

Научная статья/Research Article

УДК 664.9.03

DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-194-200

Владимир Аркадьевич Наумов¹, Николай Леонидович Великанов²,

Олег Васильевич Шарков³✉

¹Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

^{2,3}Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

¹vladimir.naumov@klgtu.ru

²nvelikanov@kantiana.ru

³osharkov@kantiana.ru

ВЫБОР ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ СУШКИ СЫРОВ

Цель исследования – разработать методику выбора конкретного вакуумного насоса по каталогу производителя, обеспечивающего поддержание необходимых параметров при сушке сыров. Объект исследования – работа вакуумных пластинчато-роторных насосов отечественного производства. Исследовано для вакуумной камеры: изменение отдельных параметров, таких как давление и плотность воздуха, влияние начальной массы продукта и производительности вакуумных пластинчато-роторных насосов на давление. При начальной массе продукта $M_0 = 0,8$ кг давление поднимается незначительно, максимальное значение 3,7 кПа; при $M_0 = 1,5$ кг максимальное давление поднимается до 6,4 кПа; при $M_0 = 1,8$ кг – до 9,0 кПа; при $M_0 = 2,0$ кг – до 12,7 кПа. Установлено, что при $M_0 \leq 0,8$ кг условия сушки не изменяются по сравнению с данными контрольных испытаний. В дальнейшем, при возрастании начальной массы продукта давление в вакуумной камере растет. Рассмотрена задача подбора производительности вакуумного пластинчато-роторного насоса, обеспечивающего сушку 12 кг продукта при заданных условиях. Представлена методика расчета производительности вакуумного насоса, обеспечивающая необходимые параметры при сушке сыров и выбор конкретного насоса. При увеличении общего объема откачиваемого пространства происходит рост продолжительности предварительного этапа сушки. Вакуумные методы сушки используют новейшие технологии, минимизирующие ущерб, вызванный биохимическими изменениями, которые снижают питательную ценность в процессе сушки. Описанной методикой можно пользоваться при разработке технологии сушки различных пищевых продуктов, проектировании соответствующих насосных систем.

Ключевые слова: скорость сушки, вакуумный насос, вакуумная камера, масса продукта

Для цитирования: Наумов В.А., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Выбор вакуумных насосов для сушки сыров // Вестник КрасГАУ. 2024. № 7. С. 194–200. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-194-200.

Vladimir Arkadievich Naumov¹, Nikolay Leonidovich Velikanov², Oleg Vasilievich Sharkov³✉

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

^{2,3}Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

¹vladimir.naumov@klgtu.ru

²nvelikanov@kantiana.ru

³osharkov@kantiana.ru

SELECTION OF VACUUM PUMPS FOR CHEESE DRYING

The objective of the study is to develop a methodology for selecting a specific vacuum pump from the manufacturer's catalogue that would maintain the required parameters during cheese drying. The object of the study is the operation of domestically produced vacuum rotary vane pumps. The following were studied for the vacuum chamber: changes in individual parameters, such as air pressure and density, the effect of the initial product mass and the performance of vacuum rotary vane pumps on pressure. At the initial product mass $M_0 = 0.8$ kg, the pressure increases insignificantly, the maximum value is 3.7 kPa; at $M_0 = 1.5$ kg, the maximum pressure increases to 6.4 kPa; at $M_0 = 1.8$ kg – up to 9.0 kPa; at $M_0 = 2.0$ kg – up to 12.7 kPa. It was found that at $M_0 \leq 0.8$ kg, the drying conditions do not change compared to the control test data. Subsequently, with an increase in the initial product mass, the pressure in the vacuum chamber increases. The problem of selecting the performance of a vacuum vane-rotor pump that ensures drying of 12 kg of product under given conditions is considered. The paper presents a method for calculating the performance of a vacuum pump, providing the necessary parameters for drying cheeses and selecting a specific pump. With an increase in the total volume of the pumped space, the duration of the preliminary drying stage increases. Vacuum drying methods use the latest technologies that minimize damage caused by biochemical changes that reduce nutritional value during the drying process. The described method can be used in developing a technology for drying various food products, designing appropriate pumping systems.

Keywords: drying speed, vacuum pump, vacuum chamber, product weight

For citation: Naumov V.A., Velikanov N.L., Sharkov O.V. Selection of vacuum pumps for cheese drying // Bulliten KrasSAU. 2024;(7): 3–200 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-194-200.

Введение. Вакуумные системы являются современными и перспективными для применения в технологиях сушки и хранения продуктов питания, их активно применяют при сушке сыров. Особенности таких технологий описаны в ряде публикаций [1–5]. В частности в работах [1, 5] рассмотрены вопросы применения микроволновой вакуумной сушки. Изучению различных процессов, происходящих при вакуумной сушке, посвящены работы [2–4].

В исследованиях, выполненных под руководством профессора Е.А. Ермолаева [6–12], в лабораторных условиях была экспериментальным путем обоснована технология вакуумной сушки сыров с инфракрасными лампами (ВИКС), предусматривающая изменение условий на различных этапах (остаточного давления P_v , теплового потока). В опытах ВИКС тепловой поток от ИК ламп ступенчато уменьшался. Устанавливалась плотность теплового потока, наибольшая – на первом этапе сушки.

Цель исследования – разработать методику выбора конкретного насоса по каталогу производителя, обеспечивающего поддержание необходимых параметров при сушке сыров.

Объекты и методы. Для аппроксимации экспериментальной зависимости относительной массы m твердых сычужных сыров («Совет-

ский», «Швейцарский») от времени [11] используем многочлен n -го порядка $\varphi_n(t)$:

$$m = \begin{cases} 100nput \leq t_1; \\ \varphi_n(t)nput > t_1; \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi_n(t) = b_0 + b_1 t + b_2 \cdot t^2 + \dots + b_n \cdot t^n, \quad (2)$$

где t – время с начала сушки, мин; t_1 – продолжительность предварительной стадии сушки (достижения заданного остаточного давления P_v); $b_0 = 100$ %; b_1, b_2, \dots, b_n – эмпирические константы, определяемые методом наименьших квадратов по экспериментальной кривой.

По данным рисунка 1 видно, что экспериментальные точки хорошо согласуются с результатами расчета при $n = 4$. Относительная скорость сушки j , %/мин, представляет собой производную от m по времени. Дифференцирование (2) дает

$$j = b_1 + 2b_2 \cdot t + \dots + n b_n \cdot t^{n-1}. \quad (3)$$

Если использовать для аппроксимации зависимости m от времени параболу, как в [12], то графиком производной будет прямая 3 на рисунке 1. В действительности скорость сушки (линия 2) сначала возрастает, достигает максимума и затем падает, как и в экспериментах [4–7].

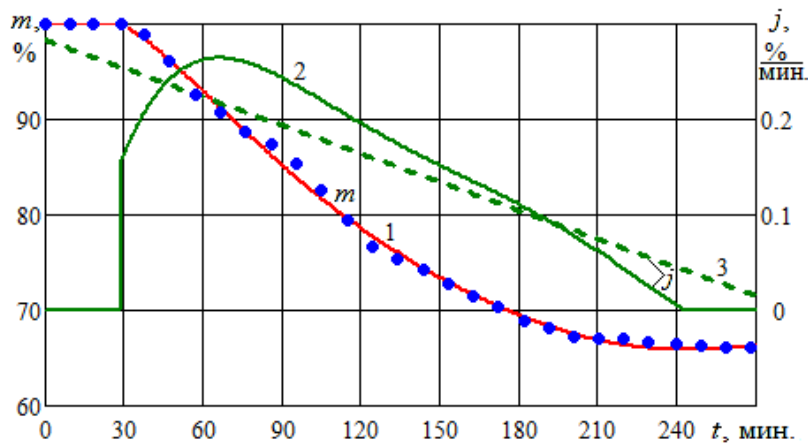


Рис. 1. Относительная масса m и скорость сушки j ВИКС сыра при температуре $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и остаточном давлении 3–4 кПа. Точки – экспериментальные данные [11]. Линии – расчет: 1 – относительная масса по формуле (1), скорость сушки по формуле (3): 2 – $n = 4$, 3 – $n = 2$

К сожалению, в работах [6–12] крайне мало внимания уделяется характеристикам вакуумного насоса, хотя от его правильного подбора напрямую зависят результаты сушки. В промышленных сушильных камерах чаще всего используют вакуумные пластинчато-роторные насосы (ВНПР). Например, линейка сушильных шкафов СНВС [13] с рабочим объемом от 25 до 1000 л оборудована ВНПР российского производства [14]. В шкафах СНВС достигается абсолютное давление 10 мм ртутного столба (1,33 кПа). Тогда как при должной герметизации ВНПР обеспечивают откачку воздуха из рабочей камеры до давления менее 1 мм ртутного столба (0,133 кПа).

Следует заметить, что при использовании ВНПР при сушке пищевых продуктов приходится устанавливать специальные ловушки и отстойники для сбора конденсата. Их объем необходимо учитывать в общем объеме V_0 . К тому же они ухудшают герметичность вакуумной системы.

ВНПР обладают важным свойством сохранения производительности (объемного расхода) при снижении давления в камере. Например, насосы НВР сохраняют производительность в диа-

пазоне давления на входе от атмосферного 101,3 до 0,26 кПа [14]. Фактически достигаемое абсолютное давление зависит от утечек в вакуумной системе, как в упомянутых сушильных шкафах.

Воспользуемся характеристиками насоса НВР-4,5Д с номинальной производительностью $Q = 1,25\text{ дм}^3/\text{с}$ (75 $\text{дм}^3/\text{мин}$). Для математического моделирования газодинамического процесса необходимо воспроизвести условия сушки [11]. Для чего используем контрольные точки (на рис. 1 и 2, б [11]). Первая точка – начальный момент времени ($t = 0$): давление в камере $P = 101,3\text{ кПа}$; термодинамическая температура $T = (17 + 273) = 290\text{ К}$. Вторая точка ($t = 9\text{ мин}$): $P = 12\text{ кПа}$; $T = (12 + 273) = 285\text{ К}$. По значениям давления и температур можно сразу определить показатель политропы процесса откачки воздуха (1,008).

Чтобы задать подходящий объем вакуумной системы, рассмотрим динамику откачки воздуха из вакуумной камеры. На предварительном этапе испарением можно пренебречь. Динамика низковакуумной откачивающей системы описывается известным дифференциальным уравнением [15, 16]:

$$V_0 \cdot \frac{dP}{dt} = -Q \cdot P(t) + k \cdot Q \cdot (P_A - P(t)), P(0) = P_A; \quad (4)$$

где V_0 – общий объем откачиваемого пространства, включая вакуумную камеру, м^3 ; P_A – атмосферное давление, кПа; $P(t)$ – абсолютное давление на входе ВНПР в момент времени t , кПа; k – коэффициент утечки (безразмерный), Q –

производительность ВНПР, $\text{м}^3/\text{с}$, в общем случае завит от давления P .

В [15, 16] было предложено определять коэффициент утечки по давлению P_y , которое экспериментально устанавливается в вакуумной системе при длительной работе ВНПР:

$$k = P_y / (P_A - P_y). \quad (5)$$

ния и плотности воздуха в вакуумной камере на предварительном этапе при различных значениях объема.

Результаты и их обсуждение. На рисунках 2, 3 представлены результаты расчета давле-

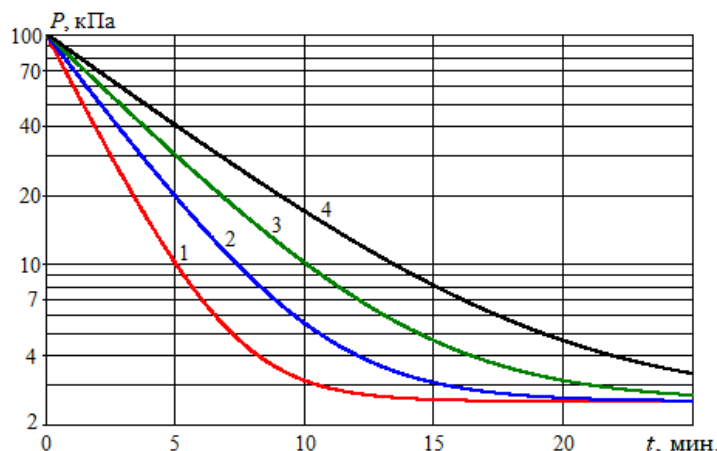


Рис. 2. Изменение давления в вакуумной камере на предварительном этапе: 1 – $V_0 = 0,15 \text{ м}^3$; 2 – $V_0 = 0,22 \text{ м}^3$; 3 – $V_0 = 0,3 \text{ м}^3$; 4 – $V_0 = 0,4 \text{ м}^3$

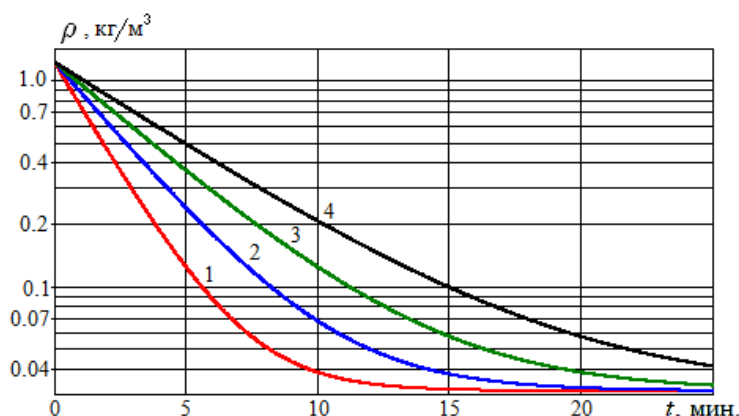


Рис. 3. Изменение плотности воздуха в вакуумной камере на предварительном этапе: 1 – $V_0 = 0,15 \text{ м}^3$; 2 – $V_0 = 0,22 \text{ м}^3$; 3 – $V_0 = 0,3 \text{ м}^3$; 4 – $V_0 = 0,4 \text{ м}^3$

Необходимые значения давления и плотности во второй контрольной точке получаются при $V_0 = 0,3 \text{ м}^3$ (линия 3 на рисунках 2 и 3). Это значение принимаем при моделировании процесса сушки.

Как было показано в [17], при интенсивном испарении в уравнении (4) необходимо дополнительно учесть соответствующий поток паров воды J , кг/с:

$$V_0 \cdot \frac{dP}{dt} = (J - Q) \cdot P(t) + k \cdot Q \cdot (P_A - P(t)), P(t_1) = P_V. \quad (6)$$

Оценить его интенсивность испарения по скорости сушки j следующим образом:

$$J = 0,01 \cdot j \cdot M_0 / \rho_n, \quad (7)$$

где M_0 – исходная масса объекта сушки, кг; ρ_n – плотность насыщенных паров воды при температуре поверхности сыра, кг/м³.

Рассмотрим пример с параметрами, рекомендуемыми в [9–12] для сушки сыра: абсолютное остаточное давление в вакуумной камере $P_V = 3 \text{ кПа}$; температура сушки $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Плотность насыщенных паров при такой температуре $\rho_n = 0,083 \text{ кг/м}^3$. Задача Коши (6) при указанных параметрах была решена численным методом.

Если начальная масса объекта сушки невелика, то поток испаряющейся влаги практически не оказывает влияния на газодинамику процесса. В условиях промышленного использования ВИКС важно установить, насколько можно увеличивать M_0 , чтобы условия сушки (в первую

очередь давление в камере) оставались в пределах, установленных технологическими требованиями.

На рисунке 4 представлены результаты исследования влияния начальной массы продукта на динамику давление в камере.

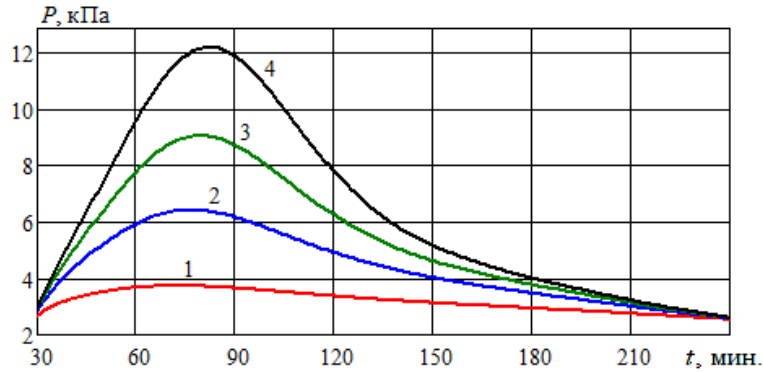


Рис. 4. Влияние начальной массы продукта на давление в вакуумной камере:
1 – $M_0 = 0,8$ кг; 2 – $M_0 = 1,5$ кг; 3 – $M_0 = 1,8$ кг; 4 – $M_0 = 2,0$ кг

При $M_0 = 0,8$ кг давление поднимается незначительно, максимальное значение $3,7$ кПа немногим выше $P_V = 3$ кПа; при $M_0 = 1,5$ кг максимальное давление поднимается до $6,4$ кПа; при $M_0 = 1,8$ кг – до $9,0$ кПа; при $M_0 = 2,0$ кг – до $12,7$ кПа. Можно констатировать, что при $M_0 \leq 0,8$ кг условия сушки не изменяются по сравнению с лабораторными [11]. С увеличением начальной массы продукта выше определенного значения давление в вакуумной камере заметно возрастает. Необходимо учесть, что на рисунке 4 адекватно описывается газодинамика при параметрах, лишь незначительно отличающихся от базовых (линия 1). Остальные кривые являются приближенными, так как увеличение давления в

камере приведет к снижению скорости сушки, значит, уже нельзя будет пользоваться экспериментальной кривой скорости сушки (см. рис. 1). Аналогичные замечания относятся и к рисунку 5.

На рисунке 5 представлены результаты решения другой задачи, актуальной для проектирования промышленных установок ВИКС: подобрать производительность ВНПР, достаточную для сушки 12 кг продукта при условиях рисунка 1. Видно, что достаточной будет производительность 1056 $\text{дм}^3/\text{мин}$. Максимальный рост давления – всего до $3,9$ кПа, а при $Q = 600$ $\text{дм}^3/\text{мин}$ – уже до $8,8$ кПа. По каталогу [9] нужную скорость откачки имеет насос российского производства 2НВП-60Д.

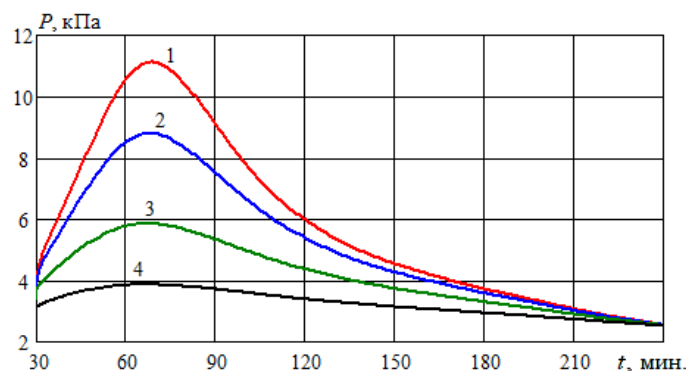


Рис. 5. Влияние производительности ВНПР на давление в вакуумной камере ($V_0 = 0,3$ м^3 ; $M_0 = 12$ кг): 1 – $Q = 480$ $\text{дм}^3/\text{мин}$; 2 – $Q = 520$ $\text{дм}^3/\text{мин}$; 3 – $Q = 650$ $\text{дм}^3/\text{мин}$; 4 – $Q = 1056$ $\text{дм}^3/\text{мин}$

Заключение. Таким образом, разработанная методика позволяет определить производительность вакуумного насоса, обеспечивающую поддержание необходимых параметров при сушке сыров, и выбрать для определенного типа по каталогу производителя конкретный насос. Увеличение объема V_0 при прочих равных условиях приводит к заметному росту продолжительности предварительного этапа сушки. Такая методика может быть распространена на сушку других пищевых продуктов при наличии кривой скорости сушки.

Список источников

1. Ayse Anli E. Possibilities for using microwave-vacuum drying in Lor cheese production. *International Dairy Journal*. 2020, V. 102, 104618. DOI: 10.1016/j.idairyj.2019.104618.
2. Ermolaev V.A. Kinetics of the Vacuum Drying of Cheeses // *Foods and raw materials*. 2014. 2(2):130–139. DOI: 10.12737/5471.
3. Study of the temperature regime effect on the process of cheeses vacuum drying / V.A. Ermolaev [et al.] // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 640 (2021) 032040 IOP Publishing P2ARM 2020 DOI: 10.1088/1755-1315/640/3/032040.
4. Analysis of Shrinkage Phenomena in the Process of Cheese Vacuum Drying / V. Ermolaev [et al.] // in *International research conference on Challenges and Advances in Farming, Food Manufacturing, Agricultural Research and Education, 2021, KnE Life Sciences*, P. 108–115. DOI: 10.18502/kls.v0i0.8924.
5. Application of microwave vacuum drying for snack production: Characteristics of pure cheese puffs / S. Chudy [et al.] // *International Journal of Dairy Technology*. 2019, Vol. 72, Is. 1, P. 82–88. DOI: 10.1111/1471-0307.12562.
6. Ермолаев В.А. Многоступенчатая вакуумная сушка мягких сыров // *Сыроделие и маслоделие*. 2009. № 6. С. 36–37.
7. Ермолаев В.А., Расщепкин А.Н. Выбор остаточного давления и тепловой нагрузки при вакуумной сушке твердых сыров // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2009. № 9. С. 20–21.
8. Ермолаев В.А. Сушка Голландского, Костромского и Ярославского сыров // *Аграрная наука*. 2010. № 8. С. 30–31.
9. Ермолаев В.А. Исследование влияния остаточного давления на вакуумную сушку сыров // *Вакуумная техника и технология*. 2010. Т. 20, № 4. С. 249–253.
10. Ермолаев В.А. Кинетика процесса вакуумной сушки сыра «Адыгейский» и брынзы // *Сыроделие и маслоделие*. 2010. № 1. С. 32–33.
11. Ермолаев Е.А. Разработка математической модели низкотемпературной вакуумной сушки сыров // *Вестник КрасГАУ*. 2021. № 1. С. 134–142.
12. Брюханов М.А. Разработка технологии вакуумной сушки полутвердых сыров с различными способами подвода тепла: дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2022. 151 с.
13. ООО «КБ Тула-терм». Вакуумные сушильные шкафы. URL: <https://tula-term.ru/products/vakuumnoe-oborudovanie/vakuumnye-sushilnye-shkafy> (дата обращения: 02.12.2023).
14. АО «Вакууммаш». Каталог вакуумных насосов. URL: <https://vacma.ru/catalog/vakuumnye-nasosy> (дата обращения: 02.12.2023).
15. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Перекачивание жидкости с использованием водокольцевого вакуумного насоса // *Известия вузов. Машиностроение*. 2020. № 8 (725). С. 51–59.
16. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Откачивание воздуха с примесями золотниковым вакуумным насосом // *Известия вузов. Машиностроение*. 2022. № 6 (747). С. 52–59.
17. Наумов В.А., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Газодинамика вакуумноимпульсной сушки пищевых продуктов // *Вестник КрасГАУ*. 2023. № 7. С. 191–199.

References

1. Ayse Anli E. Possibilities for using microwave-vacuum drying in Lor cheese production. *International Dairy Journal*. 2020, V. 102, 104618. DOI: 10.1016/j.idairyj.2019.104618.
2. Ermolaev V.A. Kinetics of the Vacuum Drying of Cheeses // *Foods and raw materials*. 2014. 2(2):130–139. DOI: 10.12737/5471.
3. Study of the temperature regime effect on the process of cheeses vacuum drying / V.A. Ermolaev [et al.] // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 640 (2021) 032040 IOP Publishing P2ARM 2020 DOI: 10.1088/1755-1315/640/3/032040.

4. Analysis of Shrinkage Phenomena in the Process of Cheese Vacuum Drying / V. Ermolaev [et al.] // in International research conference on Challenges and Advances in Farming, Food Manufacturing, Agricultural Research and Education, 2021, KnE Life Sciences, P. 108–115. DOI: 10.18502/kls.v0i0.8924.
5. Application of microwave vacuum drying for snack production: Characteristics of pure cheese puffs / S. Chudy [et al.] // International Journal of Dairy Technology. 2019, Vol. 72, Iss. 1, P. 82–88. DOI: 10.1111/1471-0307.12562.
6. Ermolaev V.A. Mnogostupenchataya vakuumnaya sushka myagkih syrov // Syrodelie i maslodelie. 2009. № 6. S. 36–37.
7. Ermolaev V.A., Rasschepkin A.N. Vybor ostatochnogo davleniya i teplovoj nagruzki pri vakuumnoj sushke tverdyh syrov // Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. 2009. № 9. S. 20–21.
8. Ermolaev V.A. Sushka Gollandskogo, Kostromskogo i Yaroslavskogo syrov // Agrarnaya nauka. 2010. № 8. S. 30–31.
9. Ermolaev V.A. Issledovanie vliyaniya ostatochnogo davleniya na vakuumnuyu sushku syrov // Vakuumnaya tehnika i tehnologiya. 2010. T. 20, № 4. S. 249–253.
10. Ermolaev V.A. Kinetika processa vakuumnoj sushki syra «Adygejskij» i brynzy // Syrodelie i maslodelie. 2010. № 1. S. 32–33.
11. Ermolaev E.A. Razrabotka matematicheskoy modeli nizkotemperaturnoj vakuumnoj sushki syrov // Vestnik KrasGAU. 2021. № 1. S. 134–142.
12. Bryuhanov M.A. Razrabotka tehnologii vakuumnoj sushki polutverdyh syrov s razlichnymi sposobami podvoda tepla: dis. ... kand. tehn. nauk. Kemerovo, 2022. 151 s.
13. ООО «KB Tula-term». Vakuumnye sushil'nye shkafy. URL: <https://tula-term.ru/products/vakuumnoe-oborudovanie/vakuumnye-sushilnye-shkafy> (data obrascheniya: 02.12.2023).
14. АО «Vakuummash». Katalog vakuumnyh nasosov. URL: <https://vacma.ru/catalog/vakuumnye-nasosy> (data obrascheniya: 02.12.2023).
15. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. Perekachivanie zhidkosti s ispol'zovaniem vodokol'cevogo vakuumnogo nasosa // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. 2020. № 8 (725). S. 51–59.
16. Velikanov N.L., Naumov V.A. Otkachivanie vozduha s primesyami zolotnikovym vakuumnym nasosom // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. 2022. № 6 (747). S. 52–59.
17. Naumov V.A., Velikanov N.L., Sharkov O.V. Gazodinamika vakuumnoimpul'snoj sushki pischevyh produktov // Vestnik KrasGAU. 2023. № 7. S. 191–199.

Статья принята к публикации 28.06.2024 / The article accepted for publication 28.06.2024.

Информация об авторах:

Владимир Аркадьевич Наумов¹, заведующий кафедрой техносферной безопасности и природообустройства, доктор технических наук, профессор

Николай Леонидович Великанов², профессор Института высоких технологий, доктор технических наук, профессор

Олег Васильевич Шарков³, профессор Института высоких технологий, доктор технических наук, доцент

Information about the authors:

Vladimir Arkadievich Naumov¹, Head of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management, Doctor of Technical Sciences, Professor

Nikolay Leonidovich Velikanov², Professor at the Institute of High Technologies, Doctor of Technical Sciences, Professor

Oleg Vasilievich Sharkov³, Professor at the Institute of High Technologies, Doctor of Technical Sciences, Docent