



Научная статья

05.18.01 – Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства (технические науки)

УДК 665.35

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.002

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Игорь Сергеевич Богомолов¹, Наталья Леонидовна Клейменова²,
Максим Васильевич Копылов³

¹ АО НПЦ «ВНИИ Комбикормовой промышленности», Воронеж, Россия

^{2,3} Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

¹ igor-bog@yandex.ru

² klesha78@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1462-4055>

³ kopylov-maks@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2678-2613>

Аннотация. Проведено исследование процесса влаготепловой обработки зерновых культур: зерна пшеницы, овса, ячменя, кукурузы, гороха, отрубей и других зерновых культур. Изучение процесса сушки осуществляли на сушильной установке с перемешиваемым слоем, с высотой насыпи материала от 100 до 400 мм. Эксперимент проводили при изменении температуры сушильного агента в интервале от 100 до 170 °С, скорости воздуха от 0,5 до 2,0 м/с, продолжительности обработки от 3 до 20 минут. Максимальная высота обрабатываемого слоя для данного типа установки составила 250–300 мм. Установлено, что наилучшие результаты получены при температуре агента сушки 120–130 °С. В процессе сушки температура хлопьев возрастала до 90–100 °С в течение 8–9 мин, а влажность продукта уменьшалась с 23 % до 13–14 %. Получены результаты при различном состоянии слоя: в плотном не перемешиваемом слое нагрев хлопьев происходит неравномерно, и сушка также оказывается неравномерной. Исследование влияния процесса сушки на качество продукта показало, что при лучшем режиме качественные показатели хлопьев после сушки изменяются незначительно по сравнению с хлопьями до сушки. В качестве рационального режима сушки хлопьев рекомендуется начальная влажность 22–24 %: температура агента сушки – 120–130 °С; продолжительность сушки – 8–9 мин; скорость продувки слоя – 0,7–0,8 м/с; высота продуваемого слоя – 250–300 мм. Исследован процесс охлаждения хлопьев, в результате которого при скорости воздуха 0,7–0,8 м/с в плотном слое при высоте более 150 мм наблюдалось неравномерное охлаждение продукта. Механическое перемешивание способствует выравниванию температуры продукта по высоте слоя. Таким образом, установлена оптимальная высота слоя при перемешивании – 250–300 мм.

Ключевые слова: ячменные хлопья, процесс, сушка, влагосодержание.

Для цитирования: Богомолов, И. С., Клейменова, Н. Л., Копылов, М. В. Исследование процесса сушки зерновых культур // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 14–19. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.002.

RESEARCH OF GRAIN CROPS DRYING PROCESS

Igor S. Bogomolov¹, Natalia L. Kleymenova², Maxim V. Kopylov³¹ JSC RPC «All-Russian Research Institute of the Feed Industry», Voronezh, Russia^{2,3} Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia¹ igor-bog@yandex.ru² klesha78@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1462-4055>³ kopylov-maks@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2678-2613>

Abstract. *The study of the process of grain crops moisture-thermal treatment: wheat, oats, barley, corn, peas, bran and others was carried out in the work. The research of the drying process was carried out on a drying unit with a stirred layer with a height of the material fill from 100 to 400 mm. The experiment was carried out with a change in the temperature of the drying agent in the range from 100 to 170 °C, air speed from 0.5 to 2.0 m / s, and the duration of treatment from 3 to 20 minutes. The maximum height of the processed layer for this type of unit was 250-300 mm. It was found out that the best results were obtained at a drying agent temperature of 120-130 °C. The temperature of the flakes increased to 90-100 °C within 8-9 minutes, and the moisture content of the product decreased from 23% to 13-14% during the drying process. The results were obtained with different conditions of the layer: in a dense, non-agitated layer, heating of the flakes occurred unevenly, and drying also turned out to be uneven. The study of the drying process influence on the product quality showed that with the best mode, the quality indicators of the flakes after drying change insignificantly in comparison with the flakes before drying. As a rational drying mode, the flakes initial moisture content is recommended to be 22-24%: the temperature of the drying agent is 120-130 °C; the drying time - 8-9 minutes; the layer blowing speed - 0.7-0.8 m/s; the height of the blown layer is 250-300 mm. The flakes cooling process was also investigated. As a result, uneven product cooling was observed at an air speed of 0.7-0.8 m/s in a dense layer at a height of more than 150 mm. Mechanical stirring helps to even the product temperature along the layer height. Thus, the optimal layer height with stirring is set - 250-300 mm.*

Keywords: *barley flakes, process, drying, moisture content.*

For citation: Bogomolov, I. S., Kleymenova, N. L. & Kopylov, M. V. (2021). Research of grain crops-drying process. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 14-19. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.002.

ВВЕДЕНИЕ

Современные сушильные предприятия нуждаются в экономичных и безопасных системах быстрой и низкотемпературной сушки [1]. Сушка является наиболее важным послеуборочным процессом для быстрого и безопасного сохранения сельскохозяйственной продукции, но в то же время этот процесс требует большого энергопотребления [2, 3]. Сельскохозяйственная сушка особенно энергозатратна по нескольким причинам: высокие различия между содержанием влаги в урожае и при хранении; низкие температуры сушки и низкие уровни предварительной обработки из-за чувствительности к термическим и механическим нагрузкам [4, 5]. Хорошо зарекомендовавшие себя методы увеличения теп-

ломассообмена, такие как увеличение поверхности и перемешивание материала слоя, не применимы для многих продуктов [6]. Поэтому фермеры зависят от оптимальных окон для сбора урожая и погодных условий, а также мощных систем сушки, чтобы достичь высокого качества продукции, избежать его ухудшения качества и одновременно обработать большое количество продукции [7–9]. Следовательно, технологам приходится идти на компромисс между щадящей сушкой, энергоэффективностью и высокой производительностью сушки, чтобы приблизиться к оптимальному качеству процесса для конкретной культуры [10–12].

Цель исследования – изучение процессов сушки и охлаждения хлопьев.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по изучению процесса сушки выполняли на сушильной установке с перемешиваемым слоем при высоте насыпи от 100 до 400 мм.

Исследования проводили при изменении температуры сушильного агента в интервале от 100 до 170 °С, скорости воздуха от 0,5 до 2,0 м/с, продолжительности обработки от 3 до 20 минут. Начальная влажность хлопьев была в пределах 20–25 %, а их начальная температура составляла 20–25 °С.

Пробы на влажность отбирали на выходе из сушильного аппарата [13]. Сущность метода заключалась в обезвоживании навески измельченного зерна в сушильном шкафу (установке) при фиксированных параметрах: температуре, времени сушки и вычислении влажности в процентах по изменению ее массы путем взвешивания навески до и после высушивания.

При определении высоты слоя продукта исходили из возможности обработки хлопьев в слое наибольшей высоты, с целью большего съема влаги. Исследования показали, что максимальная высота обрабатываемого слоя для данного типа установки составляет 250–300 мм.

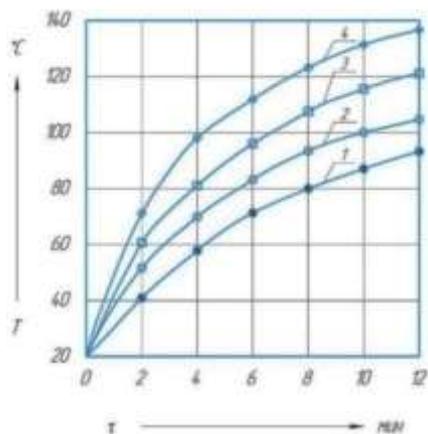


Рисунок 1 – Изменение температуры ячменных хлопьев в процессе сушки в зависимости от скорости воздуха $v_a = 0,75$ м/с: 1 – $T_a = 170$ °С, 2 – $T_a = 150$ °С, 3 – $T_a = 130$ °С, 4 – $T_a = 110$ °С

Figure 1 – Change in temperature of barley flakes during drying depending on air speed $v_a = 0,75$ м/с: 1 – $T_a = 170$ °С, 2 – $T_a = 150$ °С, 3 – $T_a = 130$ °С, 4 – $T_a = 110$ °С

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование процесса влаготепловой обработки зерновых культур проводили с предварительным увлажнением зерна водой или пропариванием. Объектами исследований являлись зерна пшеницы, овса, ячменя, кукурузы, гороха, отруби и другие зерновые культуры. Увлажнение зерна водой осуществляли при изменении температуры в пределах от 20 °С до 100 °С и длительности обработки от 1 до 10 минут. При проведении экспериментов зерно увлажняли до влажности 18–20 %.

Хлопья, полученные с применением увлажнения или пропаривания, имеют повышенную влажность – 20–25 %, что при хранении приводит к ухудшению технологических свойств, слеживанию, самосогреванию, быстрому снижению качества продукта, ухудшению санитарного состояния хлопьев.

Для предотвращения этих явлений в технологической схеме должна быть предусмотрена сушка хлопьев с доведением влажности их до 13–14 %.

Результаты исследований показывают, что, как и следовало ожидать, повышение температуры воздуха значительно интенсифицирует процесс сушки (рисунки 1 и 2). При температуре агента сушки 110 °С, скорости его 0,75 м/с температура хлопьев в течение десяти минут достигала 90 °С, влажность хлопьев снижалась с 23 до 16 %.

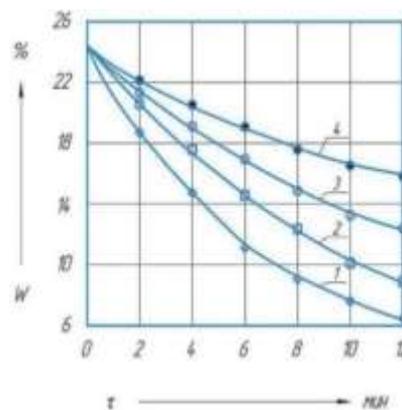


Рисунок 2 – Изменение влагосодержания ячменных хлопьев в процессе сушки в зависимости от скорости воздуха $v_a = 0,75$ м/с: 1 – $T_a = 170$ °С, 2 – $T_a = 150$ °С, 3 – $T_a = 130$ °С, 4 – $T_a = 110$ °С

Figure 2 – Change in moisture content of barley flakes during drying depending on air speed $v_a = 0,75$ м/с: 1 – $T_a = 170$ °С, 2 – $T_a = 150$ °С, 3 – $T_a = 130$ °С, 4 – $T_a = 110$ °С

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

С повышением температуры агента сушки до 170 °С процесс интенсифицировался более чем в 2 раза, но при такой температуре мелкая фракция хлопьев пересушивается и может самовоспламениться. Лучшие результаты получены при температуре агента сушки 120–130 °С. В процессе сушки температура хлопьев возрастала до 90–100 °С в течение 8–9 минут, и за этот период влажность продукта снижалась с 23 % до 13–14 %.

Изучение процесса сушки хлопьев при различном состоянии слоя показало, что в плотном не перемешиваемом слое нагрев хлопьев происходит неравномерно (рисунок 3) и соответственно наблюдается значительная неравномерность сушки.

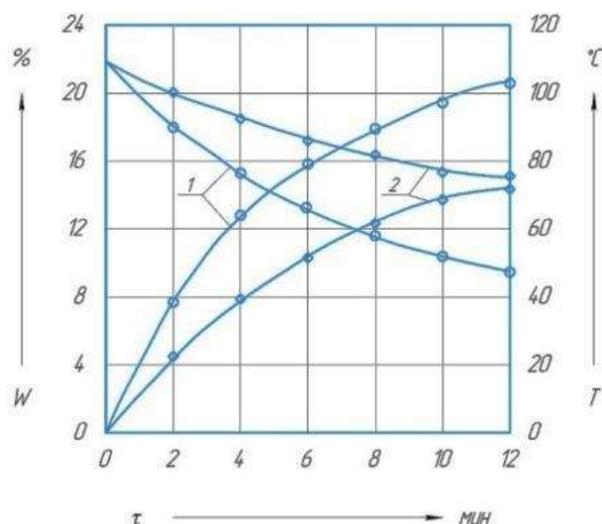


Рисунок 3 – Изменение влажности и температуры слоя хлопьев от состояния продукта в процессе сушки при $H_{\text{слоя}} = 250$ мм, $T_a = 150$ °С, $v_b = 0,7$ м/с:
1 – перемешиваемый слой,
2 – неподвижный слой

Figure 3 – The change in the moisture content and temperature of the flake layer from the state of the product during the drying process at $H_{\text{layer}} = 250$ mm, $T_a = 150$ °C, $v_a = 0.7$ m/s:
1 - agitated layer, 2 - fixed layer

На основании исследований можно рекомендовать следующий режим сушки хлопьев начальной влажностью 22–24 %: температура агента сушки – 120–130 °С; продолжительность сушки – 8–9 мин; скорость продувки слоя – 0,7–0,8 м/с; высота продуваемого слоя – 250–300 мм.

В процессе сушки температура хлопьев возрастает до 100 °С, поэтому после этой операции их необходимо охлаждать до тем-

пературы, при которой возможно их хранение без ухудшения качества. В ходе исследования процесса охлаждения хлопьев изменяли два основных фактора, оказывающих наибольшее влияние на интенсификацию процесса охлаждения: скорость воздуха и толщину слоя хлопьев – от 0,2 до 1,0 м/с и от 100 до 450 мм соответственно. Начальная температура хлопьев составляла от 100 до 96 °С, а относительная влажность воздуха – от 67 до 85 %.

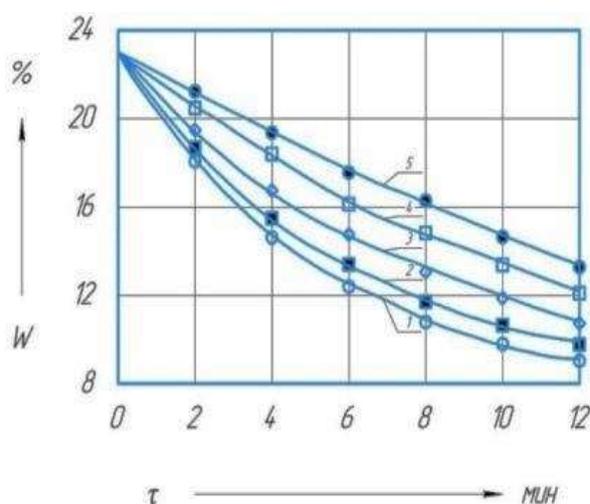


Рисунок 4 – Изменение влагосодержания ячменных хлопьев в процессе сушки при температуре агента сушки $T_a = 150$ °С:
1 – $v_b = 1,0$ м/с, 2 – $v_b = 0,75$ м/с, 3 – $v_b = 0,5$ м/с,
4 – $v_b = 0,32$ м/с, 5 – $v_b = 0,2$ м/с

Figure 4 – Change in moisture content of barley flakes during drying at a drying agent temperature $T_a = 150$ °C: 1 – $v_a = 1,0$ m/s, 2 – $v_a = 0,75$ m/s,
3 – $v_a = 0,5$ m/s, 4 – $v_a = 0,32$ m/s,
5 – $v_a = 0,2$ m/s

пературы, при которой возможно их хранение без ухудшения качества.

В ходе исследования процесса охлаждения хлопьев изменяли два основных фактора, оказывающих наибольшее влияние на интенсификацию процесса охлаждения: скорость воздуха и толщину слоя хлопьев – от 0,2 до 1,0 м/с и от 100 до 450 мм соответственно. Начальная температура хлопьев составляла от 100 до 96 °С, а относительная влажность воздуха – от 67 до 85 %.

Охлаждение хлопьев осуществляли до температуры не выше 10–15 °С – температуры окружающей среды. Увеличение скорости воздуха выше 1 м/с приводит к уносу более мелкой фракции хлопьев, поэтому скорость воздуха в опытах была не выше 1 м/с.

Изучение процесса охлаждения показало (рисунок 5), что, как и следовало ожидать, с увеличением скорости воздуха температура продукта снижается быстрее.

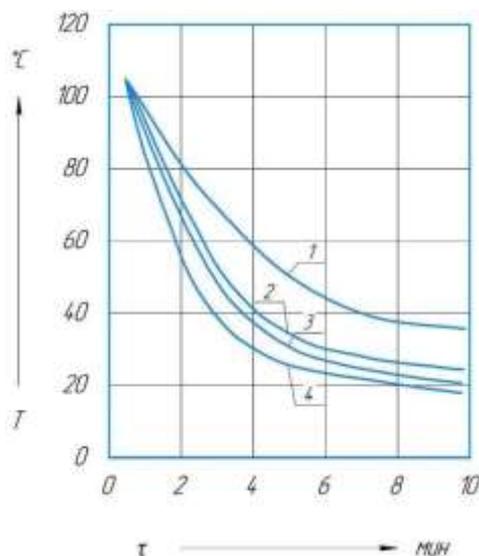


Рисунок 5 – Изменение температуры хлопьев в процессе охлаждения:

1 – v_в = 0,2 м/с, 2 – v_в = 0,55 м/с,
3 – v_в = 0,75 м/с, 4 – v_в = 1,0 м/с

Figure 5 – Change in temperature of flakes during cooling:

1 - v_a = 0.2 m/s, 2 - v_a = 0.55 m/s,
3 - v_a = 0.75 m/s, 4 - v_a = 1.0 m/s

Если при скорости воздуха 0,2 м/с за 6 минут температура хлопьев составляла 45–50 °С, то за аналогичный промежуток времени, но при скорости воздуха 1 м/с, она составляла 23–25 °С. Увеличение толщины слоя хлопьев приводит к замедлению процесса охлаждения. Так, при скорости воздуха 0,7–0,8 м/с в плотном слое при высоте более 150 мм наблюдалось неравномерное охлаждение продукта. Механическое перемешивание способствовало выравниванию температуры продукта по высоте слоя. Наиболее оптимальная высота слоя при перемешивании составляла 250–300 мм.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании анализа результатов экспериментов установлено, что наиболее интенсивный режим охлаждения

без ухудшения качественной характеристики продукта происходит при скорости воздуха 0,7–0,8 м/с, высоте перемешивающего слоя – 300 мм и продолжительности охлаждения – 4–5 минут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В.А., Остриков А.Н. Приоритетные методы тепловой обработки зерновых компонентов в технологии комбикормов. Воронеж : ВГУ-ИТ, 2015. 336 с.
2. Остриков А.Н., Афанасьев В.А., Мануйлов В.В. Разработка технологии зерновых хлопьев для комбикормов // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1. С. 15–21.
3. Афанасьев В.А., Остриков А.Н. Приоритетные методы тепловой обработки зерновых компонентов в технологии комбикормов. Воронеж : ВГУ-ИТ, 2015. 336 с.
4. Афанасьев В.А. Энерго- и ресурсосберегающие технологии комбикормов. Воронеж : ВГУ-ИТ, 2017. 473 с.
5. Бунзель Д., Лемме А. Технологические и биологические аспекты тепловой обработки комбикормов // Комбикорма. 2015. № 12. С. 43–46.
6. Спесивцев А.И. Процесс смешивания при производстве комбикормов // Комбикорма. 2016. № 3. С. 37–41.
7. Цвырко А.А. Современное состояние и проблемы формирования эффективного рынка зерна // Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences. 2012. Vol. 1 (1). С. 19–23.
8. Sokolov M.S., Glinushkin A.P., Toporova E.Y., Borovaya V.P., Bugaeva L.N. Healthy soil – phytosanitary basis of non-pesticide crop production // Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences. 2015. Vol. 48 (12). P. 3–9.
9. Орловцева О.А., Игнатенко Н.А., Клейменова Н.Л. Изучение влияния внешних условий на процесс хранения зерна // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 4 (70). С. 36–40.
10. Tertychnaya T.N., Shevtsov A.A., Kulikov S.S. Experimental and statistical analysis research of the triticale grain drying process when countercurrent-direct-flow blowing of the grain layer // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021. Vol. 82 (4). P. 38–46.
11. Mellmann Jochen, Weigler Fabian, Scaar, Holger. Research on procedural optimization and development of agricultural drying processes // Drying Technology. 2019. Vol. 37 (5). P. 569–578.
12. Остриков А.Н., Афанасьев В.А., Мануйлов В.В. Разработка комплекта оборудования для производства зерновых хлопьев для комбикормов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания. 2017. № 1. С. 74–83.
13. ГОСТ13586.5-2015 Зерно. Метод определения влажности : дата введения 2016-07-01. Москва : Стандартинформ, 2019. 12 с.

Информация об авторах

И. С. Богомолов – к.т.н., доцент кафедры ТЖ, ПАХПП, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

Н. Л. Клейменова – к.т.н., доцент кафедры УК и ТВБ, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

М. В. Копылов – к.т.н., доцент кафедры ТЖ, ПАХПП, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

REFERENCES

1. Afanasyev, V.A., Ostrikov, A.N. (2015). Priority methods of heat treatment of grain components in the technology of compound feeds, Voronezh: VSUIT. P. 336. (In Russ.).
2. Ostrikov, A.N., Afanasyev, V.A., Manuilov, V.V. (2017). Development of technology of grain flakes for compound feeds. *Vestnik VGUI*, 79 (1), 15-21. (In Russ.).
3. Afanasyev, V.A., Ostrikov, A.N. (2015). Priority methods of heat treatment of grain components in the technology of compound feeds. Voronezh: VSUIT. P. 336. (In Russ.).
4. Afanasyev, V.A. (2017). Energy- and resource-saving technologies of compound feeds. Voronezh: VSUIT. P. 473. (In Russ.).
5. Bunzel, D., Lemme, A. (2015). Technological and biological aspects of heat treatment of compound feeds. *Compound feed*. (12). 43-46. (In Russ.).
6. Spesivtsev, A.I. (2016). The process of mixing in the production of compound feeds. *Compound feed*. (3). 37-41. (In Russ.).
7. Tsvyrko, A.A. (2012). The current state and problems of the formation of an effective grain market. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 1(1).19-23. (In Russ.).
8. Sokolov, M.S., Glinushkin, A.P., Toropova, E.Y., Borovaya, V.P., Bugaeva, L.N. (2015).

Healthy soil - phytosanitary basis of non-pesticide crop production. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 48(12). 3-9.

9. Orlovseva, O.A., Ignatenko, N.A., Kleimenova, N.L. (2016). Study of the influence of external conditions on the grain storage process. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 4 (70). 36-40. (In Russ.).

10. Tertychnaya, T.N., Shevtsov, A.A., Kulikov, S.S. (2021). Experimental and statistical analysis research of the triticale grain drying process when countercurrent-direct-flow blowing of the grain layer. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 82(4). 38-46.

11. Mellmann, Jochen & Weigler, Fabian & Scaar, Holger. (2019). Research on procedural optimization and development of agricultural drying processes. *Drying Technology*. 37(5). 569-578.

12. Ostrikov, A.N., Afanasyev, V.A., Manuilov, V.V. (2017). Development of a set of equipment for the production of cereal flakes for compound feeds. *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex-healthy food products*. (1). 74-83. (In Russ.).

13. Seed. Method for determining humidity: (2015). HOST 13586.5-2015. from 1 July 2016. Moscow: Standarts Publishing House. (In Russ.).

Information about the authors

I. S. Bogomolov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of TJ, PAHPP, Voronezh State University of Engineering Technologies.

N. L. Kleimenova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Management and TVB, Voronezh State University of Engineering Technologies.

M. V. Kopylov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of TJ, PAHPP, Voronezh State University of Engineering Technologies.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 18.10.2021; одобрена после рецензирования 12.11.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was received by the editorial board on 18 Oct 21; approved after reviewing on 12 Nov 21; accepted for publication on 26 Nov 21.