

Научная статья

УДК 658.26:[664.956:639.22]

DOI 10.24888/2541-7835-2023-28-66-74

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ СУШКИ СЛАЙСОВ ФИЛЕ БЫЧКА АЗОВСКОГО

Яшонков Александр Анатольевич^{1✉}, Прокопенко Ирина Александровна²

¹ Керченский государственный морской технологический университет, Республика Крым, Керчь, Россия

² Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹ jashonkov@rambler.ru[✉]

² iaprokopenko.sevsu@mail.ru

Аннотация. С целью повышения энергоэффективности процесса переработки рыбного сырья, а также качества получаемых сушеных продуктов была разработана конструкция гибридной сушильной установки, с совмещенным инфракрасным и конвективным подводом энергии. Установка может быть использована для сушки овощей, фруктов, мясных и рыбных продуктов. Работоспособность установки и обеспечение ею заданных параметров сушки были проверены экспериментально на примере сушки слайсов филе бычка азовского (*Neogobius melanostomus*), толщиной 3 мм со скоростью 0,8 м/с при трех температурах 40, 50 и 60 °С и интенсивностью инфракрасных нагревателей 1500, 2000 и 3000 Вт/м². Теоретически кинетика процесса сушки была описана согласно моделей Ньютона, Ванга и Сингха, в том числе для прогнозирования коэффициента влажности. В результате экспериментальных исследований установлено, что все исследуемые модели показали адекватное прогнозирование искомого коэффициента. Гибридное инфракрасное излучение и конвективная сушка обеспечили эффективность с точки зрения сокращения продолжительности процесса сушки, экономия времени составила 190-260% по сравнению с конвективной и инфракрасной сушкой. Кроме того, наблюдалось значительное улучшение способности к регидратации. Фактически применение комбинированного гибридного способа сушки и предлагаемой конструкции сушилки может стать альтернативой другим видам сушилок в рамках промышленных предприятий, так как она обладает потенциалом для экономии энергии и улучшения качества высушенных продуктов.

Ключевые слова: сушка, *Neogobius melanostomus*, конвективная сушка, инфракрасная сушка, энергоэффективность.

Для цитирования: Яшонков А.А., Прокопенко И.А. Исследование процесса комбинированной сушки слайсов филе бычка азовского // Агропромышленные технологии Центральной России. 2023. № 2(28). С. 66-74. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-28-66-74>.

Original article

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF COMBINED DRYING OF SLICES OF THE AZOV BULL FILLET

Alexander A. Yashonkov^{1✉}, Irina A. Prokopenko²

¹ Kerch State Maritime Technological University, Republic of Crimea, Kerch, Russia

² Sevastopol state University, Sevastopol, Russia

¹ jashonkov@rambler.ru[✉]

² iaprokopenko.sevsu@mail.ru

Abstract. In order to increase the energy efficiency of the processing of fish raw materials, as well as the quality of the dried products obtained, the design of a hybrid drying plant with combined infrared and convective energy supply was developed. The unit can be used for drying vegetables, fruits, meat and fish products. The operability of the installation and its provision of the specified drying parameters were tested experimentally on the example of drying slices of Azov goby fillet (*Neogobius melanostomus*) with a thickness of 3 mm at a speed of 0.8 m/s at three temperatures of 40, 50 and 60 °C and the intensity of infrared

heaters 1500, 2000 and 3000 W/m². Theoretically, the kinetics of the drying process was described according to the Newton, Wang and Singh models, including for predicting the humidity coefficient. As a result of experimental studies, it was found that all the studied models showed an adequate prediction of the desired coefficient. Hybrid infrared radiation and convective drying provided efficiency in terms of reducing the duration of the drying process, saving time was 190-260% compared to convective and infrared drying. In addition, there was a significant improvement in the ability to rehydrate. In fact, the use of a combined hybrid drying method and the proposed dryer design can become an alternative to other types of dryers within industrial enterprises, since it has the potential to save energy and improve the quality of dried products.

Keywords: drying, *Neogobius melanostomus*, convective drying, infrared drying, energy efficiency.

For citation: Yashonkov A.A., Prokopenko I.A. Investigation of the process of combined drying of slices of the azov bull fillet. *Agro-industrial technologies of Central Russia*. 2023. No. 2(28). Pp. 66-74. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-28-66-74>.

Введение

С целью продления срока хранения пищевых продуктов, в том числе гидробионтов, применяют различные способы консервирования. Одним из распространенных способов является сушка. Технология сушки играет важную роль для повышения качества готовой продукции, а также снижения ее себестоимости. Конвективная сушка горячим воздухом широко используется для сушки фруктов, овощей и гидробионтов. Однако значительная продолжительность процесса приводит к высокому потреблению энергии и, следовательно, является одной из основных проблем, связанных с конвективной сушкой [1]. Одним из конкретных вариантов снижения энергопотребления в технологии сушки является разработка гибридных сушильных установок, которые имеют возможность совмещать различные системы нагрева для эффективного использования энергии.

Были проведены исследования по сушке овощей, фруктов, мясных и рыбных продуктов с использованием различных способов подвода теплоты, таких как вакуумная микроволновая сушка, сушка горячим воздухом, микроволновая сушка, инфракрасная и сублимационная сушка [2, 4]. Например, влияние предварительной ультразвуковой обработки на дольки чеснока перед сушкой горячим воздухом и микроволновой сушкой было изучено Бозкиром [5]. По сравнению с контрольными образцами, скорость сушки увеличилась почти на 20% и 15% соответственно. По сравнению с конвективной сушкой, удельное потребление энергии при микроволновом конвективном методе сушки может достигать 90%.

Для улучшения качества готового продукта и снижения энергопотребления была разработана гибридная сушилка, состоящая из конвективной системы горячего воздуха и инфракрасной системы нагрева.

Целью исследования было изучение влияния гибридного подвода теплоты при сушке слайсов филе бычка азовского горячим воздухом и инфракрасным излучением на качество готовых снеков, а также оценка энергоэффективности предлагаемого процесса и регидратационной способности продукта.

Материалы и методы исследований

Описание гибридной сушилки

Процесс сушки слайсов филе проводился в разработанной гибридной сушилке. Система нагрева которой состоит из двух источников, включающих конвективный подвод энергии (обдув горячим воздухом) и систему инфракрасного нагрева. Принципиальная схема сушилки показана на рис. 1.

Конвекционная система подачи горячего воздуха состоит из двух электрических нагревателей и вентилятора, который обеспечивал необходимую скорость сушильного агента (0,5-5,0 м/с). На входе подающей воздух трубы расположен регулирующий клапан для контроля количества воздуха, поступающего в сушильную камеру. Воздух нагревается, проходя через два спиральных электронагревателя мощностью 2,5 кВт каждый. Эти электронагреватели регулируются контрольно-измерительными приборами.

Система инфракрасного нагрева оснащена трубчатыми инфракрасными лампами мощностью 1000 Вт диаметром 1,0 см и длиной 38 см. Инфракрасный нагреватель с интенсивностью нагрева 1500-6000 Вт/м² установлен в верхней части внутренней поверхности сушильных камер для обеспечения равномерности прогрева. Инфракрасные лампы были размещены параллельно конвейерной ленте и на расстоянии 10 см друг от друга. Интенсивность инфракрасного излучения или выходная мощность ламп может быть изменена путем регулирования напряжения через регулятор мощности.

Таким образом, гибридная сушилка позволяет использовать конвективную и инфракрасную сушку одновременно или по отдельности. Температура воздуха при сушке рассчитывалась с помощью термодатчиков Т-типа, соединенных с регистратором данных (точность измерений ± 1 °С).

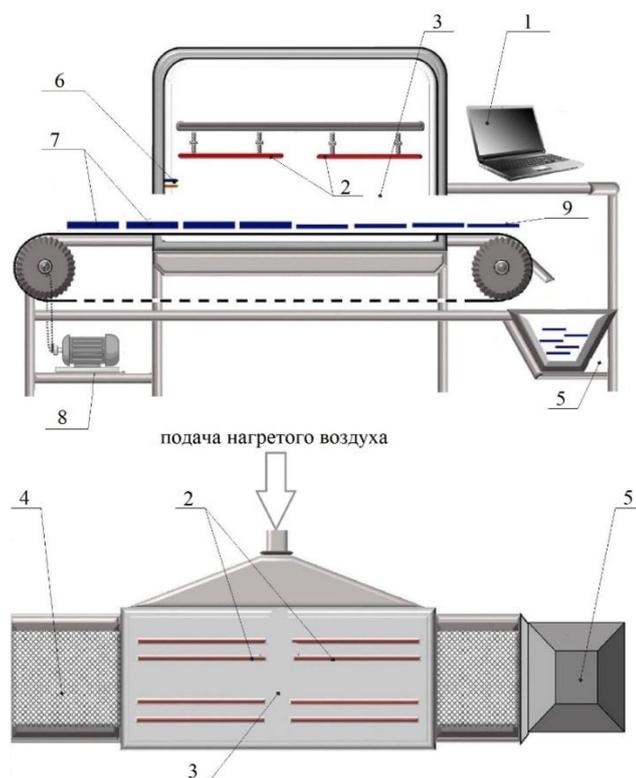


Рисунок 1. Схема экспериментальной гибридной сушильной установки (вид спереди, вид сверху): 1 – компьютер для управления установкой и регистрации параметров процесса; 2 – инфракрасные нагреватели; 3 – сушильная камера; 4 – конвейер ленточный; 5 – выходной бункер для сухих образцов; 6 – датчик температуры и скорости; 7 – исходное сырье; 8 – электрический двигатель; 9 – готовый продукт

Подготовка образцов

Мороженую рыбу размораживали в проточной воде температурой не выше 20°С. Соотношение массы рыбы и воды должно быть 1:2. Размораживали рыбу до полного распада блока. Разделку проводили на филе. После разделки филе промывали в воде температурой не выше 20°С, затем направляли на посол. Посол проводили в солевом растворе, плотность которого составляла от 1,18 г/см³ до 1,20 г/см³ с температурой не выше 15°С при соотношении массы рыбы и солевого раствора 1:2. Посол рыбы заканчивали при достижении массовой доли поваренной соли в мясе рыбы от 3 % до 5 %. Филе нарезали на слайсы толщиной $3 \pm 0,25$ мм. Начальное содержание влаги в слайсах определялось путем высушивания примерно 20 г образца в вакуумной печи при 70 °С и 85 кПа в течение 24 ч. Было установлено, что начальное содержание влаги в филе составляет около $79,1 \pm 0,8\%$.

Подготовка оборудования и проведение эксперимента

Обязательным являлся предварительный прогрев сушильной установки в течение 45-60 минут до заданной температуры. Слайсы филе размещали на сетке из нержавеющей стали и перемещали в сушильную камеру. В первой серии экспериментов слайсы сушили с использованием конвективной сушки при трех температурах 40, 50 и 60 °С и скорости воздуха 0,8 м/с. Во второй серии экспериментов использовали инфракрасную сушку с тремя интенсивностями 1500, 2000 и 3000 Вт/м². В третьей серии экспериментов обе системы нагрева были объединены. Слайсы филе бычка азовского сушили гибридной сушилкой с интенсивностью инфракрасного излучения 1500, 2000 и 3000 Вт/м² при температуре конвективного воздуха 40, 50 и 60 °С при постоянной скорости воздуха 0,8 м/с.

Изменение веса наблюдали каждые 10 мин с помощью цифровых весов с точностью ±0,01 г, пока не был получен постоянный вес.

Кинетика сушки слайсов филе была представлена как уменьшение соотношения влажности (W) в зависимости от времени сушки (t). Соотношение влажности описывается уравнением (1):

$$W = \frac{W_t - W_e}{W_0 - W_e}, \quad (1)$$

где W_t – содержание влаги в образцах по истечении времени t ;

W_e – равновесная влажность;

W_0 – начальное содержание влаги.

Поскольку значения W_e были сравнительно незначительными по сравнению с W_t или W_0 , и, как следствие, их можно считать равными нулю для условий сушки, подобных тем, которые применялись в этих исследованиях. Уравнение (1) было упрощено в уравнении (2):

$$W = \frac{W_t}{W_0}. \quad (2)$$

Уравнение (3) использовалось для расчета скорости сушки (DR) [7]:

$$DR = \frac{W_{ct1} - W_{ct2}}{t_2 - t_1}, \quad (3)$$

где W_{ct1} и W_{ct2} – содержание влаги при времени высыхания t_1 и t_2 соответственно;

t_1 и t_2 – разное время (мин).

Три полуэмпирические модели сушки (уравнения Ньютона (4), (5) [8] и уравнение Ванг и Сингха (6) [9]) были использованы для описания кинетики сушки слайсов филе бычка азовского.

$$W = e^{-kt}, \quad (4)$$

$$W = e^{-kt^n}, \quad (5)$$

$$W = 1 + at + bt^2. \quad (6)$$

Основываясь на втором законе диффузии Фика, эффективная диффузия влаги была описана в период снижения скорости сушки (уравнение (7)):

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 W. \quad (7)$$

Уравнение (7) основано на предположениях Кранка [10] (постоянная диффузионная способность, изменение объема, одномерное перемещение влаги, постоянная температура и незначительное внешнее сопротивление). Таким образом, уравнение (7) может быть записано в виде уравнения (8):

$$W = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}}, \quad (8)$$

где D_{eff} – постоянная эффективная диффузионная способность (м²/с);

L – соответствует половине толщины слайса филе.

Для длительного времени высыхания используется только первый член уравнения. Таким образом, уравнение (8) может быть упрощено до уравнения (9):

$$W = \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}}. \quad (9)$$

Уравнение (9) может быть записано в логарифмической форме уравнения (10):

$$\ln W = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left[\pi^2 \frac{D_{eff}}{4L^2} t \right]. \quad (10)$$

Для построения графика $\ln W$ относительно t наклон k_0 можно определить по уравнению (11) [6]:

$$k_0 = \pi^2 \frac{D_{eff}}{4L^2}. \quad (11)$$

Способность к регидратации

Согласно рекомендациям [5], способность к регидратации оценивали путем погружения сушеных слайсов филе в горячую воду. Уравнение (12) было использовано для расчета способности к регидратации (RC):

$$RC = \frac{W_r}{W_d}, \quad (12)$$

где W_r и W_d – масса обезвоженных слайсов филе (г) и масса сушеных слайсов филе (г) соответственно.

Результаты исследований и их обсуждение

Кинетика сушки слайсов филе бычка азовского

Графическая интерпретация кинетики процесса сушки слайсов филе бычка азовского, высушенного с использованием двух различных систем нагрева (т.е. конвективной сушкой и инфракрасной сушкой), показана на рисунке 2 (а, б). Согласно рисунку 2, можно сделать вывод, что во всех случаях сушки содержание влаги снижалось быстрее на ранних стадиях сушки (в течение 15-45 мин) и уменьшалось с увеличением времени сушки. Постоянные периоды (первая стадия) сушки отсутствовали во всех случаях сушки в то время как большая часть удаленной влаги приходилось на периоды падающей скорости сушки.

Анализ данных из рисунка 2 показывает, что температура сушильного агента и интенсивность инфракрасного излучения являются важными параметрами, влияющими на обезвоживание слайсов филе. Установлено, что происходит существенное сокращение времени сушки при увеличении указанных выше параметров. Однако значительное их увеличение снижает качество готовых продуктов. Дополнительно, важным параметром, влияющим на качество продукта, является продолжительность сушки, что также увеличивает потребление энергии и, как следствие, приводит к высокой себестоимости производства. Согласно исследованиям [11], это явление объясняется высоким содержанием влаги, и по принципу диффузии свободная вода легко удаляется в начальный период сушки.

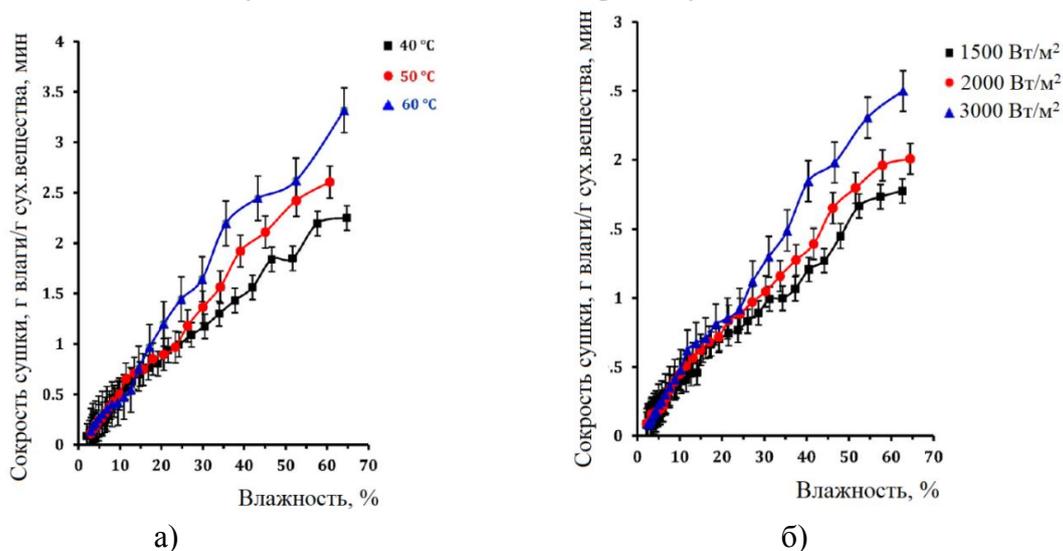


Рисунок 2. Изменение влажности продукта в зависимости от времени сушки при сушке слайсов филе бычка азовского способом конвективной (а) и инфракрасной (б) сушки

По результатам экспериментальных исследований были получены кривые скорости сушки (рис. 3 а, б). Скорость сушки непрерывно снижалась по мере снижения влажности сырья. Анализ результатов исследований (рис. 3) подтверждает отсутствие периода постоянной скорости сушки

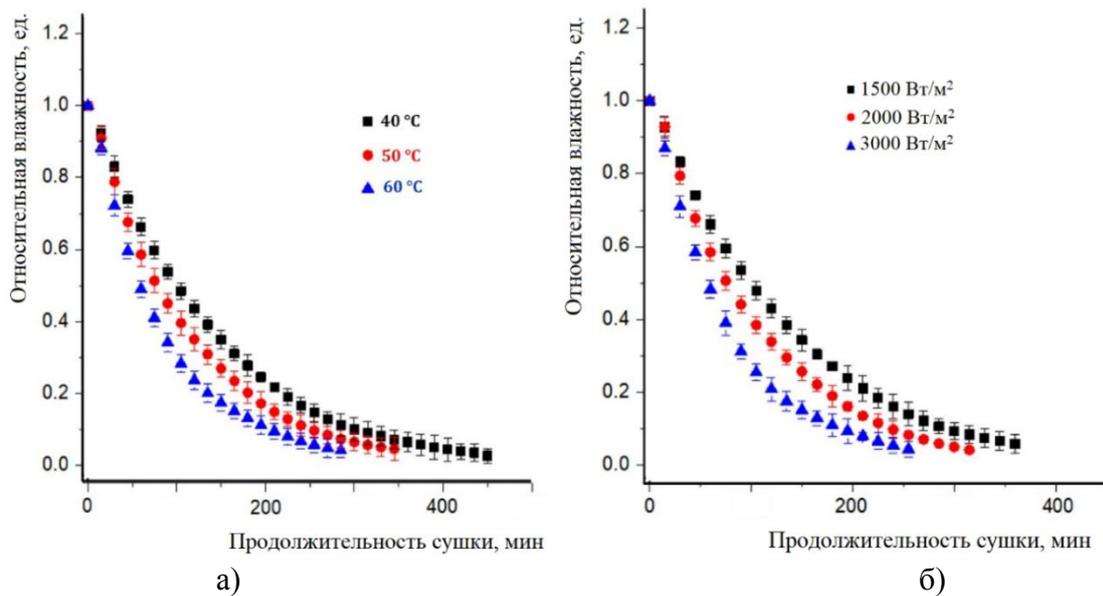


Рисунок 3. Экспериментальные данные зависимости скорости сушки от влажности слайсов филе бычка азовского способом конвективной (а) и инфракрасной (б) сушки

Кинетика процесса гибридной сушки представлена на рисунке 4. Кривые сушки показывают, что относительная влажность непрерывно уменьшалась. Как видно по результатам экспериментов, время исследуемого процесса было значительно сокращено за счет применения гибридной сушилки с комбинированным подводом теплоты. В относительном выражении сокращение составило приблизительно 260% (80-125 мин) по сравнению с конвективной сушкой (290-450 мин) и в диапазоне 190-220% по сравнению с инфракрасной системой сушки (255-360 мин).

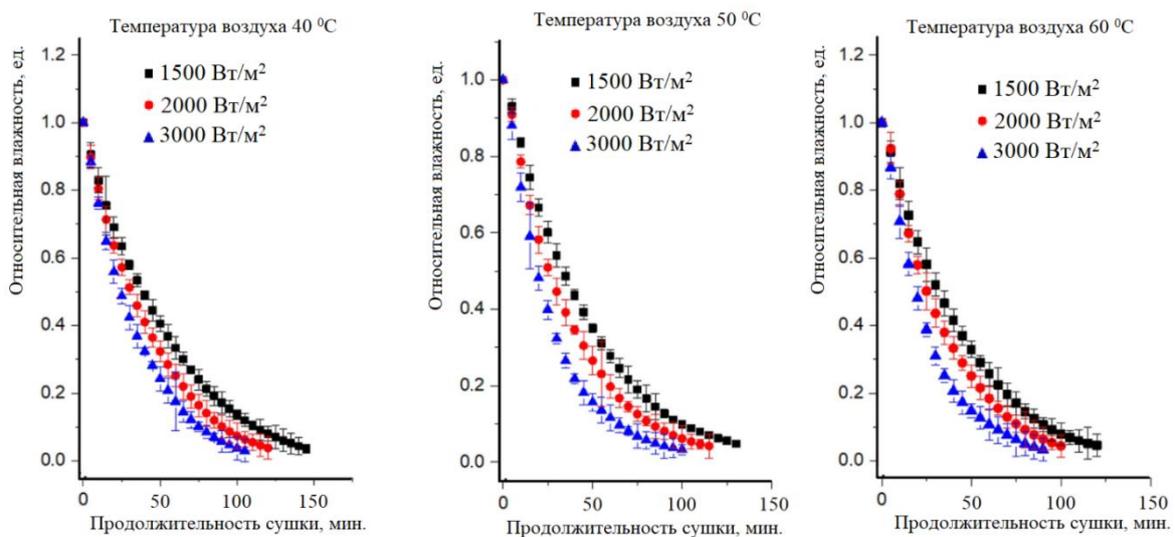


Рисунок 4. Изменение соотношения относительной влажности в зависимости от продолжительности процесса гибридной сушки слайсов филе бычка азовского

Согласно исследованиям [11], инфракрасный нагрев создает температурный градиент, который приводит к термодиффузии пара от внутренней части к поверхности высушиваемого образца в отличие от обычной диффузии, проявляемой конвективными сушилками. Однако такие характеристики инфракрасного нагрева оказывают разрушающее действие на термолабильные соединения, например, витамины, по сравнению с сушкой горячим воздухом [3]. Следовательно, объединение инфракрасного излучения с другой системой сушки потенциально может улучшить качество готовой продукции [3].

Оценка качества готового продукта

Одним из важных показателей качества готовой продукции является способность к регидратации. Результаты исследований восстанавливаемости рыбных снеков приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований по определению способности к регидратации высушенных слайсов филе бычка азовского с применением различных способов сушки

Тип сушки	Интенсивность ИК нагревателя, Вт/м ²	Температура сушильного агента, °С	RC
Конвективная сушка		40	1,28
		50	1,34
		60	1,49
ИК сушка	1500		1,08
	2000		1,27
	3000		1,42
Гибридная сушка (конвективная + ИК)	1500	40	1,78
		50	1,83
		60	2,03
	2000	40	1,94
		50	2,17
		60	2,32
	3000	40	2,14
		50	2,25
		60	2,49

Увеличение способности к регидратации при применении гибридного способа сушки объясняется повышением эластичности клеточных стенок за счет объединения инфракрасной и тепловой систем подвода тепла, что приводит к увеличению влагоудерживающей способности мяса рыбы. Таким образом, можно сделать вывод, что применение способа гибридной сушки приводило к меньшему разрушению внутренней структуры ячейки.

Выводы

В ходе экспериментальных исследований была изучена кинетика процесса сушки слайсов филе бычка азовского различными способами: конвективная сушка со скоростью обдува 0,7 м/с при трех температурах 40, 50 и 60 °С; инфракрасная сушка с интенсивностью нагрева 1500, 2000 и 3000 Вт/м²; а также гибридная сушка путем комбинирования конвективной и инфракрасной сушки при указанных выше параметрах.

Установлено, что:

1. Применение гибридной сушки позволяет сократить продолжительность процесса сушки на 260% по сравнению с конвективной сушкой и на 190-220% по сравнению с инфракрасной.
2. Комбинирование способов подвода тепла позволяет увеличить влагоудерживающую способность готового продукта за счет меньшего разрушения внутренней структуры ячейки клетки мяса рыбы.

Дальнейшие исследования будут направлены на дополнительные исследования качества готового продукта, получаемого способом комбинированной гибридной сушки (например, влияние способа сушки на сохранность термолабильных витаминов), а также исследование энергоэффективности (удельных затрат энергии на получение готового продукта) предлагаемого способа сушки.

Список источников

1. Яшонков А.А., Косачев В.С. Инженерная модель сушки высоковлажных морепродуктов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 4. С. 296-303.
2. Яшонков А. А., Устинова М.Э., Косачев В.С. Анизотропная модель кинетики теплообмена в процессе сушки кубика рыбного филе // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2021. № 4. С. 274-286.
3. Antelo F.S., Costa J.A.V., Kalil S.J. Thermal degradation kinetics of the phycocyanin from *Spirulina platensis*. *Biochemical Engineering Journal*. 2008. Vol. 41. Pp. 43-47.
4. Baysal T., Icier F., Ersus S. et al. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology*. 2003. Vol. 218. Pp. 68-73.
5. Bozkir H., Rayman Ergün A., Tekgül Y. et al. Ultrasound as pretreatment for drying garlic slices in microwave and convective dryer. *Food Science and Biotechnology*. 2019. Vol. 28. Pp. 347-354.
6. Caliskan G., Dirim S.N. Drying characteristics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices in convective and freeze dryer. *Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 53. Pp. 2129-2141.
7. El-Mesery H.S., Mwithiga G. Performance of a convective, infrared and combined infrared-convective heated conveyor-belt dryer. *Journal of Food Science and Technology*. 2015. Vol. 52. Pp. 2721-2730.
8. Fernando J.A., Amarasinghe A.D. Drying kinetics and mathematical modeling of hot air drying of coconut coir pith. *SpringerPlus*. 2016. Vol. 5. Pp. 807.
9. Ibrahim N.A., Salleh K.M., Fudholi A., Zakaria S. Drying Regimes on Regenerated Cellulose Films Characteristics and Properties. *Membranes* 2022. Vol. 12. Pp. 445.
10. Lin Fu-Rong & Qiuya, Wang & Jin, Xiao-Qing. Crank-Nicolson-weighted-shifted-Grünwald-difference schemes for space Riesz variable-order fractional diffusion equations. *Numerical Algorithms*. 2021. Vol. 87. Pp. 601-631.
11. Mghazli S., Ouhammou M., Hidar N., Lahnine L., Idlimam A., Mahrouz M. Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. *Renewable & Green Energy*. 2017. Vol. 108. Pp. 303-310.

References

1. Yashonkov A.A., Kosachev V.S. Engineering model of drying of high-moisture seafood. *Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex – healthy food products*. 2022. No. 4. Pp. 296-303.
2. Yashonkov A. A., Ustinova M.E., Kosachev V.S. Anisotropic model of heat transfer kinetics in the process of drying a fish fillet cube. *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. 2021. No. 4. Pp. 274-286.
3. Antelo F.S., Costa J.A.V., Kalil S.J. Thermal degradation kinetics of the phycocyanin from *Spirulina platensis*. *Biochemical Engineering Journal*. 2008. Vol. 41. Pp. 43-47.
4. Baysal T., Icier F., Ersus S. et al. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology*. 2003. Vol. 218. Pp. 68-73.
5. Bozkir H., Rayman Ergün A., Tekgül Y. et al. Ultrasound as pretreatment for drying garlic slices in microwave and convective dryer. *Food Science and Biotechnology*. 2019. Vol. 28. Pp. 347-354.

6. Caliskan G., Dirim S.N. Drying characteristics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices in convective and freeze dryer. *Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 53. Pp. 2129-2141.
7. El-Mesery H.S., Mwithiga G. Performance of a convective, infrared and combined infrared-convective heated conveyor-belt dryer. *Journal of Food Science and Technology*. 2015. Vol. 52. Pp. 2721-2730.
8. Fernando J.A., Amarasinghe A.D. Drying kinetics and mathematical modeling of hot air drying of coconut coir pith. *SpringerPlus*. 2016. Vol. 5. Pp. 807.
9. Ibrahim N.A., Salleh K.M., Fudholi A., Zakaria S. Drying Regimes on Regenerated Cellulose Films Characteristics and Properties. *Membranes 2022*. Vol. 12. Pp. 445.
10. Lin Fu-Rong & Qiuya, Wang & Jin, Xiao-Qing. Crank-Nicolson-weighted-shifted-Grünwald-difference schemes for space Riesz variable-order fractional diffusion equations. *Numerical Algorithms*. 2021. Vol. 87. Pp. 601-631.
11. Mghazli S., Ouhammou M., Hidar N., Lahnine L., Idlimam A., Mahrouz M. Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. *Renewable & Green Energy*. 2017. Vol. 108. Pp. 303-310.

Информация об авторах

А.А. Яшонков – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств;

И.А. Прокопенко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые технологии и оборудование».

Information about the authors

A.A. Yashonkov – candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of machines and apparatus for food production;

I.A. Prokopenko – candidate of technical sciences, associate professor at the department of food technologies and equipment.