной. Наиболее популярными сетями для моделирования процессов сушки пищевых продуктов являются многослойные перцептроны. Эти сети состоят из идентичных нейронов, организованных слоями, со связями между каждой единицей в соседних слоях. В типичной сети прямой связи с обратным распространением, входные данные подаются на входной слой, состоящий из того же количества нейронов. Выходные значения из входного слоя распространяются через нейроны в скрытом слое в зависимости от веса каждого нейрона и с использованием нелинейной сигмоиды, гиперболического тангенса или простых линейных передаточных функций. Эти сети состоят из идентичных нейронов, организованных слоями, со связями между каждой единицей в соседних слоях.

После прохождения одного или нескольких скрытых слоев данные передаются на выходной слой, а результат преобразуется и направляется в выходные переменные. Этот структурный метод распространения был признан наиболее стабильным и предпочтительным по сравнению с другими типами сетей. Следующим шагом после прямого прохода является обратный проход, при котором ошибки с выходного уровня отправляются обратно на входной уровень. На этом этапе веса и взаимосвязи были скорректированы с целью минимизации ошибки и определения наилучшего соответствия экспериментальным данным. После этапа обучения сети выполняется проверка с использованием свежего набора данных и тестирование производительности сети, чтобы обеспечить минимальную ошибку.

В статье эмпирические модели сушки пищевых материалов будут адаптированы к экспериментальным данным, полученным с использованием предварительной ультразвуковой обработки и сушки яблок. Модели будут сравниваться с смоделиро-

ванной искусственной нейронной сетью, и на основе статистического анализа будет выбрана лучшая.

Объекты и методы исследований

Свежие яблоки сорта Голден очищали от кожуры и нарезали дольками размером 5·5 см толщиной 0,25 и 0,5 см. Приблизительно 50 г яблочных ломтиков погружали в 200 мл дистиллированной воды в стакане на 250 мл. Начальная температура дистиллированной воды составляла 22°C, а влажность была постоянной на протяжении всех экспериментов. Ультразвуковой зонд погружали на 1 см ниже поверхности воды. Обработку жидкости с погруженными образцами с помощью высокоинтенсивного ультразвука проводили в течение 7 минут. Контрольный образец погружали в воду на 7 минут без ультразвуковой обработки. После обработки ломтики яблок помещали в инфракрасную сушилку и анализатор влажности с температурой сушки 55°C и 65°C. Во время проведения эксперимента в инфракрасной сушилке массу образцов регистрировали каждую минуту до тех пор, пока не наблюдалось существенной разницы между десятью последующими показаниями.

Был проведен статистический анализ и созданы математические модели вместе с моделями нейронной сети в программе Statistica [6]. Для каждого запуска рассчитывали абсолютную влажность (X/X_0) на основе уравнения 1, а расчет параметров для выбранных моделей для описания поведения пищевых материалов при сушке проводился на основе экспериментальных данных.

$$\frac{X}{X_0} = MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (5)$$

где M_e – равновесная влажность, M_0 – исходная влажность.

Используя нелинейную оценку с заданной пользователем регрессией и минимизацией методом наименьших квадратов, а также аппроксимацию уравнений диффузии подгоняли к экспериментальным данным [10, 11]. На основе среднеквадратичной ошибки и коэффициента корреляции выбиралась лучшая модель и сравнивалась с моделью нейронной сети.

В качестве подходящего типа сети для обучения на экспериментальных данных был выбран многослойный перцептрон. Выбранными входными переменными были амплитуда ультразвука, толщина ломтиков яблока и температура сушки, с содержанием воды в качестве выходной переменной, как показано на рисунке 1.

Чтобы оценить динамическое поведение при сушке, значения входных переменных были случайным образом взяты из набора экспериментальных данных и разделены на три части. Первый набор (70% данных) использовался в качестве обучаю-

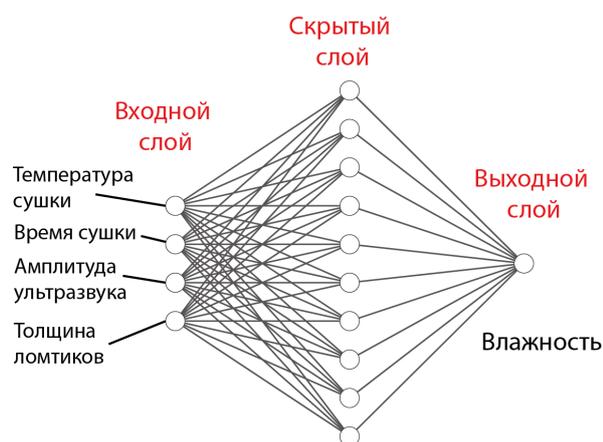


Рис. 1. Модель искусственной нейронной сети на основе 4 входов, скрытого слоя с неизвестным пока количеством нейронов и выходного слоя, используемого для подгонки экспериментальных данных

щих данных для нейронных сетей, а второй набор (20% данных) использовался для проверки сетей и оценки качества сети на этапе обучения. Третий набор (10% данных) использовался как новые данные для тестирования производительности сети, и, следовательно, этот раздел никогда не использовался в обучении. Один скрытый слой был выбран как адекватный, а начальное количество нейронов было установлено равным половине суммы входных и выходных нейронов. Увеличение числа нейронов в сети проводится до тех пор, пока ошибка подбора не достигнет удовлетворительного уровня, что предотвращает чрезмерное обучение сети и неадекватное соответствие проверочным данным.

Чтобы учесть влияние других переменных параметров сушки, помимо амплитуды ультразвука, и для сравнения моделей с нейронной сетью, константы в моделях сушки были регрессированы в зависимости от толщины среза и температуры сушки с использованием множественного регрессионного анализа. Комбинации с самым высоким значением R были включены в окончательную модель, что обеспечило наилучшее соответствие всем собранным экспериментальным данным [15].

Результаты и их обсуждение

Основываясь на экспериментально собранных данных, амплитуда ультразвука оказывает значительное влияние на время сушки, независимо от температуры сушки и толщины ломтика. Взрыв кавитационных пузырьков и последующее высвобождение высоких температур и давлений повлияли на ткань плода, изменение структуры погруженных образцов [12]. Увеличение амплитуды приводит к увеличению интенсивности кавитации, которая открывает поры в образцах яблок и создает новые. Большее количество пор и расширение уже имеющихся пор замедляло запечатывание пор при сушке, что обеспечивало более быструю диффузию воды к поверхности образца и продлевало первую фазу сушки с практически линейным падением содержания воды. С увеличением ам-

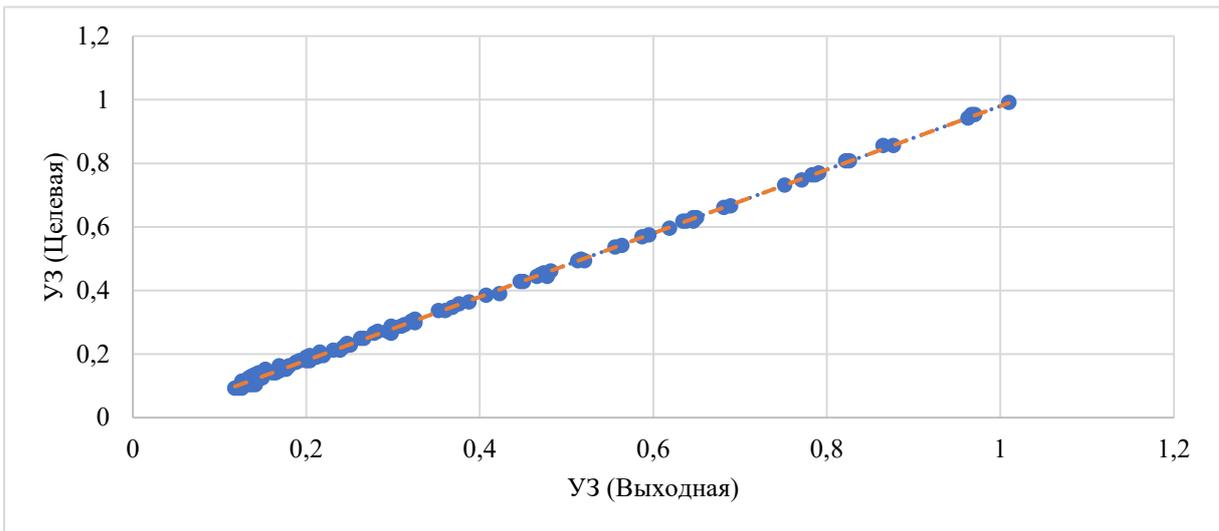


Рис.2. Расчетные и экспериментальные данные искусственной нейронной сети для содержания воды в ломтиках яблока

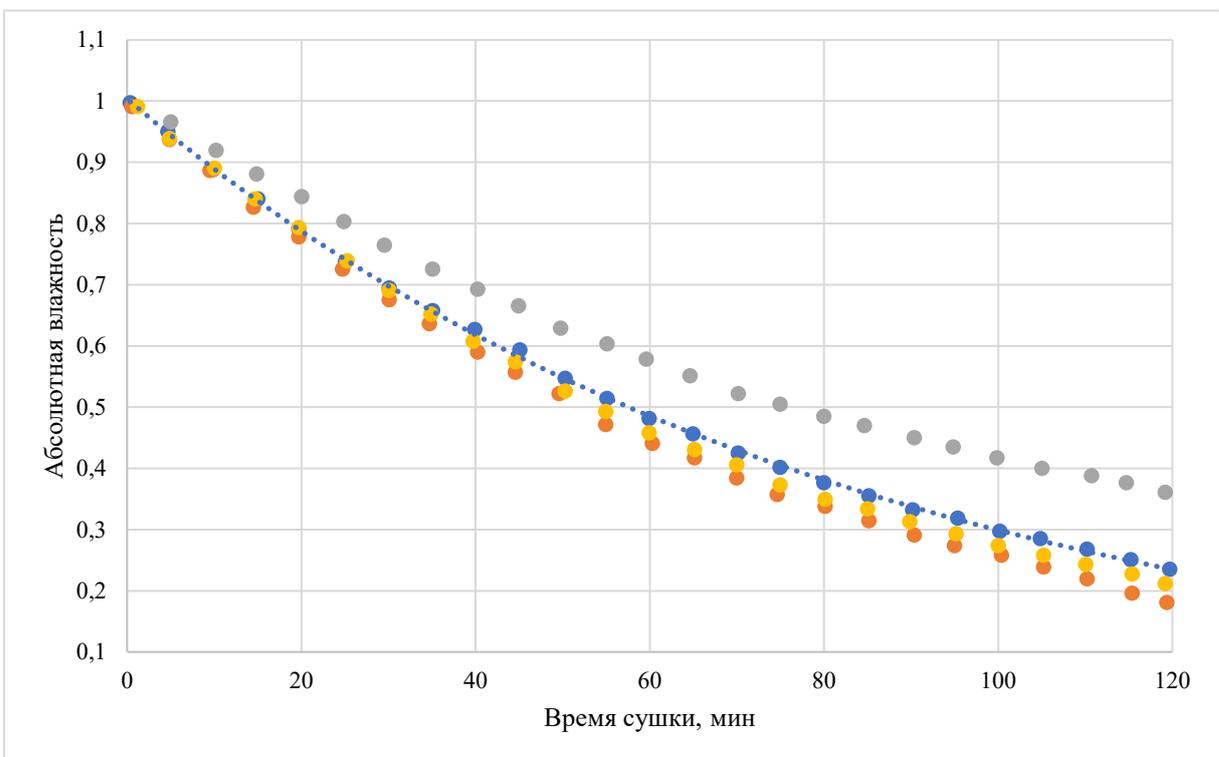


Рис. 3. Модель 2, подогнанная к одному набору данных (25 % амплитуды) и сравнение с 4 другими наборами экспериментальных данных (без ультразвуковой обработки, 50 %, 75 % и 100 % максимальной амплитуды) при 65°C

плитуды время сушки сокращается со 140 минут для необработанных образцов до минимум 87 минут для образцов, обработанных на 100% от максимальной амплитуды. Очевидно, что предварительная ультразвуковая обработка еще больше усложняет подгонку эмпирических математических моделей к экспериментально полученным данным. Более короткое время сушки, достигнутое с помощью ультразвуковой обработки, и различные кривые сушки показали, что модели, основанные исключительно на времени сушки, оказались непригодными для использования в прогнозировании и контроле процесса сушки. Очевидно, что предварительная ультразвуковая обработка еще больше усложняет подгонку эмпирических математических моделей к экспериментально полученным

данным. Более короткое время сушки, достигнутое с помощью ультразвуковой обработки, и различные кривые сушки показали, что модели, основанные исключительно на времени сушки, оказались непригодными для использования в прогнозировании и контроле процесса сушки.

Наилучшей эмпирической корреляцией для описания поведения ломтиков яблок при сушке оказалось приближение диффузии с $R2 = 0,99132$, полученным для одного конкретного эксперимента. Для сравнения, лучшая искусственная нейронная сеть была выбрана на основе ошибок при обучении и тестировании производительности.

Многослойный перцептрон с 12 нейронами с использованием алгоритма BFGS, функции логисти-

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции, выбранные на основе множественного регрессионного анализа для экспериментальных моделей и сравненные с моделью искусственной нейронной сети

Модель	Параметры	R2
1	$k=0,01018$; $n=1,03412$	0,980
2	$a=1,01408$; $k=0,011996$	0,953
3	$a=1,00057$; $k=0,012354$; $c=0,015823$	0,990
4	$a=-0,02168$; $k=0,256448$; $b=0,047254$	0,991
Искусственная нейронная сеть		0,999

ческого преобразования в скрытом слое и функции активации гиперболического тангенса в выходном слое имела ошибку обучения 0,9995 и ошибку на этапе тестирования 0,9991. Большее количество нейронов приводит к лучшему соответствию обучающим данным, но не может удовлетворительно пройти фазу тестирования. На рисунках 2 и 3 показано превосходное соответствие модели искусственной нейронной сети, при этом прогнозируемые и выходные значения подгоняются независимо от используемой температуры сушки, амплитуды или толщины среза. Результаты показывают, что графики между прогнозируемым и

экспериментальным содержанием воды в образцах представляли собой почти прямую линию для процессов обучения и проверки с минимальной ошибкой.

Коэффициенты корреляции протестированных эмпирических моделей, представленные в таблице 1, показывают значительно более низкие значения, что указывает на то, что полученная искусственная нейронная сеть демонстрирует значительно лучшее соответствие экспериментальным данным. Способность прогнозирования обученной искусственной нейронной сети является лучшей из всех исследованных моделей, независимо от используемых параметров

Выводы

Модель искусственной нейронной сети со значительно меньшей среднеквадратической ошибкой по сравнению с эмпирическими моделями должна быть предпочтительным методом для точного описания поведения при сушке. Используя искусственную нейронную сеть, можно успешно моделировать применение ультразвука в операциях сушки, поскольку этот тип эвристической сети не ограничивается строго конкретными экспериментами и допускает широкий диапазон значений для большего количества входных параметров.

Литература

- [1] Menlik T., Özdemir M.B., Kirmaci V. Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network // *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2010. Т. 37. № 12. С. 7669–7677.
- [2] Movagharnejad K., Nikzad M. Modeling of tomato drying using artificial neural network // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2007. Vol. 59. № 1. P. 78–85.
- [3] Textural properties of infra red dried apple slices as affected by high power ultrasound pre-treatment / M. Brncic [et al.] // *African Journal of Biotechnology*. 2010. Vol. 9. № 41. P. 6907–6915.
- [4] Toğrul H. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices : Special Section on Finite Element Modelling of Foods // *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 71. № 3. P. 311–323.
- [5] Ultrasound-Assisted Infrared Drying of Pear Slices: Textural Issues / F. Dujmić [et al.] // *Journal of Food Process Engineering*. 2013. Vol. 36. Ultrasound-Assisted Infrared Drying of Pear Slices. № 3. P. 397–406.
- [6] Курочкин А.А., Фролов Д.И. Обоснование аэродинамических параметров эжектора термовакуумного экструдера // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 3 (55). С. 12–18.

References

- [1] Menlik T., Özdemir M.B., Kirmaci V. Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network // *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2010. V. 37. No. 12. S. 7669–7677.
- [2] Movagharnejad K., Nikzad M. Modeling of tomato drying using artificial neural network // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2007 Vol. 59. No. 1. P. 78–85.
- [3] Textural properties of infra red apple slices as affected by high power ultrasound pre-treatment / M. Brncic [et al.] // *African Journal of Biotechnology*. 2010 Vol. 9. No. 41. P. 6907–6915.
- [4] Toğrul H. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices : Special Section on Finite Element Modeling of Foods // *Journal of Food Engineering*. 2005 Vol. 71. No. 3. P. 311–323.
- [5] Ultrasound-Assisted Infrared Drying of Pear Slices: Textural Issues / F. Dujmić [et al.] // *Journal of Food Process Engineering*. 2013. Vol. 36. Ultrasound-Assisted Infrared Drying of Pear Slices. No. 3. P. 397–406.
- [6] Kurochkin A.A., Frolov D.I. Justification of the aerodynamic parameters of the ejector of a thermal vacuum extruder // *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2021. No. 3 (55). pp. 12–18.
- [7] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Voronina P.K. Determination of the main parameters of the vacuum

- [7] Курочкин А.А., Фролов Д.И., Воронина П.К. Определение основных параметров вакуумной камеры модернизированного экструдера // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 4 (32). С. 172–177.
- [8] Моделирование работы ботвоудаляющей машины с анализом потоков воздуха внутри ее кожуха / Д.И. Фролов, А.А. Курочкин, О.Н. Кухарев, Н.П. Ларюшин // Нива Поволжья. 2016. № 3 (40). С. 105–111.
- [9] Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д. И. Фролов, А. А. Курочкин, П. К. Гарькина [и др.] // Нива Поволжья. – 2019. – № 2(51). – С. 134-143. – EDN BIRIFZ.
- [10] Технологические аспекты регулирования выхода экстракта при получении пивного суслу / П.К. Гарькина, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2020. Т. 8. № 2. С. 13–20.
- [11] Фролов Д.И., Курочкин А.А., Шабурова Г.В. Определение оптимальных параметров ботвоудаляющей машины на посевах лука // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 1 (29). С. 120–126.
- [12] Фролов Д.И., Фудин К.П. Влияние конвективной сушки и температурного режима на содержание химических веществ в репчатом луке // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2016. № 1 (29). С. 84–89.
- [13] Дипломное проектирование по механизации переработки сельскохозяйственной продукции /А.А. Курочкин, И.А. Спицын, В.М. Зимняков и др. Под ред. А.А. Курочкина. М.: КолосС, 2006. – 424 с. EDN: RCJTDT.
- [14] Оптимизация состава зернопродуктов при получении пивного суслу с использованием экструдированного ячменя / Г. В. Шабурова, А. А. Курочкин, П. К. Воронина, Д. И. Фролов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 6(22). – С. 103-109. – EDN TKJLIH.
- [15] Рациональные технологические параметры при производстве поликомпонентного композита на основе семян льна / В. М. Зимняков, О. Н. Кухарев, А. А. Курочкин, Д. И. Фролов // Нива Поволжья. – 2017. – № 4(45). – С. 157-163. – EDN ZTIERL.
- chamber of the modernized extruder // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2015. No. 4 (32). pp. 172–177.
- [8] Simulation of the operation of a haulm-removing machine with the analysis of air flows inside its casing / D.I. Frolov, A.A. Kurochkin, O.N. Kukharev, N.P. Laryushin // Niva of the Volga region. 2016. No. 3 (40). pp. 105–111.
- [9] Improving the efficiency of extrudate dehydration in the vacuum chamber of a modernized extruder / D. I. Frolov, A. A. Kurochkin, P. K. Garkina [et al.] // Niva Povolzhya. - 2019. - No. 2 (51). - pp. 134-143. – EDN BIRIFZ.
- [10] Tekhnologicheskie aspekty regulirovanie vykhoda ekstrata pri polucheniiya beernogo wort / P.K. Garkina, A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and biotechnologies. 2020. V. 8. No. 2. S. 13–20.
- [11] Frolov D.I., Kurochkin A.A., Shaburova G.V. Determining the optimal parameters of a haulm-removing machine for onion crops // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2015. No. 1 (29). pp. 120–126.
- [12] Frolov D.I., Fudin K.P. Influence of convective drying and temperature conditions on the content of chemicals in onions // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2016. No. 1 (29). pp. 84–89.
- [13] Diplomnoe proektirovanie po mehanizacii pererabotki sel'skhozjajstvennoj produkcii /A.A. Kurochkin, I.A. Spicyn, V.M. Zimnjakov i dr. Pod red. A.A. Kurochkina. M.: KolosS, 2006. – 424 p. EDN: RCJTDT
- [14] Optimization of the composition of grain products when obtaining beer wort using extruded barley / G. V. Shaburova, A. A. Kurochkin, P. K. Voronina, D. I. Frolov // XXI century: results of the past and problems of the present plus. - 2014. - No. 6(22). - pp. 103-109. – EDN TKJLIH.
- [15] Rational technological parameters in the production of a polycomponent composite based on flax seeds / V. M. Zimnyakov, O. N. Kukharev, A. A. Kurochkin, D. I. Frolov // Niva Povolzhya. - 2017. - No. 4 (45). - pp. 157-163. – EDN ZTIERL.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>
<p>Боровков Ярослав Евгеньевич магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: E-mail:</p>	<p>Borovkov Yaroslav Evgenievich undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University Phone: E-mail:</p>