

СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА ОБЖАРИВАНИЕ ЗЕРНА В УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА

Сутягин Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Агеев Пётр Сергеевич, аспирант кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Павлушин Андрей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, дом 1; тел.: 89279842587; e-mail: sergeysut@mail.ru.

Ключевые слова: обжаривание зерна, подвод теплоты, электрический нагреватель, затраты энергии, шнековый транспортёр.

В статье рассмотрен процесс обжарки зерна, которое используют как компонент комбикорма для животных в свиноводческих хозяйствах и других хозяйствах, занятых животноводством. В настоящее время более 50 % комбикормов может включать обжаренное зерно, так как оно является незаменимым по питательной ценности и позволяет повысить прирост массы животных до 30 %. В результате анализа выявлено, что для обжаривания зерна, используемого в качестве компонента комбикорма, практически полностью отсутствуют современные установки, а известны лишь технические средства, предназначенные для обжаривания зёрен кофе, арахиса, подсолнечника и других сыпучих пищевых продуктов. Поэтому для обжаривания зерна нами предложена установка непрерывного типа с электронагревом зерна контактным способом от шнекового транспортёра. В статье приведены основные особенности предложенной конструкции установки, описан принцип ее работы и особенности движения частицы зерна при нагреве. Получена теоретическая формула для определения пропускной способности установки, с использованием которой создана её физическая модель. Разработанную физическую модель установки непрерывного типа с электронагревом зерна исследовали в лабораторных условиях. В результате исследований были получены оптимальные значения независимых факторов - температуры шнекового транспортёра и времени обжарки зерна, при которых удельные затраты энергии минимальны - 76,2 Дж/(кг·°C), а разработанная установка позволяет за 1 час качественно обжарить 28 кг зерна.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
и Ульяновской области, № 18-48-730039**

Введение

В настоящее время в аграрных предприятиях, занятых животноводством, для кормления сельскохозяйственных животных используют комбинированные корма, основным компонентом которых является обжаренное зерно различных культур [1, 2]. Так, в свиноводческих хозяйствах доля обжаренного зерна в комбикорме может составлять 50...70 % в зависимости от рецепта его приготовления [3, 4]. При обжаривании в зерне происходит расщепление крахмала на декстрины, благодаря этому улучшаются вкусовые качества комбикорма, повышается его питательная ценность, а также у животных улучшается перевариваемость комбикорма [5, 6]. Использование обжаренного зерна в качестве корма для поросят обеспечивает прирост их массы до 30 %. И наоборот, если использовать не обжаренное зерно, то до 42 % таких комбикормов может быть заражено микотоксинами, что снижает прирост массы поросят до 50 %, а в отдельных случаях вызывает их гибель.

В настоящее время в нашей стране отсутствует серийный выпуск установок для обжаривания зерна. Однако в пищевой промышленности используют технических средства, которые предназначены для обжаривания зёрен кофе, арахиса, подсолнечника и других сыпучих продуктов, например, установки ПСЖ-ГЗ0Б-МО, ПСЖ-18БД, VM-20 (ростр) и др. В результате анализа конструкций существующих установок для обжаривания сыпучих продуктов выявлено, что известные установки рассчитаны на пропускную способность свыше 300 кг/ч. Применение таких средств механизации для обжарки небольших партий зерна приводит к большим затратам материальных ресурсов, что снижает уровень рентабельности производства в 1,5...2 раза. Использование, например, VM-20 (ростр) с пропускной способностью до 300 кг зерна в час приводит к повышенным удельным затратам энергии - свыше 150 Дж/(кг·°C).

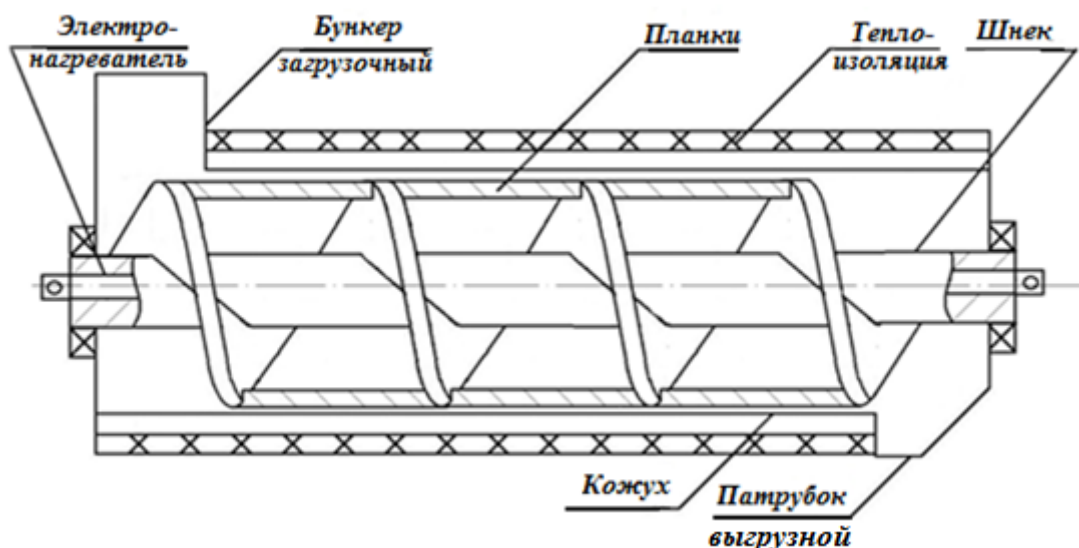


Рис. 1 – Установка с модернизированным шнековым транспортером

Поэтому задача разработки новых технических средств, способных с заданной пропускной способностью качественно обжарить зерно и минимизировать при этом удельные затраты энергии, является актуальной и важной.

Объекты и методы исследований

Для улучшения качества обжаривания зерна и минимизации удельных затрат энергии на это процесс нами предложена установка с модернизированным шнековым транспортером (рис.1) [7, 8, 9].

Предложенная установка включает в себя кожух круглого сечения со слоем теплоизоляции, бункер для загрузки зерна и выгрузной патрубком, модернизированный шнековый транспортер, вращающийся от электродвигателя, а также электронагреватель. Витки шнека соединены планками, которые установлены параллельно оси шнека и направлены от торца витков шнека к его валу. Планки размещены через равные углы относительно оси шнека. Вал шнека выполнен пустотелым. Внутри вала шнека установлен электронагреватель.

Установка работает следующим образом. Подключают нагреватель к электрической сети через терморегулятор и включают привод шнекового транспортера. После того, как шнек с планками нагреются до требуемой температуры, включают подачу зерна в загрузочный бункер. Витки шнекового транспортера захватывают зерно у загрузочного бункера и проталкивают его в сторону выгрузного окна. При этом зерно контактирует с нагретым валом шнека, его витками, планками и, в свою очередь, нагревается. Нагретые планки, расположенные на витках

шнека, также захватывают зерно и смещают его вдоль окружности кожуха к верхней его части. Когда планки поворачиваются до вертикального положения, зерно с них сыпается по виткам и валу шнека в нижнюю часть кожуха. При этом зерно постоянно вращается вокруг своей оси, контактирует с нагретым шнековым транспортером, его планками, равномерно нагревается и обжаривается. Затем шнек выталкивает обжаренное зерно через выгрузной патрубок.

Пропускную способность предложенной установки Q , кг/с определяют как отношение рабочего объема установки V_{po} , м³ и насыпной плотности зерна ρ_n , кг/м³, ко времени его обжарки t , с [10].

$$V_{po} = kV_k - V_{шт} \quad (1)$$

где: k – коэффициент заполнения кожуха установки, который определяют как отношение объема зерна V_z , м³, перемещающий шнековый транспортер, к максимальному объему зерна V_{max} , м³, который может вместить кожух установки, м³; V_k – внутренний объем кожуха установки, м³; $V_{шт}$ – объем шнекового транспортера, м³;

$$V_k = 0,785D_k^2L_k \quad (2)$$

где: D_k – диаметр кожуха предложенной установки для обжаривания зерна, м; L_k – длина части кожуха установки, по которой шнековый транспортер перемещает зерно, м.

$$V_{шт} = 0,25\pi(d_n^2 - d_b^2)(l_b - a) + nbh_{п.г} \quad (3)$$

где: d_n – максимальный диаметр витка шнекового транспортера, м; d_b – диаметр пустотелого вала шнекового транспортера, м;

l_b – расстояние между витками шнекового транспортёра, м; a – толщина витка шнекового транспортёра, м; n – количество планок; b – толщина планок, м; h_n – высота планок, м; l_n – длина планок, м.

Тогда, с учетом уравнений (1 - 3) пропускная способность предложенной установки для обжаривания зерна

$$Q = \rho_n (0,785kD_k^2 L_k - 0,25\pi(d_n^2 - d_b^2)(l_b - a) + nbh_n l_n) / t. \quad (4)$$

С учётом уравнения (4) была изготовлена лабораторная установка непрерывного типа для обжаривания зерна (рис. 2).

Разработанную установку исследовали в режиме обжарки зерна ячменя в соответствии с принятой программой (таблица).

Таблица
Программа исследований разработанной установки в лабораторных условиях

Мероприятия	Контролируемые параметры	Результат исследования
Определение размерно-массовых характеристик зерна	Длина, ширина, толщина зерна, масса 1000 зерен	Статистические характеристики измерения размеров зерна
Определение физико-механических свойств зерна	Относительная влажность, угол откоса зерновой массы, коэффициенты внутреннего и статического трения	Статистические характеристики измерения физико-механических свойств зерна
Исследование процесса обжарки зерна в разработанной установке	Средняя температура шнека, время обжарки зерна, массовая доля декстринов и жиров в зерне, удельные затраты энергии	Массовая доля жиров и декстринов после обжарки зерна, оптимальные значения независимых факторов, удельные затраты энергии

В качестве критерия оптимизации выбрали удельные затраты энергии $q_{уд}$, Дж/(кг·°C), для определения которых использовали формулу:

$$q_{уд} = \sum N / (Q(t_b - t_n)), \quad (5)$$

где: $\sum N$ – суммарная мощность, требуемая на привод шнекового транспортёра и затрачиваемая на электронагрев, Дж/с; t_n – температура зерна до обжарки, °C; t_b – температура зерна после обжарки, °C.

В качестве независимых факторов выбрали температуру шнекового транспортёра t , °C, и время обжарки зерна, $t_{об}$, с, так как в результате поисковых исследований выявлено, что эти параметры оказывают наибольшее влияние на критерий оптимизации [11].

Пределы варьирования независимых факторов приняли следующие: температуру шнекового транспортёра изменяли от 190 °C до 230 °C с шагом 5 °C, время обжарки зерна меняли от 93 с до 287 с с шагом в 24 с.

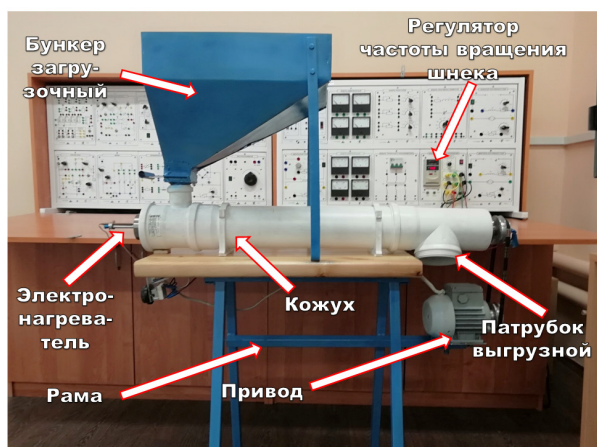
Результаты исследований

После выполненного двухфакторного эксперимента и обработки результатов эксперимента по обжарке зерна в разработанной установке получили уравнение регрессии [12, 13, 14, 15]:

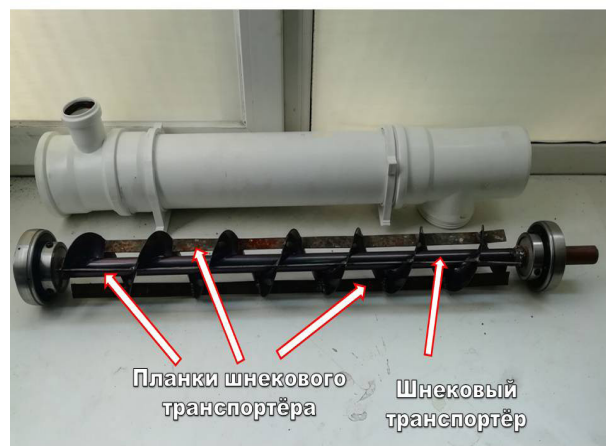
$$q_{уд} = 899,4 - 8,03t - 0,48t_{об} + 0,0001t_{об}^2 + 0,0019tt_{об} + 0,02t^2. \quad (6)$$

Для уравнения (6) определили корреляционное отношение r , характеризующее тесноту связи между выбранными факторами, значение которого составило 0,965.

В графическом виде характер влияния t и $t_{об}$ на $q_{уд}$ представлен на рисунке 3.



а)



б)

Рис. 2 - Лабораторная установка для обжаривания зерна
где: а) общий вид; б) модернизированный шнековый транспортёр

Затем решали уравнение (6) методом выявления значений из матриц взаимной корреляции. В результате получили, что при температуре шнека 200 °С и времени обжарки зерна 220 с $q_{уд}$ минимальны и составляют - 76,2 Дж/(кг·°С).

Далее определяли массовую долю жиров по ГОСТу 29033-91 и массовую долю декстринов по ГОСТу 29177-91. Таким образом установлено, что после обжарки ячменя в разработанной установке в зерне массовая доля жиров составила 7,5 %, а массовая доля декстринов – 25,5 %, что соответствует зоотехническим требованиям для обжаренного зерна, включаемого в состав комбинированных кормов. Пропускная способность разработанной установки непрерывного типа при указанных режимах составила 28 кг/ч, что вполне достаточно, например, для небольших свиноводческих хозяйств с поголовьем молодняка до 1000 шт.

Выводы

В результате исследований получены оптимальные режимные параметры разработанной установки непрерывного типа с электронагревом зерна: температура шнекового транспортёра $t = 200$ °С и время обжарки зерна $t_{об} = 220$ с. При этом разработанная установка позволяет качественно обжарить зерно, массовая доля жиров в зерне после обжарки составляет 7,5 %, а массовая доля декстринов – 25,5 %. Минимальные удельные затраты энергии на обжарку зерна составляют 76,2 Дж/(кг·°С) при пропускной способности разработанной установки 28 кг/ч.

Библиографический список

1. Бочкарёв, Е. А. Технология переработки продукции растениеводства / Е. А. Бочкарёв. – Самара, 2003. – 203 с. - ISBN 5-88575-090-4
2. Антонов, Н. М. Тепловая обработка зерна ячменя / Н. М. Антонов, Е. И. Макевнина, И. А. Коробов // Сельский механизатор. – 2012. – № 8. – С. 26.
3. Производство комбикормов в условиях личных подсобных и фермерских хозяйств / И. Н. Краснов, В. М. Филин, А. Н. Глобин, Е. А. Ладыгин. - Саратов, 2017. - 226 с. - ISBN 978-5-906172-17-4.
4. Техника и технологии в животноводстве / В. И. Трухачев, И. В. Атанов, И. В. Капустин, Д. И. Грицай. - Санкт-Петербург: Лань, 2016. - 380 с. - ISBN 978-5-8114-2224-1.
5. Тепловая обработка зерна при подготовке комбикорма для поросят / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, Г. В. Карпенко, С. А. Сутягин // Вест-

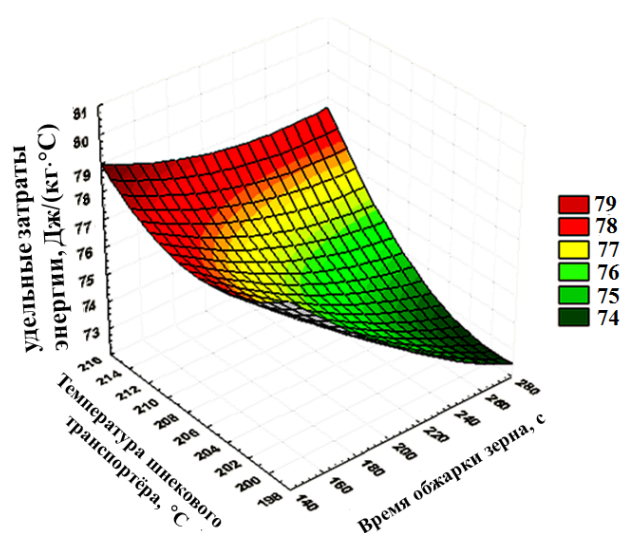


Рис. 3 – Зависимость удельных затрат энергии на обжаривание зерна ячменя от температуры шнекового транспортёра и времени обжаривания

ник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. - 2012. - № 3 (7). - С. 102 - 107.

6. Vargas, W. L. Heat conduction in granular materials / W. L. Vargas, J. J. McCarthy // AIChE Journal. – 2001. – № 47. - P. 1052 - 1059.

7. Патент № 186448 Российская Федерация, МПК А23В 9/08. Устройство для сушки зерна: № 2018120024 : заявл. 30.05.2018 : опубл. 21.01.19 / Курдюмов В. И., Павлушин А. А., Сутягин С. А., Агеев П. С., Белянин С. А. - Заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО «Ульяновский ГАУ». – 5 с.

8. Патент № 186434 Российская Федерация, МПК F26В 17/20. Устройство для сушки зерна: № 2018119811 : заявл. 29.05.2018 : опубл. 21.01.19 / Курдюмов В. И., Павлушин А. А., Сутягин С. А., Агеев П. С., Белянин С. А. - Заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО «Ульяновский ГАУ». – 5 с.

9. Патент № 184954 Российская Федерация, МПК F26В 17/20. Устройство для сушки зерна: № 2018119803: заявл. 29.05.2018 : опубл. 15.11.18 / Курдюмов В. И., Павлушин А. А., Сутягин С. А., Агеев П. С., Белянин С.А. - Заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО «Ульяновский ГАУ». – 5 с.

10. Керженцев, В. А. Численный расчет и анализ параметров шнековых конвейеров / Н. В. Перова, А. Н. Бредихина, Н. С. Печоркина // Актуальные проблемы в машиностроении. - 2015. - № 2. - С. 232 – 238.

11. Сагдеев, Д. И. Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента / Д. И. Сагдеев. - Казань: КНИТУ, 2016. - 324 с. - ISBN 978-5-7882-2010-9.

12. Халафян, А. А. Статистический анализ данных. STATISTIKA 6.0. / А. А. Халафян. - Москва, 2007. - 512 с. - ISBN: 978-5-9518-0215-6.

13. Сафин, Р. Г. Основы научных исследований. Организация и планирование эксперимента / Р. Г. Сафин, А. И. Иванов, Н. Ф. Тимербаев. - Казань: КНИТУ, 2013. - 154 с. - ISBN: 978-5-7882-1412-2.

14. Hampel, N. Continuous modeling of superheated steam drying of single rice grains / N. Hampel, K. H. Le, A. Kharaghani, E. Tsotsas // *Drying Technology*, 2019. - № 37 (12). - P. 1583 - 1596.

15. Tsotsas, E. Modeling of contact dryers / E. Tsotsas, M. Kwapinska, G. Saage // *Drying Technology*. - 2007. - № 25:1. - P. 1377-1391.

УДК 631.563.2

REDUCTION OF ENERGY UNIT COSTS FOR GRAIN ROASTING IN AN INSTALLATION OF CONTINUOUS TYPE

Sutyagin S.A., Ageev P.S., Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A.
FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University

432017, Ulyanovsk, Novyi Venets boulevard, building 1; tel.: 89279842587; e-mail: sergeysut@mail.ru.

Key words: grain roasting, heat supply, electric heater, energy consumption, screw conveyor.

The article discusses the process of roasting of grain which is used as a component of animal feed in pig farms and other farms engaged in animal breeding. Currently, more than 50% of compound feeds may include roasted grain, since it is irreplaceable in nutritional value and can increase the weight gain of animals up to 30%. As a result of the analysis, it was found that there are almost no modern plants for roasting of grain which is used as a component of compound feed and only technical means for roasting coffee beans, peanuts, sunflowers and other bulk food products are known. Therefore, we proposed an installation of a continuous type for grain roasting with electric heating of grain by a contact method from a screw conveyor. The article describes the main features of the proposed design of the installation, describes the principle of its operation and the features of grain particle movement during heating. A theoretical formula has been obtained for determining the installation throughput, which was used for creating its physical model. The developed physical model of a continuous type installation with electric heating of grain was studied in laboratory conditions. As a result of the research, appropriate values of independent factors were obtained - the temperature of the screw conveyor and the time of grain roasting, at which the specific energy consumption is minimal - 76.2 J / (kg °C), and the developed installation allows high-quality roasting of 28 kg of grain per 1 hour.

Bibliography

1. Bochkarev, E. A. *Technology of crop production* / E. A. Bochkarev. - Samara, 2003. -- 203 p. - ISBN 5-88575-090-4
2. Antonov, N. M. *Heat treatment of barley grain* / N. M. Antonov, E. I. Makevina, I. A. Korobov // *Rural machine operator*. - 2012. - No. 8. - P. 26.
3. *Production of animal feed in the conditions of subsidiary individual holdings and farms* / I.N. Krasnov, V. M. Filin, A. N. Globin, E. A. Ladygin. - Saratov, 2017. -- 226 p. - ISBN 978-5-906172-17-4.
4. *Machinery and technology in animal breeding* / V. I. Trukhachev, I. V. Atanov, I. V. Kapustin, D. I. Gritsay. - St. Petersburg: Lan, 2016. -- 380 p. - ISBN 978-5-8114-2224-1.
5. *Grain heat treatment when preparing compound feed for piglets* / V. I. Kurdyumov, A. A. Pavlushin, G. V. Karpenko, S. A. Sutyagin // *Vestnik of the All-Russian scientific research institute of animal breeding mechanization*. - 2012. - No. 3 (7). - P. 102 - 107.
6. Vargas, W. L. *Heat conduction in granular materials* / W. L. Vargas, J. J. McCarthy // *AIChE Journal*. - 2001. - № 47. - P. 1052 - 1059.
7. Patent No. 186448 Russian Federation, IPC A23B 9/08. Device for grain drying: No. 2018120024: appl. 30.05.2018: publ. 21.01.19 Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A., Ageev P.S., Belyanin S.A. - Applicant and patent holder Ulyanovsk State Agrarian University. - 5 p.
8. Patent No. 186434 Russian Federation, IPC F26B 17/20. Device for grain drying: No. 2018119811: appl. 29.05.2018: publ. 21.01.19 Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A., Ageev P.S., Belyanin S.A. - Applicant and patent holder Ulyanovsk State Agrarian University. - 5 p.
9. Patent No. 184954 Russian Federation, IPC F26B 17/20. Device for grain drying: No. 2018119803: appl. 29.05.2018: publ. 15.11.18 Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A., Ageev P.S., Belyanin S.A. - Applicant and patent holder FSBEI HE "Ulyanovsk SAU". - 5 p.
10. Kerzhentsev, V. A. *Numerical calculation and analysis of screw conveyor parameters* / N. V. Perova, A. N. Bredikhina, N. S. Pechorkina // *Current problems in mechanical engineering*. - 2015. - No. 2. - P. 232 - 238.
11. Sagdeev, D. I. *Fundamentals of scientific research, organization and planning of the experiment* / D. I. Sagdeev. - Kazan: Kazan National Research Technological University, 2016. -- 324 p. - ISBN 978-5-7882-2010-9.
12. Khalafyan, A. A. *Statistical analysis of data. STATISTIKA 6.0.* / A.A. Khalafyan. - Moscow, 2007. -- 512 p. - ISBN: 978-5-9518-0215-6.
13. Safin, R. G. *Fundamentals of scientific research. Organization and planning of the experiment* / R. G. Safin, A. I. Ivanov, N. F. Timerbaev. - Kazan: Kazan National Research Technological University, 2013. -- 154 p. - ISBN: 978-5-7882-1412-2.
14. Hampel, N. *Continuous modeling of superheated steam drying of single rice grains* / N. Hampel, K. H. Le, A. Kharaghani, E. Tsotsas // *Drying Technology*, 2019. - № 37 (12). - P. 1583 - 1596.
15. Tsotsas, E. *Modeling of contact dryers* / E. Tsotsas, M. Kwapinska, G. Saage // *Drying Technology*. - 2007. - № 25:1. - P. 1377-1391.