

Научная статья/Research Article

УДК 664.9.03

DOI: 10.36718/1819-4036-2023-7-191-199

Владимир Аркадьевич Наумов¹, Николай Леонидович Великанов²,

Олег Васильевич Шарков³✉

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹vladimir.naumov@klgtu.ru

²nikolaj.velikanov@klgtu.ru

³oleg.sharkov@klgtu.ru

ГАЗОДИНАМИКА ВАКУУМНО-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Цель исследования – сформировать математическую модель газодинамических процессов, происходящих при вакуумно-импульсной сушке, и проанализировать их зависимость от определяющих параметров. В качестве объекта исследования рассмотрена работа водокольцевого вакуумного насоса отечественного производства ВВН1-1,5. Исследовано влияние утечек на зависимости давление в ресивере и массового расхода газа от времени при заданном объеме ресивера. При возрастании интенсивность натекания (утечек) от 0,08 до 0,2 давление уменьшается от 20 до 9 кПа. Это свидетельствует о заметном влиянии утечек на процесс откачивания воздуха. Видно, как с увеличением интенсивность натекания снижается уровень вакуума, который может быть достигнут. При этом уменьшается время его достижения. Аналогично снижается и массовый расход при возрастании интенсивность натекания. При увеличении объема вакуумной камеры время достижения заданного давления увеличивается, а при увеличении диаметра трубопровода это же время уменьшается. В промежутке времени от 20 до 180 с давление и массовый расход падают примерно в 5 раз. Увеличение интенсивности натекания в 2,5 раза приводит к уменьшению давления и массового расхода на конечном этапе примерно в 2 раза. Установлено, что характер зависимости «давление, массовый расход – время» в начальный момент времени от 20 до 40 с является крутым, при увеличении времени – становится пологим. Представляется целесообразным в дальнейшем для усовершенствования предложенной модели учесть влияние температуры и влажности воздуха на рабочие характеристики водокольцевых вакуумных насосов, а также интенсивность испарения различных пищевых продуктов.

Ключевые слова: вакуумно-импульсная установка, массовый расход, перекачка газа

Для цитирования: Наумов В.А., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Газодинамика вакуумно-импульсной сушки пищевых продуктов // Вестник КрасГАУ. 2023. № 7. С. 191–199. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-7-191-199.

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

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹vladimir.naumov@klgtu.ru

²nikolaj.velikanov@klgtu.ru

³oleg.sharkov@klgtu.ru

GAS DYNAMICS OF VACUUM-PULSED DRYING FOOD PRODUCTS

The purpose of the study is to form a mathematical model of gas-dynamic processes occurring during vacuum-impulse drying and analyze their dependence on the determining parameters. As an object of study, the operation of a water-ring vacuum pump of domestic production VVN1-1.5 is considered. The influence of leaks on the dependences of the pressure in the receiver and the mass flow rate of gas

on time for a given volume of the receiver is studied. With an increase in the intensity of leakage (leaks) from 0.08 to 0.2, the pressure decreases from 20 to 9 kPa. This indicates a noticeable effect of leaks on the process of pumping air. It can be seen how the level of vacuum that can be achieved decreases with an increase in the leakage intensity. This reduces the time to reach it. Similarly, the mass flow rate decreases with increasing leakage intensity. With an increase in the volume of the vacuum chamber, the time to reach a given pressure increases, and with an increase in the diameter of the pipeline, this time decreases. In the time interval from 20 to 180 s, the pressure and mass flow drop by about 5 times. An increase in the leakage intensity by a factor of 2.5 leads to a decrease in pressure and mass flow at the final stage by about a factor of 2. It was established that the nature of the dependence "pressure, mass flow – time" at the initial moment of time from 20 to 40 s is steep, with increasing time it becomes flat. It seems appropriate in the future to improve the proposed model to take into account the effect of temperature and air humidity on the performance of liquid ring vacuum pumps, as well as the evaporation rate of various food products.

Keywords: vacuum pulse unit, mass flow, gas pumping

For citation: Naumov V.A., Velikanov N.L., Sharkov O.V. Gas dynamics of vacuum-pulsed drying food products // Bulliten KrasSAU. 2023;(7): 191–199. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-7-191-199.

Введение. Сушка – один из старейших методов консервирования, используемый в пищевой промышленности. Эта технология развивалась, и применялись различные системы сушки, такие как конвекция, кондукция или излучение, а также их комбинации. Различные аспекты современных технологий сушки приведены в работах [1–7]. Вакуумная сушка широко используется в пищевой технологии для интенсификации процесса, является предпочтительной технологией сушки из-за более высокого качества конечных продуктов [1, 4].

В обзоре [2] изучается процесс, который основан на электромагнитном излучении, испускаемом магнетроном на пищевой матрице в среде вакуума и преобразующемся в тепло. Это перспективный, быстрый и эффективный процесс снижения содержания влаги. Исследования этого процесса и его промышленное использование выросли примерно на 300 % за последние 20 лет.

Вакуумная жарка известна как самый популярный способ обработки пищевых продуктов для производства готовых к употреблению закусок. Количество масла, используемого для жарки, при вакуумном способе жарки меньше по сравнению с другими способами жарки [3].

Управление параметрами микроволновой вакуумной сушки способствует получению высококачественных конечных продуктов [5–7].

С помощью магнитно-резонансной томографии в работе [8] было предложено сопряженное моделирование импульса, тепломассопереноса и структурной деформации при вакуумном охлаждении хлеба на пару.

Оценка влияния выбранных методов предварительной обработки, таких как вакуумно-осмотическая дегидратация, вакуумно-ультразвуковая обработка и вакуумно-осмосоническая обработка, на метаболомы и качественные характеристики высушенных в инфракрасном диапазоне ломтиков имбиря произведена в [9]. Установлено, что предварительная вакуумно-осмосоническая обработка имбиря перед сушкой имеет большой потенциал для крупномасштабного промышленного применения.

Микроволновая вакуумная сушка концентрированного обезжиренного молока и свойства получаемого в результате порошка изучены в очень ограниченной степени [10]. Результаты исследования микроволновой вакуумной сушки концентрированного обезжиренного молока и рекомендации по производству сухого молока или сохранению заквасок в молочной матрице приведены в работе [10].

В [11] рассмотрены вопросы вакуумной сушки рыбной кости трески и судака. Предложен экспериментальный стенд. С применением методов планирования эксперимента установлен характер влияния температуры и давления на скорость сушки.

Вакуумно-импульсные сушильные камеры (рис. 1) применяются в промышленных масштабах [12, 13].

Цель исследования – сформировать математическую модель газодинамических процессов, происходящих при вакуумно-импульсной сушке, и проанализировать их зависимость от определяющих параметров.

Объекты и методы. В установке вакуумно-импульсной сушки происходят два основных газодинамических процесса: откачивание воздуха из ресивера с помощью вакуумного насоса (сравнительно медленное) и выравнивание давления вакуумной камеры с ресивером (импульсное).

Для моделирования первого этапа необходимо знать нагрузочную характеристику вакуумного насоса – зависимость производительности от давления в ресивере. В вакуумно-импульсных установках используются низковакуумные насосы (водокольцевые, пластинчато-роторные и др.).

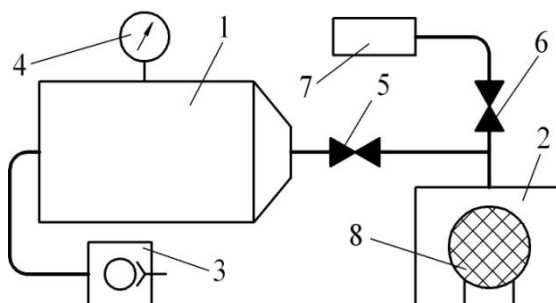


Рис. 1. Установка вакуумно-импульсной сушки: 1 – ресивер; 2 – вакуумная камера; 3 – вакуумный насос; 4 – вакуумметр; 5, 6 – кран шаровой; 7 – нагреватель; 8 – емкость с продуктом [13]

Здесь рассмотрим работу водокольцевого насоса. Воспользуемся ранее разработанным методом моделирования нагрузочных характеристик вакуумного насоса [14–16]. Для примера

возьмем насос российского производства ВВН1-1,5. На рисунке 2 точки показаны экспериментальные данные [17]. Они могут быть аппроксимированы зависимостями

$$N(P) = A_0 + A_1 \cdot P, \text{ при } P_0 < P < P_a, \quad (1)$$

$$Q(P) = \begin{cases} B_0 + B_1 \cdot P + B_2 \cdot P^2 + B_3 \cdot P^3 + B_4 \cdot P^4, & \text{при } P_0 < P < P_*; \\ Q_* = \text{const}, & \text{при } P_* < P < P_a. \end{cases} \quad (2)$$

Эмпирические константы в формулах (2)–(3) были найдены методом наименьших квадратов. В частности для модели ВВН1-3: $P_0 = 6$ кПа; $P_* = 70$ кПа; $Q_* = 3,44$ м³/мин; $A_0 = 5,65$ кВт; $A_1 = -0,0111$ кВт/кПа; $B_0 = -2,57$ м³/мин; $B_1 = 0,531$ м³/(мин·кПа); $B_2 = -0,0176$ м³/(мин·кПа²); $B_3 = 2,511 \cdot 10^{-4}$ м³/(мин·кПа³); $B_4 = -2,511 \cdot 10^{-6}$ м³/(мин·кПа⁴).

сом воздуха из некоторой емкости имеет следующий вид [14]:

$$V_2 \cdot \frac{dP_2}{dt} = -P_2 \cdot Q(P_2) + S_T + S_{ГВ}, \quad (3)$$

Первый этап – откачивание воздуха из ресивера. Как известно, в общем случае дифференциальное уравнение откачки вакуумным насо-

где V_2 – объем ресивера; P_2 – давление; t – текущее время; $Q(P)$ – зависимость эффективной производительности вакуумного насоса от давления в ресивере (см. формулу (2)); S_T – поток натекания, обусловленный утечками; $S_{ГВ}$ – поток газовыделения.

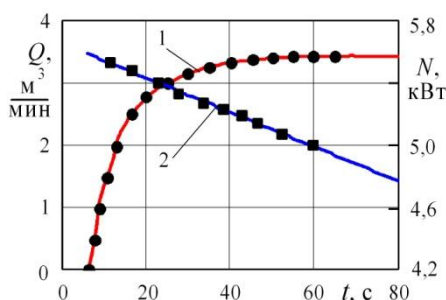


Рис. 2. Нагрузочные характеристики ВВН1-3 (точки – экспериментальные данные [17], линии – результаты расчета по формулам (1), (2))

В низковакуумных насосах, в т. ч. водокольцевых, потоком газовой выделенной пренебрегают. Для потока натекания используем обычно принимаемую в вакуумной технике гипотезу

$$S_T = \Gamma \cdot Q(P_a) \cdot (P_a - P), \quad (4)$$

где Γ – безразмерная эмпирическая константа, определяемая по величине P_z , при которой давление в ресивере прекращает уменьшаться из-за натекания, т. е. выполняется равенство:

$$V_2 \cdot \frac{dP_2}{dt} = \Gamma \cdot Q(P_a) \cdot P_a - P_2 \cdot (Q(P_2) + \Gamma \cdot Q(P_a)). \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение. Для первого этапа работы установки математическая постановка задачи Коши включает дифференциальное

$$\Gamma \cdot Q(P_a) \cdot (P_a - P_z) = P_z \cdot Q(P_z). \quad (5)$$

Из (5) следует

$$\Gamma = \frac{1}{1-k} \cdot \frac{Q(k \cdot P_a)}{Q(P_a)}, \quad (6)$$

где $k = P_z/P_a$.

Подставляя (5) в (3), получим

уравнение (7) с начальным условием $P(0) = P_a$. Ее решение было найдено численным методом. Результаты представлены на рисунке 3.

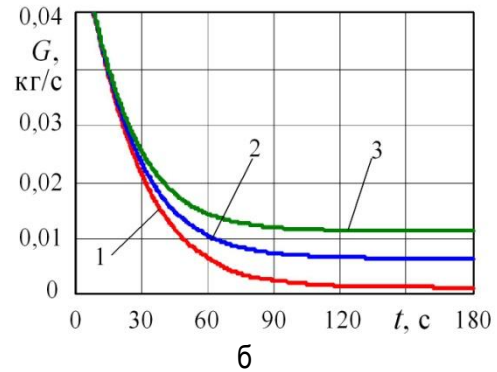
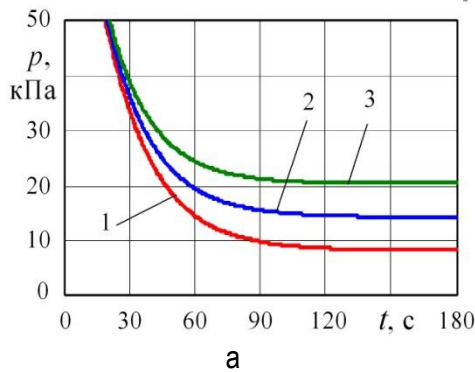


Рис. 3. Влияние натекания на первый газодинамический процесс при $V_2 = 1,5 \text{ м}^3$: 1 – $k = 0,08$; 2 – $k = 0,14$; 3 – $k = 0,20$; а – давление в ресивере, б – массовый расход газа

Как и в работах [16, 18], интенсивность натекания (утечек) заметно влияет на процесс откачивания воздуха. По рисунку 3 видно, как с увеличением k снижается уровень вакуума, который может быть достигнут. При этом уменьшается время его достижения. Наибольший вакуум будет при давлении P_z .

Второй этап начинается после открытия крана 5 на рисунке 1. Газ из вакуумной камеры по трубопроводу начинает поступать в ресивер. При дозвуковом течении в трубе постоянного диаметра массовый расход газовой смеси зависит от давления на входе P_1 и на выходе P_2 . Он может быть рассчитан по известной формуле Г.Н. Абрамовича [19]:

$$G = S \cdot \sqrt{\frac{(P_1^{(\gamma+1)/\gamma} - P_2^{(\gamma+1)/\gamma}) \cdot \gamma}{\left(\frac{\lambda L}{2D} + \frac{1}{\gamma} \ln \frac{P_1}{P_2}\right) \cdot R_1 T_1 \cdot P_1^{(1-\gamma)/\gamma} \cdot \gamma + 1}}, \quad (8)$$

где L, D – длина и внутренний диаметр трубы соответственно; γ – показатель адиабаты газа; λ – коэффициент гидравлических потерь по длине трубы; R_1 – газовая постоянная; T_1 – тер-

модинамическая температура в вакуумной камере; $S = \pi D^2/4$ – площадь поперечного сечения трубопровода.

Коэффициент гидравлических потерь на трение можно рассчитать по известной формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad Re = \frac{D \cdot \rho \cdot W}{\mu}, \quad (9)$$

где Re – число Рейнольдса; Δ – абсолютная эквивалентная шероховатость стенки трубы; ρ – плотность газа; μ – коэффициент динамической вязкости газа; $W = G/(\rho S)$ – скорость течения.

Прежде чем продолжать расчет, необходимо убедиться, что число Маха на выходе из трубо-

провода не превышает единицу (a – скорость звука):

$$M = W/a \leq 1, \quad a = \sqrt{\gamma R_1 T}, \quad (10)$$

Если условие (10) не выполняется, то рассчитывать массовый расход газа в трубе следует не по формуле (8), а по скорости звука: $G = \rho \cdot a \cdot S$.

Математическая постановка задачи процесса выравнивания давлений включает два дифференциальных уравнения и начальные условия к ним:

$$\frac{dm_1}{dt} = -G + \Theta, \quad \frac{dm_2}{dt} = G, \quad m_1(0) = m_{10}, \quad m_2(0) = m_{20}, \quad (11)$$

где m_1, m_2 – масса газа в вакуумной камере и в ресивере в некоторый момент времени второго этапа соответственно; Θ – интенсивность испарения пищевых продуктов, кг/с.

Массу газа в вакуумной камере и в ресивере в начале второго этапа рассчитаем по уравнению состояния:

$$m_{10} = P_{10} V_1 / (R_1 T_{10}), \quad m_{20} = P_{20} V_2 / (R_2 T_{20}). \quad (12)$$

Если $G \ll \Theta$, то в первом приближении можно в первом уравнении (11) положить $\Theta \approx 0$. Тогда задача Коши (11) упростится:

$$\frac{dm_2}{dt} = G, \quad m_2(0) = m_{20}, \quad m_1 = m_0 - m_2, \quad (13)$$

где $m_0 = m_{10} + m_{20}$.

Решение (13) найдено численным методом при $L = 3$ м и начальных давлениях $P_1 = P_a, P_2 = 0,1 P_a$. Результаты расчетов представлены на рисунках 4–6.

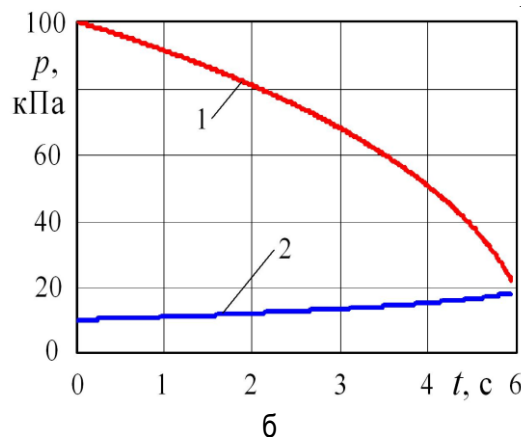
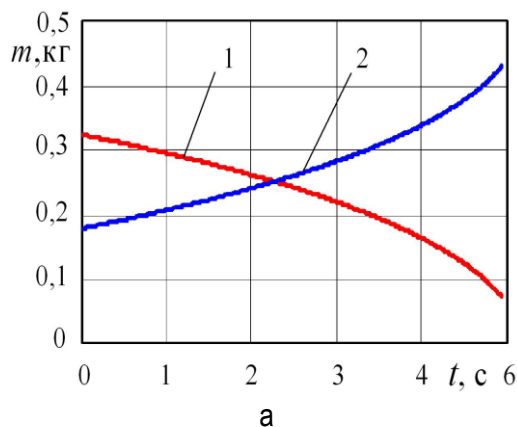


Рис. 4. Газодинамика на втором этапе при $V_1 = 0,3 \text{ м}^3, V_2 = 1,5 \text{ м}^3, D = 25 \text{ мм}, L = 3 \text{ м}$; а – масса газа в камере (1) и в ресивере (2); б – давление в камере (1) и в ресивере (2)

По рисунку 4 процесс выравнивания давлений является нелинейным даже при сделанных упрощающих предположениях. Темп изменений к завершению процесса увеличивается. В рассматриваемых условиях конечное абсолютное давление получилось около 20 кПа.

По рисунку 5 увеличение диаметра трубопровода приводит к ускорению процесса выравнивания давлений, но на конечное значение давления не влияет.

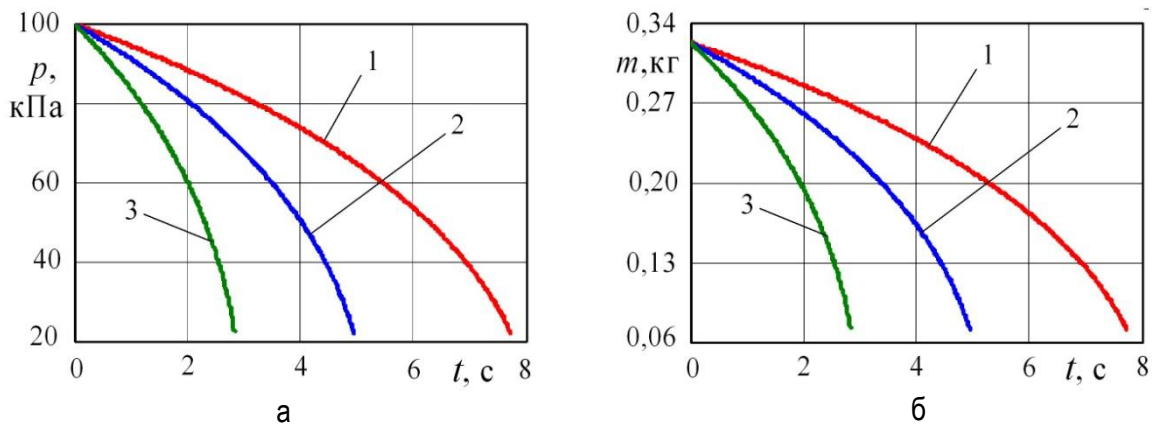


Рис. 5. Влияние диаметра трубопровода на газодинамику при $V_1 = 0,3 \text{ м}^3$, $V_2 = 1,5 \text{ м}^3$: 1 – $D = 20 \text{ мм}$, 2 – $D = 25 \text{ мм}$, 3 – $D = 33 \text{ мм}$; а – давление в камере; б – масса газа в камере

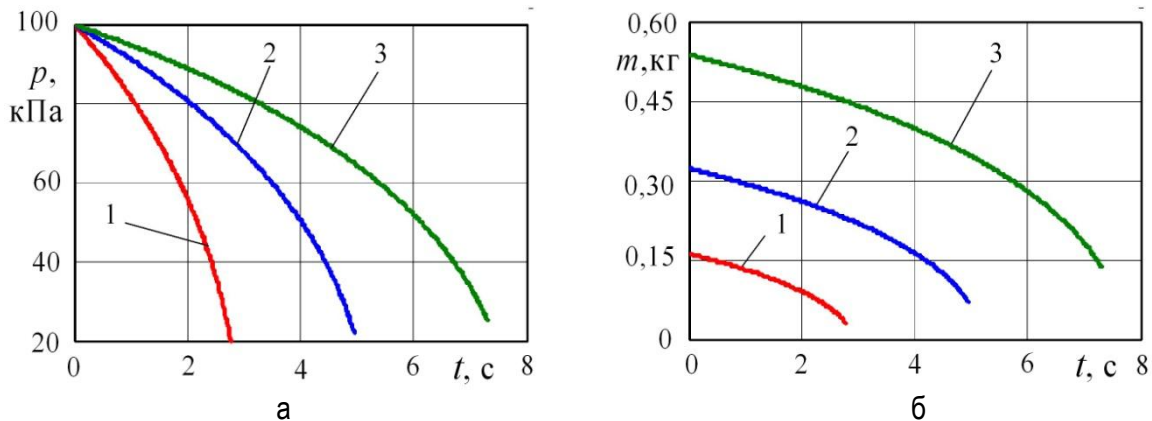


Рис. 6. Влияние объема вакуумной камеры V_1 на газодинамику при объеме ресивера $V_2 = 1,5 \text{ м}^3$, $D = 25 \text{ мм}$, $L = 3 \text{ м}$: 1 – $V_1 = 0,15 \text{ м}^3$, 2 – $V_1 = 0,3 \text{ м}^3$, 3 – $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$; а – давление в камере; б – масса газа в камере

По рисунку 6 увеличение объема вакуумной камеры (при неизменном объеме ресивера) приводит к росту времени выравнивания давлений. При этом происходит небольшое увеличение конечного давления и более заметное увеличение массы газа в камере.

Заключение. Исследовано влияние утечек на зависимости давление в ресивере и массового расхода газа от времени при заданном объеме ресивера. При возрастании интенсивность натекания (утечек) от 0,08 до 0,2 давление уменьшается от 20 до 9 кПа. Это свидетельствует о заметном влиянии утечек на процесс откачивания воздуха. Видно, как с увеличением интенсивность натекания снижается уровень вакуума, который может быть достигнут. При этом уменьшается время его достижения. Аналогично снижается и массовый расход при возрастании интенсивность натекания. При увеличении объема вакуумной камеры время дости-

жения заданного давления увеличивается, а при увеличении диаметра трубопровода это же время уменьшается.

Представляется целесообразным в дальнейшем для усовершенствования предложенной модели учесть влияние температуры и влажности воздуха на рабочие характеристики водокольцевых вакуумных насосов, а также интенсивность испарения различных пищевых продуктов Θ .

Список источников

1. Ермолаев В.А. Низкотемпературная вакуумная сушка как способ обезвоживания растительного сырья // Вестник КрасГАУ. 2019. № 1 (142). С. 160–166.
2. Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products / L. González-Cavieres [et al.] // Trends in Food Science &

- Technology. 2021. Vol. 116. P. 626–638. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.08.005.
3. Evaluation of effect of vacuum frying on textural properties of food products / A. Patra [et al.] // *Food Research International*. 2022, Vol. 162. Part B. 112074. DOI: 10.1016/j.foodres.2022.112074.
 4. Effects of vacuum drying assisted with condensation on drying characteristics and quality of apple slices / X. Bao [et al.] // *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 340, 111286. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111286.
 5. Microwave vacuum drying of foods with temperature control by power modulation / R.L. Monteiro [et al.] // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 65. 102473. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102473.
 6. Drying characteristics, quality changes, parameters optimization and flavor analysis for microwave vacuum drying of garlic (*Allium sativum* L.) slices / J. Liu [et al.] // *LWT*. 2023. Vol. 173. 114372. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.114372.
 7. Temperature control for high-quality oil-free sweet potato CHIPS produced by microwave rotary drying under vacuum / R.L. Monteiro [et al.] // *LWT*. 2022. Vol. 157. 113047. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.113047.
 8. Ajani C.K., Zhu Z., Sun D-W. Shrinkage during vacuum cooling of porous foods: Conjugate mechanistic modelling and experimental validation // *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 337. 111220. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111220.
 9. Vacuum pressure combined with osmosonication as an innovative pre-drying technique for Ghanaian ginger: Evidence from the metabolome and quality characteristics of the dried product / R.N. Afolga [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021, Vol. 80. 105841. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105841.
 10. Dimpler J., Moraru C.I. A process optimization approach for microwave vacuum drying of concentrated skim milk // *Journal of Dairy Science*. 2022. Vol. 105 (11). P. 8765–8781. DOI: 10.3168/jds.2021-21459.
 11. Фатыхов Ю.А., Суслов А.Э., Мажаров А.В. Технология пищевой добавки из рыбной кости: результаты исследования // *Вестник МГТУ*. 2010. Т. 13, № 4/1. С. 665–672.
 12. Вакуумно-импульсные сушильные камеры. URL: <https://www.prosushka.ru/136-vakuumno-impulsnye-sushilnye-kamery.html> (дата обращения: 21.12.2022).
 13. Бурцев С.А., Фатыхов Т.Ф. Экспериментальный стенд сушки растительного сырья вакуумно-импульсным методом // *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. № 13. С. 126–128.
 14. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Моделирование характеристик водокольцевых вакуумных насосов // *Известия вузов. Машиностроение*. 2019. № 10. С. 70–77. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-10-70-77.
 15. Naumov V.A., Velikanov N.L. Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 537. 032029. DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032029.
 16. Наумов В.А., Великанов Н.Л. Характеристики водокольцевых компрессорных машин вакуумных рыбонасосных установок // *Рыбное хозяйство*. 2021. № 1. С. 94–98.
 17. АО «ГМС Ливгидромаш». Насосы вакуумные водокольцевые типа ВВН. Руководство по эксплуатации. URL: http://www.hms-livgidromash.ru/upload/iblock/6f7/re-vvn1_3-i-vvn-1_12--vvn1_6_.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
 18. Naumov V.A. Influence of leakage on characteristics of the vacuum transport unit based on the water-ring pump // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 852. 032007. DOI: 10.1088/1757-899X/852/3/032007
 19. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.

References

1. Ermolaev V.A. Nizkotemperaturnaya vakuumnaya sushka kak sposob bezvozkhvaniya rastitel'nogo syr'ya // *Vestnik KrasGAU*. 2019. № 1 (142). S. 160–166.
2. Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products / L. González-

- Cavieres [et al.] // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 116. P. 626–638. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.08.005.
3. Evaluation of effect of vacuum frying on textural properties of food products / A. Patra [et al.] // Food Research International. 2022, Vol. 162. Part B. 112074. DOI: 10.1016/j.foodres.2022.112074.
 4. Effects of vacuum drying assisted with condensation on drying characteristics and quality of apple slices / X. Bao [et al.] // Journal of Food Engineering. 2023. Vol. 340, 111286. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111286.
 5. Microwave vacuum drying of foods with temperature control by power modulation / R.L. Monteiro [et al.] // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Vol. 65. 102473. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102473.
 6. Drying characteristics, quality changes, parameters optimization and flavor analysis for microwave vacuum drying of garlic (*Allium sativum* L.) slices / J. Liu [et al.] // LWT. 2023. Vol. 173. 114372. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.114372.
 7. Temperature control for high-quality oil-free sweet potato CHIPS produced by microwave rotary drying under vacuum / R.L. Monteiro [et al.] // LWT. 2022. Vol. 157. 113047. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.113047.
 8. Ajani C.K., Zhu Z., Sun D-W. Shrinkage during vacuum cooling of porous foods: Conjugate mechanistic modelling and experimental validation // Journal of Food Engineering. 2023. Vol. 337. 111220. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111220.
 9. Vacuum pressure combined with osmosonication as an innovative pre-drying technique for Ghanaian ginger: Evidence from the metabolome and quality characteristics of the dried product / R.N. Afolga [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2021, Vol. 80. 105841. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105841.
 10. Dumpler J., Moraru C.I. A process optimization approach for microwave vacuum drying of concentrated skim milk // Journal of Dairy Science. 2022. Vol. 105 (11). P. 8765–8781. DOI: 10.3168/jds.2021-21459.
 11. Fatyhov Yu.A., Suslov A.E., Mazharov A.V. Tehnologiya pischevoj dobavki iz rybnoj kosti: rezul'taty issledovaniya // Vestnik MGTU. 2010. T. 13, № 4/1. S. 665–672.
 12. Vakuumno-impul'snye sushil'nye kamery. URL: <https://www.prosushka.ru/136-vakuumno-impul'snye-sushilnye-kamery.html> (data obrascheniya: 21.12.2022).
 13. Burcev S.A., Fatyhov T.F. `Eksperimental'nyj stend sushki rastitel'nogo syr'ya vakuumno-impul'snym metodom // Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. 2011. № 13. S. 126–128.
 14. Velikanov N.L., Naumov V.A. Modelirovanie harakteristik vodokol'cevyh vakuumnyh nasosov // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. 2019. № 10. S. 70–77. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-10-70-77.
 15. Naumov V.A., Velikanov N.L. Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. 032029. DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032029.
 16. Naumov V.A., Velikanov N.L. Harakteristiki vodokol'cevyh kompressornyh mashin vakuumnyh rybonasosnyh ustanovok // Rybnoe hozyajstvo. 2021. № 1. S. 94–98.
 17. AO «GMS Livgidromash». Nasosy vakuumnye vodokol'cevye tipa VVN. Rukovodstvo po `ekspluatacii. URL: http://www.hms-livgidromash.ru/upload/iblock/6f7/re-vvn1_3-i-vvn-1_12-_-vvn1_6_.pdf (data obrascheniya: 21.12.2022).
 18. Naumov V.A. Influence of leakage on characteristics of the vacuum transport unit based on the water-ring pump // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 852. 032007. DOI: 10.1088/1757-899X/852/3/032007
 19. Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika. M.: Nauka, 1976. 888 s.

Статья принята к публикации 20.06.2023 / The article accepted for publication 20.06.2023.

Информация об авторах:

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

Николай Леонидович Великанов², заведующий кафедрой судостроения, судоремонта и морской техники, доктор технических наук, профессор

Олег Васильевич Шарков³, профессор кафедры теории механизмов и машин и деталей машин, доктор технических наук, доцент

Information about the authors:

Vladimir Arkadyevich Naumov¹, Professor at the Department of Technosphere Safety and Environmental Management, Doctor of Technical Sciences, Professor

Nikolay Leonidovich Velikanov², Head of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering, Doctor of Technical Sciences, Professor

Oleg Vasilievich Sharkov³, Professor of the Department of Theory of Mechanisms and Machines and Machine Parts, Doctor of Technical Sciences, Docent

