

Процессы и аппараты пищевых производств**Processes and devices for food production**DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-17-21>

Выберите тип статьи.

УДК 66.047: 664.76

Open Access

Available online at vestnik-vsuet.ru**Кинетика процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в виброкипящем слое**

Сергей Т. Антипов	1	ast@vsuet.ru	 0000-0002-8932-5922
Василий В. Торопцев	1	vsworkmail@bk.ru	 0000-0001-6448-5586
Александр Н. Мартеха	2	man6630@rambler.ru	 0000-0002-7380-0477
Алексей А. Берестовой	1	berestovoy_1991@mail.ru	 0000-0003-2255-9414
Ирина С. Юрова	1	yurova_ira83@mail.ru	 0000-0002-5024-5888

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

2 Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская 49, г. Москва, 127550, Россия

Аннотация. Представлен анализ влияния основных факторов на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в виброкипящем слое. Цель исследования – изучение влияния основных технологических параметров на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в виброкипящем пересыпающемся слое при атмосферном давлении. В качестве основных факторов, влияющих на процесс сушки, были выбраны: температура сушильного агента, подаваемого в сушилку, скорость сушильного агента, амплитуда колебаний газораспределительных полок, частота колебаний газораспределительных полок. Показано влияние температуры и скорости воздуха на процесс сушки сырья, влияние амплитуды и частоты колебаний газораспределительной решетки на кинетику процесса сушки ферментированного продукта, а также влияние удельной нагрузки продукта на процесс влагоудаления. Анализ приведенных кривых показывает, что при увеличении амплитуды колебания уменьшает время сушки, а повышение частоты колебаний полок способствует уменьшению времени сушки. При этом наблюдается равномерное повышение интенсивности сушки во всем интервале рассматриваемых амплитуд. Повышение частоты колебаний газораспределительной решетки также способствует снижению длительности процесса сушки ферментированного пшеничного сырья. Следует отметить, что амплитуда колебаний сильнее влияет на снижение продолжительности сушки сырья, чем частота. Таким образом, нами был сделан вывод, что в исследуемых интервалах изменения амплитуды и частоты колебаний перфорированных полок на процесс сушки ферментированного пшеничного сырья сильнее влияет амплитуда колебаний. Кроме того, при выборе параметров вибрации следует учитывать величину удельной нагрузки материала на решетку и его начальную влажность.

Ключевые слова: кинетика, сушка, ферментированное пшеничное сырье**Kinetics of the drying process of fermented wheat raw materials in a vibratory boiling layer**

Sergei T. Antipov	1	ast@vsuet.ru	 0000-0002-8932-5922
Vasily V. Tороptsev	1	vsworkmail@bk.ru	 0000-0001-6448-5586
Alexander N. Martekha	2	man6630@rambler.ru	 0000-0002-7380-0477
Alexey A. Berestovoy	1	berestovoy_1991@mail.ru	 0000-0003-2255-9414
Irina S. Yurova	1	yurova_ira83@mail.ru	 0000-0002-5024-5888

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

2 Russian state agrarian University – MSHA named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya 49, Moscow, 127550, Russia

Abstract. The analysis of the influence of the main factors on the kinetics of the drying process of fermented wheat raw materials in a vibro-boiling layer is presented. The purpose of the study is to study the influence of the main technological parameters on the kinetics of the drying process of fermented wheat raw materials in a vibrating boiling overflowing layer at atmospheric pressure. The main factors affecting the drying process were selected: the temperature of the drying agent supplied to the dryer, the speed of the drying agent, the vibration amplitude of the gas distribution shelves, the vibration frequency of the gas distribution shelves. The influence of temperature and air velocity on the drying process of raw materials, the influence of the amplitude and frequency of oscillations of the gas distribution grid on the kinetics of the drying process of the fermented product, as well as the influence of the specific load of the product on the process of moisture removal are shown. An analysis of the curves shows that with an increase in the amplitude of the oscillation, it reduces the drying time, and an increase in the frequency of oscillation of the shelves contributes to a decrease in the drying time. In this case, a uniform increase in the drying intensity is observed over the entire range of the amplitudes considered. An increase in the oscillation frequency of the gas distribution grid also helps to reduce the duration of the drying process of fermented wheat raw materials. It should be noted that the amplitude of the oscillations more strongly affects the decrease in the drying time of the raw material than the frequency. Thus, we concluded that in the intervals under study the changes in the amplitude and frequency of vibrations of perforated shelves on the drying process of fermented wheat raw materials are more strongly affected by the amplitude of vibrations. In addition, when choosing vibration parameters, the specific load of the material on the grate and its initial humidity should be taken into account.

Keywords: kinetics, drying, fermented wheat raw materials

Для цитирования

Антипов С.Т., Торопцев В.В., Мартеха А.Н., Берестовой А.А., Юрова И.С. Кинетика процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в виброкипящем слое // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 4. С. 17–21. doi:10.20914/2310-1202-2019-4-17-21

For citation

Antipov S.T., Tороptsev V.V., Martekha A.N., Berestovoy A.A., Yurova I.S. Kinetics of the drying process of fermented wheat raw materials in a vibratory boiling layer. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2019. vol. 81. no. 4. pp. 17–21. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2019-4-17-21

Введение

Недостаточно прогрессивный технический уровень сушилок для высоковлажных дисперсных материалов определяет невысокое качество высушенной продукции и значительные энергозатраты на производство, вызывает необходимость введения вспомогательных операций для достижения требуемого качества готовой продукции, что приводит к увеличению себестоимости продукта.

Поэтому решение вопроса о соответствии оптимального значения влагосодержания и температуры материала кинетическим закономерностям процесса обезвоживания является одной из актуальных задач при организации технологии высокоинтенсивной сушки термочувствительных материалов.

Под кинетикой процесса сушки понимают изменение среднего влагосодержания и средней температуры тела с течением времени. Эти закономерности кинетики процесса сушки позволяют рассчитать количество испаренной влаги из материала и расход тепла на сушку [1].

Цель работы – изучение влияния основных технологических параметров на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в виброкипящем пересыпающемся слое при атмосферном давлении.

Материалы и методы

В качестве основных факторов, влияющих на процесс сушки, были выбраны: температура сушильного агента, подаваемого в сушилку, скорость сушильного агента, амплитуда колебаний газораспределительных полок, частота колебаний газораспределительных полок [2, 3]. В условиях оптимального гидродинамического режима с использованием метода планирования эксперимента нами проведены исследования кинетики сушки и теплообмена ферментированного пшеничного сырья в аппарате с виброкипящим пересыпающимся слоем.

Исследования влияния температуры и скорости воздуха на процесс сушки проводились с ферментированным пшеничным сырьем, гидролизованным в лаборатории кафедры биохимии и биотехнологии Воронежского государственного университета инженерных технологий, при его начальной влажности $W_H^C = 150\%$. При исследовании использовались изученные гигротермические свойства сырья [4].

Результаты и обсуждение

Результаты исследований представлены на рисунках 1, 2. Анализ влияния температуры и скорости воздуха на процесс сушки сырья в виброкипящем слое показал, что процесс протекает в первом и втором периодах. Изменение скорости и температуры сушильного агента

не влияет на характер изменения кривых сушки сырья. При этом большая часть влаги удаляется в периоде постоянной скорости сушки. Это объясняется тем, что ферментированное пшеничное сырье имеет развитую поровую структуру, которая содержит значительное количество влаги в макрокапиллярах.

Влияние скорости и температуры теплоносителя на скорость сушки в первом периоде неодинаково. Так, увеличение температуры с 393 до 423 К приводит к возрастанию скорости сушки в 1,5 раза. Меньшее влияние на интенсивность сушки оказывает изменение скорости теплоносителя. Так, увеличение скорости воздуха в 9 раз (с 1 до 3 м/с) способствует возрастанию скорости сушки на 25%.

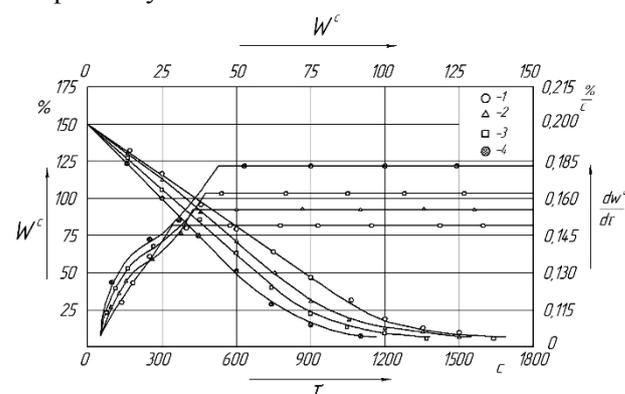


Рисунок 1. Кривые сушки и скорости сушки ферментированного пшеничного сырья при различной температуре сушильного агента, К: 1 – 393; 2 – 400,5; 3 – 415,5; 4 – 423; $A = 3$ мм; $f = 12,5$ Гц; $v = 2$ м/с; $q = 10$ кг/м²

Figure 1. Drying Curves and drying rates of fermented wheat raw materials at different temperatures of the drying agent, K: 1 – 393; 2 – 400,5; 3 – 415,5; 4 – 423; $A = 3$ mm; $f = 12,5$ Hz; $v = 2$ m/s; $q = 10$ kg/m²

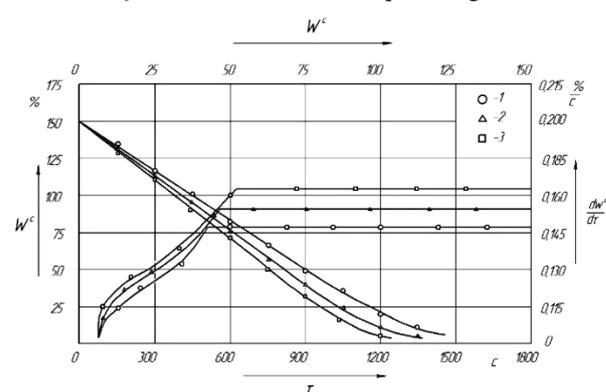


Рисунок 2. Кривые сушки и скорости сушки ферментированного пшеничного сырья при различных скоростях сушильного агента, м/с: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; $A = 3$ мм; $f = 12,5$ Гц; $T = 408$ К; $q = 10$ кг/м²

Figure 2. Drying curves and drying rates of fermented wheat raw materials at different speeds of the drying agent, m/s 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; $A = 3$ mm; $f = 12,5$ Hz; $T = 408$ K; $q = 10$ kg/m².

При достижении материалом первой критической влажности наступает период падающей скорости сушки, который по характеру изменения кривой неоднороден (рисунок 1, 2). В начале этого периода скорость сушки уменьшается по кривой, обращенной выпуклостью к оси абсцисс, а затем по кривой, обращенной выпуклостью к оси ординат.

Точка перегиба во втором периоде сушки (вторая критическая влажность) условно разделяет влагу микрокапилляров и адсорбционно-связанную влагу. Влияние скорости и температуры воздуха на интенсивность сушки в этом периоде по сравнению с периодом постоянной скорости в целом не меняется.

Характер изменения температуры частиц ферментированного пшеничного сырья, наблюдаемый на кривых нагрева (рисунок 3), соответствует периодам постоянной и падающей скорости сушки. Как видно из рисунка 3, материал прогревается до постоянной температуры очень быстро. Это обусловлено тем, что сушка осуществляется в активном гидродинамическом режиме, малым характерным размером частиц объекта сушки, а также высокими коэффициентами теплообмена [4].

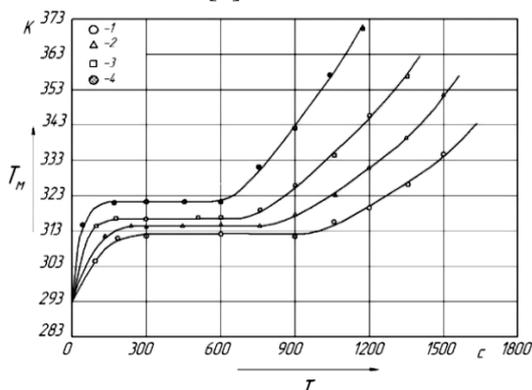


Рисунок 3. Температурные кривые ферментированного пшеничного сырья при $W^c = 150\%$, $A = 3$ мм; $f = 12,5$ Гц; $v = 2$ м/с; $q = 10$ кг/м²: 1 – 393 К; 2 – 400,5 К; 3 – 415,5 К; 4 – 423 К

Figure 3. Temperature curves of fermented wheat raw materials at $WC = 150\%$ $A = 3$ mm; $f = 12,5$ Hz; $v = 2$ m/s; $q = 10$ kg/m²: 1 – 393 K; 2 – 400,5 K; 3 – 415,5 K; 4 – 423 K

Наличие периода постоянной температуры говорит о том, что интенсивность диффузии влаги превышает интенсивность влагообмена. При этом, как видно из рисунка 3, в этом периоде сушки температура внутри частиц продукта в исследуемых интервалах температуры воздуха не превышает 373 К. Данный факт можно объяснить особенностью структуры продукта, обладающего развитой поровой структурой, и высокой начальной влажностью материала. Таким образом, влага внутри частиц ферментированного пшеничного сырья в периоде постоянной скорости сушки перемещается в основном в виде жидкости.

Результаты исследований влияния амплитуды и частоты колебаний газораспределительной решетки на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья, имеющего начальную влажность $W^c = 150\%$, представлены на рисунках 4, 5.

Анализ приведенных кривых показывает, что при увеличении амплитуды колебания с 1 до 5 мм (в 5 раз) уменьшает время сушки в 1,4 раза, а повышение частоты колебаний полка до 12,5 Гц (в 1,6 раза) способствует уменьшению времени сушки в 1,2 раза. При этом наблюдается равномерное повышение интенсивности сушки во всем интервале рассматриваемых амплитуд. Но как показали результаты экспериментальных исследований развитый виброкипящий слой материала наблюдается уже при небольших амплитудах колебаний, дальнейшее повышение которой не способствует увеличению интенсивности сушки.

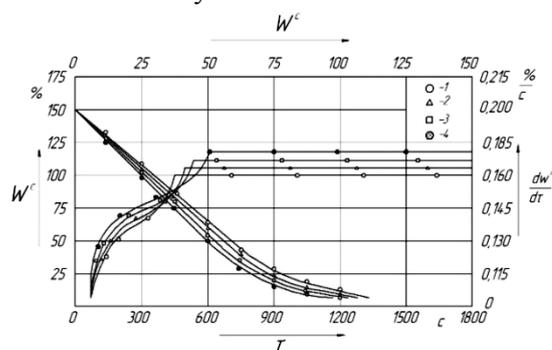


Рисунок 4. Кривые сушки и скорости сушки ферментированного пшеничного сырья при различных амплитудах колебаний газораспределительных полок, мм: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 4, 4 – 5; $T = 408$ К; $f = 12,5$ Гц; $v = 2$ м/с; $q = 10$ кг/м²

Figure 4. Drying Curves and drying rates of fermented wheat raw materials at different amplitudes of gas distribution shelves, mm: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 4, 4 – 5; $T = 408$ K; $f = 12.5$ Hz

Анализ рисунка 4 показывает, что повышение частоты колебаний газораспределительной решетки тоже способствует снижению длительности процесса сушки ферментированного пшеничного сырья. Но следует отметить, что амплитуда колебаний сильнее влияет на снижение продолжительности сушки сырья, чем частота.

Таким образом, нами был сделан вывод, что в исследуемых интервалах изменения амплитуды A и частоты f колебаний перфорированных полок на процесс сушки ферментированного пшеничного сырья сильнее влияет амплитуда колебаний. Кроме того, при выборе параметров вибрации следует учитывать величину удельной нагрузки материала на решетку и его начальную влажность.

Результаты исследований влияния удельной нагрузки на кинетику сушки представлены на рисунке 6.

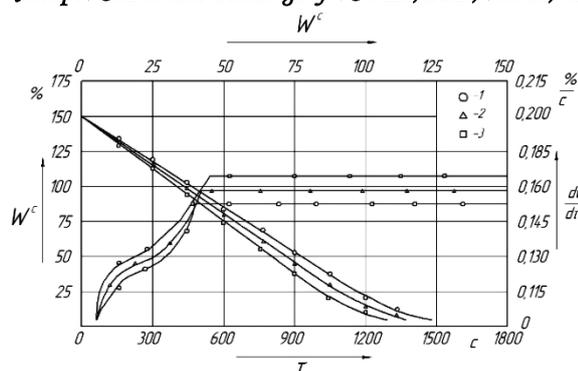


Рисунок 5. Кривые сушки и скорости сушки ферментированного пшеничного сырья при различных частотах колебания газораспределительных полок, Гц: 1 – 8, 2 – 12,5, 3 – 17; $A = 3$ мм; $v = 2$ м/с; $T = 408$ К; $q = 10$ кг/м²
 Figure 5. Drying Curves and drying rates of fermented wheat raw materials at different frequencies of oscillation of gas distribution shelves, Hz : 1 – 8, 2 – 12,5, 3 – 17; $A = 3$ mm; $v = 2$ m/s; $T = 408$ K; $q = 10$ kg/m²

Заклучение

Анализируя рисунок 6, можно видеть, что значительное влияние на скорость и продолжительность процесса сушки ферментированного пшеничного сырья оказывает удельная нагрузка ферментированного пшеничного сырья на газораспределительную полку. Так, уменьшение удельной нагрузки от 20 до 5 кг/м² способствует увеличению скорости сушки в первом

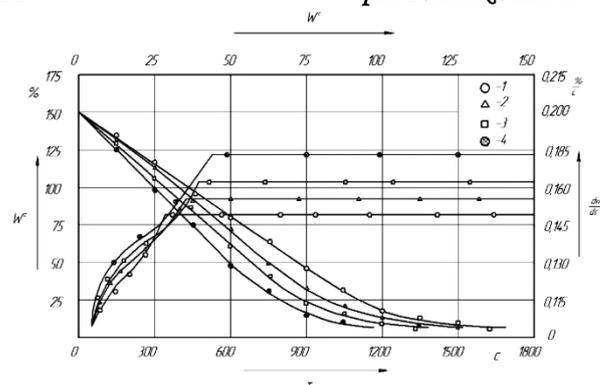


Рисунок 6. Кривые сушки и скорости сушки ферментированного пшеничного сырья при различных удельных нагрузках, кг/м²: 1 – 20; 2 – 15; 3 – 10; 4 – 5; $A = 3$ мм; $v = 2$ м/с; $T = 408$ К; $f = 12,5$ Гц
 Figure 6. Drying Curves and drying rates of fermented wheat at different specific loads, kg/m²: 1 – 20; 2 – 15; 3 – 10; 4 – 5; $A = 3$ mm; $v = 2$ m/s; $T = 408$ K; $f = 12,5$ Gz

периоде в 2,5 раза, а общая продолжительность сушки при этом уменьшается в 1,5 раза. Увеличение скорости сушки при уменьшении количества загружаемого в рабочую камеру сырья объясняется увеличением коэффициента теплообмена вследствие активизации аэродинамического режима обтекания частиц сырья теплоносителем и увеличением количества подводимой к ним теплоты [5].

Литература

- 1 Данилов Д.Ю., Завиваев С.Н., Рындин А.Ю. Энергосберегающие технологии при сушке зерна // Евразийское научное объединение. 2017. № 1. С. 36–37.
- 2 Данилов Д.Ю. Мроприятия по снижению энергозатрат при сушке зерна // Успехи современной науки. 2017. № 4. С. 15–17.
- 3 Сутягин С.А., Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Долгов В.И. Снижение удельных затрат энергии на сушку зерна на установке контактного типа // Известия Самарской Государственной Сельскохозяйственной Академии. 2017. № 2. С. 39–45.
- 4 Чуринова М.С. Учет и использование нелинейности и распределенности параметров процесса сушки зерна // Вестник Омского Государственного Аграрного Университета. 2017. № 1. С. 126–131.
- 5 Дранников А.В., Шахов С.В., Бубнов А.Р., Рябов А.Г. Установка для сушки дисперсных высоковлажных материалов // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 3–4. С. 43–46.
- 6 Odjo S., Béra F., Beckers Y., Foucart G. et al. Influence of variety, harvesting date and drying temperature on the composition and the in vitro digestibility of corn grain // Journal of Cereal Science. 2018. V. 79. P. 218–225.
- 7 Li Z., Li Z., Muhammad W., Lin M. et al. Proteomic analysis of positive influence of alternate wetting and moderate soil drying on the process of rice grain filling // Plant Growth Regulation. 2018. V. 84. № 3. p. 533–548.
- 8 Azmira J., Hou Q., Yu A. Discrete particle simulation of food grain drying in a fluidised bed // Powder Technology. 2018. V. 323. P. 238–2491.
- 9 Wang H., Cao S., Cui Y., Cao Z. et al. Analysis of temperature field of grain and drying medium for grain drying integrated mechanical device // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 175. doi: 10.1051/mateconf/201817502024
- 10 Böttger C., Südekum K.-H. Review: protein value of distillers dried grains with solubles (DDGS) in animal nutrition as affected by the ethanol production process // Animal Feed Science and Technology. 2018. V. 244. P. 11–17.

References

- 1 Danilov D.Yu., Zavivaev S.N., Ryndin A.Yu. Energy-saving technologies for drying grain. Eurasian Scientific Association. 2017. no. 1. pp. 36–37. (in Russian).
- 2 Danilov D.Yu. Activities to reduce energy consumption when drying grain. Successes in modern science. 2017. no. 4. pp. 15–17. (in Russian).
- 3 Sutyagin S.A., Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Dolgov V.I. Reducing the specific cost of energy for drying grain in a contact type plant. Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. 2017. no. 2. pp. 39–45. (in Russian).
- 4 Churinova M.S. Accounting and use of non-linearity and distribution of parameters of the drying process of grain. Bulletin of Omsk State Agrarian University. 2017. no. 1. pp. 126–131. (in Russian).

- 5 Drannikov A.V., Shakhov S.V., Bubnov A.R., Ryabov A.G. Installation for drying dispersed high-moisture materials. Scientific Review. Pedagogical sciences. 2019. no. 3–4. pp. 43–46. (in Russian).
- 6 Odjo S., Béra F., Beckers Y., Foucart G. et al. Influence of variety, harvesting date and drying temperature on the composition and the in vitro digestibility of corn grain. Journal of Cereal Science. 2018. vol. 79. pp. 218–225.
- 7 Li Z., Li Z., Muhammad W., Lin M. et al. Proteomic analysis of positive influence of alternate wetting and moderate soil drying on the process of rice grain filling. Plant Growth Regulation. 2018. vol. 84. no. 3. pp. 533–548.
- 8 Azmira J., Hou Q., Yu A. Discrete particle simulation of food grain drying in a fluidised bed. Powder Technology. 2018. vol. 323. pp. 238–2491.
- 9 Wang H., Cao S., Cui Y., Cao Z. et al. Analysis of temperature field of grain and drying medium for grain drying integrated mechanical device. MATEC Web of Conferences. 2018. vol. 175. doi: 10.1051/mateconf/201817502024
- 10 Böttger C., Südekum K.–H. Review: protein value of distillers dried grains with solubles (DDGS) in animal nutrition as affected by the ethanol production process. Animal Feed Science and Technology. 2018. vol. 244. pp. 11–17.

Сведения об авторах

Сергей Т. Антипов д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ast@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2499-8859>

Василий В. Торопцев к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vsworkmail@bk.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

Александр Н. Мартеха к.т.н., доцент, кафедра процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Тимирязевская 49, г. Москва, 127550, Россия, man6630@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

Алексей А. Берестовой к.т.н., ст. преподаватель, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, berestovoy_1991@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2255-9414>

Ирина С. Юрова к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yurova_ira83@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5024-5888>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Sergei T. Antipov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ast@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2499-8859>

Vasily V. Toroptsev Cand. Sci. (Engin.), associate professor, machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, vsworkmail@bk.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

Alexander N. Martekha Cand. Sci. (Engin.), associate professor, processes and apparatuses of processing industries department, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya 49, Moscow, 127550, Russia, man6630@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

Alexey A. Berestovoy Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, berestovoy_1991@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2255-9414>

Irina S. Yurova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yurova_ira83@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5024-5888>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 13/11/2019	После редакции 23/11/2019	Принята в печать 04/12/2019
Received 13/11/2019	Accepted in revised 23/11/2019	Accepted 04/12/2019