

Научная статья  
УДК 631.365.22  
doi:10.35694/YARCX.2024.65.1.016

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОТВЕРСТИЙ В ЦИЛИНДРАХ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ РОТОРНОЙ СУШИЛКИ

**Владимир Анатольевич Николаев**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия  
nikolaev53@inbox.ru, ORCID 0000-0001-7503-6612

**Реферат.** Большие финансовые затраты на сушку обусловлены как дороговизной сушильно-сортировальных комплексов, так и ограниченным периодом их эксплуатации в течение года. Чтобы использовать сушилку в течение всего года, она должна быть универсальной, то есть качественно сушить без существенной переналадки все материалы и изделия сельскохозяйственного и подсобного производства. Конструкция предлагаемой полуавтоматической универсальной роторной сушилки существенно отличается от сушилок, используемых в настоящее время, поэтому необходима разработка теории загрузки, выгрузки и сушки различных материалов, в частности зерна. Эффективность сушки зависит от многих факторов, в частности, от размеров внешних цилиндров и внутренних цилиндров, между которыми находится зерно при сушке, и параметров отверстий в них. Максимальная толщина слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром желательна, но ограничена конструктивной компоновкой агрегата и требованием неотпотевания зерна при его сушке, поэтому диаметры внешних цилиндров и внутренних цилиндров получены, исходя из этих требований. Максимальная совокупная площадь отверстий внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра, при их определённом диаметре, ограничена требованием прочности конструкции. При ограниченных размерах и количестве отверстий внутреннего цилиндра эффективность сушки зависит от скорости потока агента сушки через эти отверстия, которая должна быть максимальной, но меньше критической. Полученная совокупная площадь отверстий внутреннего цилиндра позволит определить объём потока подогретого воздуха в секунду, создаваемого вентилятором предварительной продувки, и потока агента сушки, создаваемого теплопроизводящим агрегатом.

*Ключевые слова:* универсальная полуавтоматическая роторная сушилка, зерно, сушка зерна, внешний цилиндр, внутренний цилиндр, параметры отверстий

## DETERMINATION OF THE HOLE PARAMETERS IN THE CYLINDERS OF THE SEMI-AUTOMATIC ROTARY DRYER

**Vladimir A. Nikolaev**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia  
nikolaev53@inbox.ru, ORCID 0000-0001-7503-6612

**Abstract.** Large financial costs for drying are due to both the high cost of drying and sorting complexes and the limited period of their operation during the year. To use the dryer throughout the year, it must be universal, that is, it must dry all materials and products of agricultural and subsidiary production without significant readjustment. The design of the proposed semi-automatic universal rotary dryer is significantly different from the currently used dryers so it is necessary to develop a theory of loading, unloading and drying of various materials, in particular grain. The drying efficiency depends on many factors, in particular the dimensions of the outer cylinders and inner cylinders between which the grain is located during drying, and the parameters of the holes in them. The maximum thickness of the grain layer between the outer cylinder and the inner cylinder is desirable, but is limited by the design arrangement of the unit and the requirement that the grain is not sweated when dried, so the diameters of the outer cylinders and the inner cylinders are obtained based on these requirements. The maximum total area of the holes of the outer cylinder and the inner cylinder with their certain diameter is limited by the requirement of structural strength. With the limited size and number of holes of the inner cylinder the drying efficiency depends on the rate of flow of the drying agent through these holes, which should be maximum but less than critical. The obtained total area of the holes of the inner cylinder will make it possible to determine the volume of the heated air flow per second created by pre-purging fan and the drying agent flow created by the heat-producing unit.

*Keywords:* universal semi-automatic rotary dryer, grain, grain drying, inner cylinder, outer cylinder, hole parameters

**Введение.** В условиях колебания цен на зерно для стабильного его производства большое значение имеет уменьшение финансовых издержек. Очень значимой составляющей финансовых затрат на производство зерна в условиях Нечернозёмной зоны России, особенно при повышении цены топлива, является его сушка. Как теоретические, так и конструкторские разработки многих авторов [1; 2; 3; 4; 5] нацелены на уменьшение этих финансовых издержек. Однако достичь существенного прогресса пока не удаётся. Это обусловлено как дороговизной сушильно-сортировальных комплексов, так и ограниченным периодом их эксплуатации в течение года.

Полуавтоматическая универсальная роторная сушилка [6] предназначена для сушки без существенной переналадки всех материалов и изделий сельскохозяйственного и подсобного производства. Она имеет существенные отличия от сушилок, используемых в настоящее время. Поэтому необходима разработка теории загрузки, выгрузки и сушки различных материалов, в частности зерна. Одним из важнейших элементов полуавтоматической универсальной роторной сушилки являются внешние цилиндры и внутренние цилиндры [6]. Внутри каждого перфорированного внешнего цилиндра посредством лучей внутреннего цилиндра установлен перфорированный внутренний цилиндр с конусом. Для обеспечения необходимой прочности в сочетании с перфорацией стенки наружного цилиндра и внутреннего цилиндра выполнены в виде сот. Жёсткость им придают планки внешнего цилиндра и планки внутреннего цилиндра.

Зерно в процессе загрузки [7] попадает в пространство между внутренним цилиндром и внешним цилиндром, когда они находятся сверху, то есть в первом положении [6]. Шесть внешних цилиндров с расположенными внутри них внутренними цилиндрами можно вращать как по отдельности, так и совместно. Кроме того, все цилиндры, согласно программе сушки, перемещают по окружности относительно общего центра вращения из одного положения в другое. Во втором положении зерно продувает подогретый воздух из теплообменников. Подогретый воздух поступает во внутренний цилиндр, проходит через его перфорированные стенки, пронизывает высушиваемый сыпучий материал и выходит наружу через перфорированные стенки внешнего цилиндра. В третьем, четвёртом и пятом положении его продувает агент сушки. В шестом положении охлаждающий высушиваемый материал воздушным потоком, создаваемым всасывающим вентилятором охлаждения. Засасываемый вентилятором охлаждения наружный воздух проходит через перфорированные стенки внешнего цилиндра, охлаждаемый материал, перфорированные стенки внутреннего

цилиндра и выходит в трубу. Выгрузка зерна [8; 9] происходит в первом положении внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра.

**Методика.** Ранее были определены параметры выгрузки и загрузки зерна в универсальную полуавтоматическую роторную сушилку [7; 8; 9; 10]. Для увеличения пропускной способности сушилки, при прочих равных условиях, желательное увеличение толщины слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром. Однако максимальная толщина слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром не может быть слишком большой, так как при прохождении потока подогретого воздуха или агента сушки от внутреннего цилиндра к внешнему цилиндру зерно, расположенное близко к внешнему цилиндру, будет отпотевать. Это связано с уменьшением скорости потока воздуха или агента сушки. Поэтому диаметр внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра ограничен не только конструктивной компоновкой агрегата, но и требованием неотпотевания зерна при его сушке. Из этого условия и конструктивной компоновки [6] универсальной полуавтоматической роторной сушилки получены оптимальные базовые размеры:

- диаметр траектории перемещения осей внешних цилиндров 4000 мм;
- диаметр наружной стенки внешнего цилиндра 1390 мм;
- диаметр внутренней стенки внешнего цилиндра 1354 мм;
- диаметр наружной стенки внутреннего цилиндра 536 мм;
- диаметр внутренней стенки внутреннего цилиндра 500 мм.

Рабочая длина внутреннего цилиндра 6 метров. Поэтому площадь развёртки внутренней стенки внутреннего цилиндра:

$$S_{pвц} = \pi \cdot 0,5 \cdot 6 = 9,42 \text{ м}^2.$$

Построим элемент развёртки внутренней стенки внутреннего цилиндра 100×100 мм (рис. 1).

Примем отверстие в виде шестигранной соты, вписанной в окружность диаметром 2 мм. Площадь отверстия  $S_o = 2,6 \text{ мм}^2$ . Для соблюдения прочности внутреннего цилиндра расстояние между стенками отверстий примем 1 мм. Тогда в двух рядах будет 73 отверстия. Количество рядов – 21. Количество отверстий в элементе развёртки внутренней стенки внутреннего цилиндра 100×100 мм 1533 шт. Их площадь:

$$S_{o100 \times 100} = 1533 \cdot 2,6 = 3986 \text{ мм}^2 = 0,003986 \text{ м}^2.$$

Общая площадь отверстий во внутреннем цилиндре:

$$S_{oвц} = S_{o100 \times 100} \frac{S_{pвц}}{0,01},$$

$$S_{oвц} = 0,003986 \frac{9,42}{0,01} = 3,7548 \text{ м}^2.$$

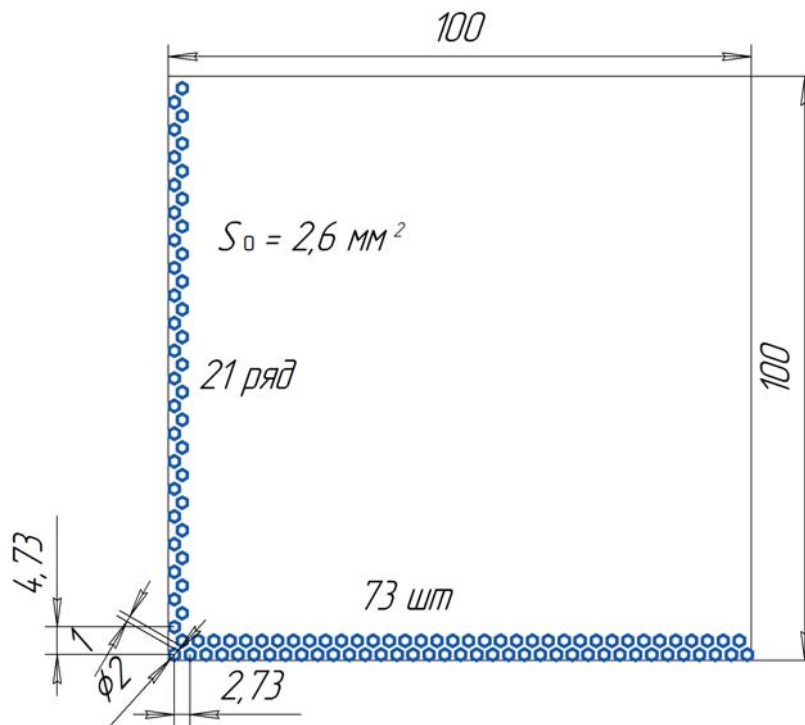


Рисунок 1 – К определению площади отверстий во внутреннем цилиндре

Пусть отверстия внешнего цилиндра также будут в виде шестигранной соты, вписанной в окружность диаметром 2 мм. Площадь отверстий в элементе развёртки внутренней стенки внешнего цилиндра также  $S_{o\ 100 \times 100} = 0,003986 \text{ м}^2$ . Диаметр внутренней стенки внешнего цилиндра 1354 мм. Рабочая длина внешнего цилиндра 6 метров. Поэтому площадь развёртки внутренней стенки внешнего цилиндра:

$$S_{p\ \text{внеш ц}} = 3,14 \cdot 1,354 \cdot 6 \approx 25,5 \text{ м}^2.$$

Общая площадь отверстий во внешнем цилиндре:

$$S_{o\ \text{внеш ц}} = S_{o\ 100 \times 100} \frac{S_{p\ \text{внеш ц}}}{0,01};$$

$$S_{o\ \text{в ц}} = 0,003986 \frac{25,5}{0,01} = 10,168 \text{ м}^2.$$

Эффективность сушки зависит от температуры подогретого воздуха или агента сушки и скорости его потока в высушиваемом материале. Однако температура агента сушки строго ограничена. Скорость потока агента сушки зависит от производительности по потоку теплопроизводящего агрегата и соответствующей совокупной площади отверстий. То есть совокупная площадь отверстий определяет производительность по потоку теплопроизводящего агрегата. Так как общая площадь отверстий во внутреннем цилиндре существенно меньше общей площади отверстий во внешнем цилиндре, эффективность сушки зависит от скорости потока агента сушки через отверстия внутреннего цилиндра. Она должна быть максимальной, но меньше критической. Зерновки, расположенные на

внутреннем цилиндре, не должны фонтанировать при прохождении агента сушки через отверстия внутреннего цилиндра. Однако слой зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром не является постоянным. Диаметр внутренней стенки внешнего цилиндра 1354 мм. Диаметр наружной стенки внутреннего цилиндра 536 мм. Следовательно, максимальная толщина слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром 409 мм. Наименьшая толщина слоя зерна перед прогревом 225 мм [7], когда внешний цилиндр и внутренний цилиндр во втором положении. В процессе сушки объём зерна уменьшается, следовательно, уменьшается наименьшая толщина слоя зерна в пространстве между внешним цилиндром и внутренним цилиндром. Скорость прохождения потока агента сушки через отверстия во внешнем цилиндре будет зависеть от наименьшей толщины слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром (рис. 2).

Общепринято [11], что сопротивление среды пропорционально квадрату скорости. Отсюда скорость потока воздуха через отверстия внутреннего цилиндра должна быть пропорциональна корню квадратному из сопротивления среды. Но сопротивление среды будет иметь сложную зависимость от толщины слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром и других факторов. Там, где толщина слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром 409 мм, примем условно скорость потока воздуха через отверстия внутреннего цилиндра равной 1.

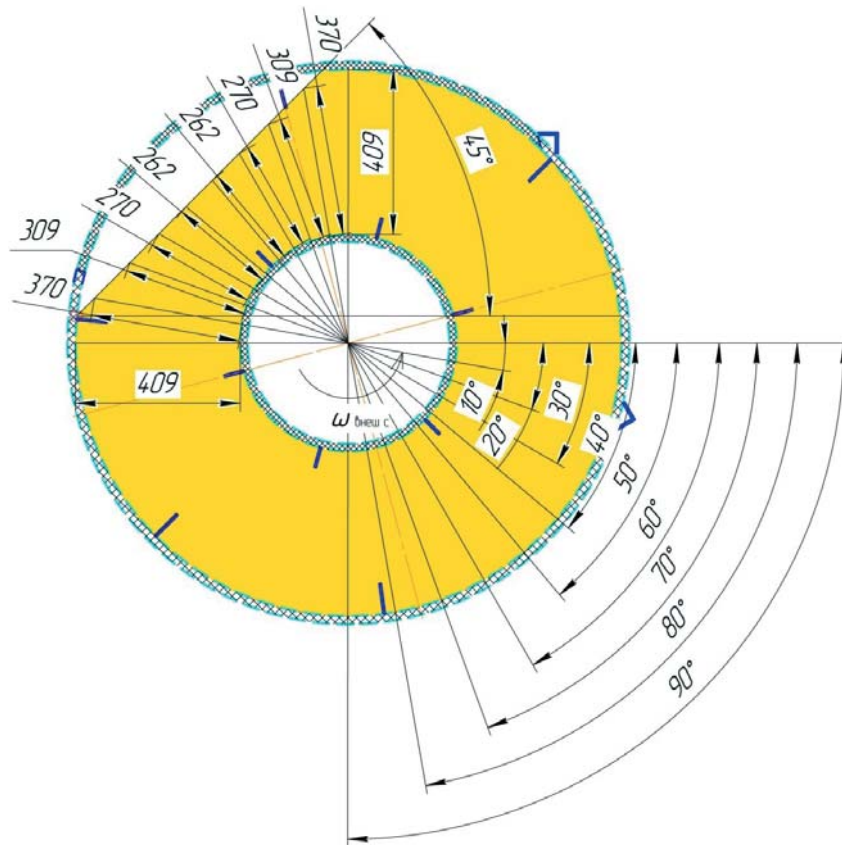


Рисунок 2 – К определению толщины слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром

**Результаты.** Расчёт скорости потока воздуха или агента сушки через отверстия внутреннего цилиндра представлен в таблице 1.

Зависимости скорости потока воздуха через отверстия внутреннего цилиндра от толщины слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром показаны на рисунке 3 в двух вариантах:

а) скорость потока воздуха через отверстия внутреннего цилиндра обратно пропорциональна

корню квадратному от толщины слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром;

б) скорость потока воздуха через отверстия внутреннего цилиндра обратно пропорциональна толщине слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром.

Фактическая скорость потока воздуха в зерне зависит от многих факторов. Она будет находиться между кривыми, показанными на рисунке 3.

Таблица 1 – Зависимость скорости потока воздуха от толщины слоя зерна после загрузки

Угол, град	Толщина слоя зерна, мм	Величина, обратная толщине, 1/мм	Скорость потока воздуха (вариант а), м/с	Скорость потока воздуха (вариант б), м/с
0	409	0,002445	1	1
10	370	0,002703	1,105405	1,051
20	309	0,003236	1,323625	1,15
30	270	0,003704	1,514815	1,23
40	262	0,003817	1,561069	1,25
45	255	0,003922	1,603922	1,265
50	262	0,003817	1,561069	1,25
60	270	0,003704	1,514815	1,23
70	309	0,003236	1,323625	1,15
80	370	0,002703	1,105405	1,051
90	409	0,002445	1	1

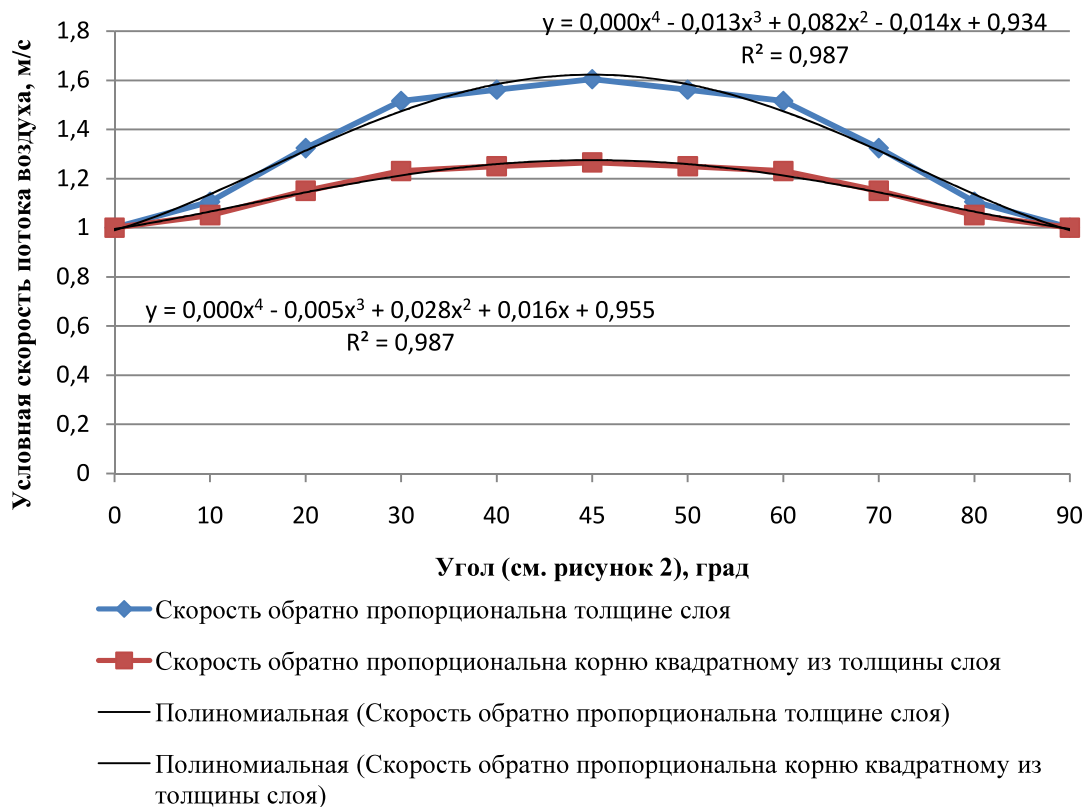


Рисунок 3 – Зависимости скорости потока воздуха через отверстия внутреннего цилиндра от толщины слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром

### Выводы.

1. Максимальная толщина слоя зерна между внешним цилиндром и внутренним цилиндром желательна, но ограничена конструктивной компоновкой агрегата и требованием неотпотевания зерна при его сушке, поэтому диаметры внешних цилиндров и внутренних цилиндров получены, исходя из этих требований. Максимальная совокупная площадь отверстий внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра, при их определённом диаметре, ограничена требованием прочности конструкции.

2. При ограниченных размерах и количестве отверстий внутреннего цилиндра эффективность сушки зависит от скорости потока агента сушки через эти отверстия, которая должна быть максимальной, но меньше критической. Полученная совокупная площадь отверстий внутреннего цилиндра и заданная критическая скорость потока воздуха или агента сушки позволит определить объём потока подогретого воздуха в секунду, создаваемого вентилятором предварительной продувки, и потока агента сушки, создаваемого теплопроизводящим агрегатом.

### Список источников

1. Голубкович А. В., Павлов С. А., Марин Р. А. [и др.] Сушка зерна с использованием топок на твердом топливе // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 6. С. 9–15. ISSN 0321-4443.
2. Елизаров В. П., Павлов С. А., Марин Р. А. [и др.] Сушка зерна с переменным теплоподводом в колонковой зерносушилке // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 12. С. 24–25. ISSN 0321-4443.
3. Цугленок В. Н., Манасян С. К., Конусов Н. Н. Функциональное описание процесса сушки зерна // Вестник КрасГАУ. 2005. № 8. С. 217–221. ISSN 1819-4036.
4. Алиакберов И. И., Галиуллин Ш. Р. К тепловому расчету зерносушилок барабанного типа // Вестник Казанского аграрного университета. 2009. Т. 4, № 4 (14). С. 144–149. ISSN 2073-0462.
5. Алтухова Т. А., Алтухов С. В., Шуханов С. Н. Модернизация сушилки зернистых материалов // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 2. С. 149–153. DOI 10.17816/0321-4443-100577.
6. Пат. 2631586 Российская Федерация, МПК F26B 15/04 (2006.01), F26B 20/00 (2006.01) Полуавтоматическая роторная сушилка / В. А. Николаев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия». № 2016123868; заявл. 15.06.2016; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 27. 2 с.



7. Николаев В. А. Расчёт загрузки зерна элементами универсальной полуавтоматической роторной сушилки // Вестник АПК Верхневожья. 2022. № 3 (59). С. 88–94. DOI 10.35694/YARCX.2022.59.3.012.
8. Николаев В. А. Выгрузка зерна из универсальной полуавтоматической роторной сушилки // Вестник АПК Верхневожья. 2022. № 4 (60). С. 100–105. DOI 10.35694/YARCX.2022.60.4.012.
9. Николаев В.А. Время выгрузки и загрузки зерна в универсальную полуавтоматическую роторную сушилку // Вестник АПК Верхневожья. 2023. № 2 (62). С. 89–93. DOI 10.35694/YARCX.2023.62.2.014.
10. Николаев В. А. Необходимый момент для вращения внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра с зерном при его сушке в универсальной полуавтоматической роторной сушилке // Вестник АПК Верхневожья. 2023. № 3 (63). С. 91–97. DOI 10.35694/YARCX.2023.63.3.012.
11. Кленин Н. И., Киселев С. Н., Левшин А. Г. Сельскохозяйственные машины. М. : КолосС, 2008. 815 с. ISBN 978-5-9532-0455-2.

#### *References*

1. Golubkovich A. V., Pavlov S. A., Marin R. A. [i dr.] Sushka zerna s ispol'zovaniem topok na tverdom toplive // Traktory i sel'hozmashiny. 2017. № 6. S. 9–15. ISSN 0321-4443.
2. Elizarov V. P., Pavlov S. A., Marin R. A. [i dr.] Sushka zerna s peremennym teplopodvodom v kolonkovoj zernosushilke // Traktory i sel'hozmashiny. 2015. № 12. S. 24–25. ISSN 0321-4443.
3. Tsuglenok V. N., Manasyan S. K., Konusov N. N. Funkcional'noe opisaniye processa sushki zerna // Vestnik KrasGAU. 2005. № 8. S. 217–221. ISSN 1819-4036.
4. Aliakberov I. I., Galiullin Sh. R. K teplovomu raschetu zernosushilok barabannogo tipa // Vestnik Kazanskogo agrarnogo universiteta. 2009. T. 4, № 4 (14). S. 144–149. ISSN 2073-0462.
5. Altukhova T. A., Altukhov S. V., Shukhanov S. N. Modernizaciya sushilki zernistykh materialov // Traktory i sel'hozmashiny. 2022. T. 89, № 2. S. 149–153. DOI 10.17816/0321-4443-100577.
6. Pat. 2631586 Rossijskaya Federaciya, MPK F26B 15/04 (2006.01), F26B 20/00 (2006.01) Poluavtomaticheskaya rotornaya sushilka / V. A. Nikolaev ; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO «Yaroslavskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya». № 2016123868; zayavl. 15.06.2016; opubl. 25.09.2017, Byul. № 27. 2 s.
7. Nikolaev V. A. Raschyot zagruzki zerna elementami universal'noj poluavtomaticheskoy rotornoj sushilki // Vestnik APK Verhnevozh'ya. 2022. № 3 (59). S. 88–94. DOI 10.35694/YARCX.2022.59.3.012.
8. Nikolaev V. A. Vygruzka zerna iz universal'noj poluavtomaticheskoy rotornoj sushilki // Vestnik APK Verhnevozh'ya. 2022. № 4 (60). S. 100–105. DOI 10.35694/YARCX.2022.60.4.012.
9. Nikolaev V.A. Vremya vygruzki i zagruzki zerna v universal'nyyu poluavtomaticheskuyu rotornuyu sushilku // Vestnik APK Verhnevozh'ya. 2023. № 2 (62). S. 89–93. DOI 10.35694/YARCX.2023.62.2.014.
10. Nikolaev V. A. Neobhodimyy moment dlya vrashcheniya vneshnego cilindra i vnutrennego cilindra s zernom pri ego sushke v universal'noj poluavtomaticheskoy rotornoj sushilke // Vestnik APK Verhnevozh'ya. 2023. № 3 (63). S. 91–97. DOI 10.35694/YARCX.2023.63.3.012.
11. Klenin N. I., Kiselev S. N., Levshin A. G. Sel'skohozyajstvennyye mashiny. M. : KolosS, 2008. 815 s. ISBN 978-5-9532-0455-2.

#### *Сведения об авторе*

**Владимир Анатольевич Николаев** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных и дорожных машин, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет», spin-код: 8865-0397.

#### *Information about the author*

**Vladimir A. Nikolaev** – Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Construction and Road Machines, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Technical University", spin-code: 8865-0397.