Тип статьи: научная
УДК 631:362.7
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-5-78-85

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВКИ С ИНФРАКРАСНЫМ НАГРЕВОМ ЗЕРНА

Сергей Алексеевич Сутягин [1], Пётр Сергеевич Агеев [2], Галина Владимировна Карпенко [3], Андрей Александрович Павлушин [4], Владимир Иванович Курдюмов [5]
[1,2,3,4,5]*Ульяновский государственный аграрный университет, г. Ульяновск, Россия*
[1] sergeysut@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6477-3817, [2] ageev_petr@mail.ru
[3] karpenko.galina@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0214-4193
[4] andrejpavlu@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7678-2876
[5] bgdie@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1603-1779

Реферат. *В настоящее время тепловые процессы послеуборочной обработки зерна, предназначенные для улучшения его качества, являются высокоэнергозатратными и дорогостоящими. Разработка новых средств механизации с инфракрасным нагревом зерна, способных снизить удельные энергозатраты на процессы тепловой обработки, а также обеспечить ресурсосбережение, является актуальной и важной научно - технической проблемой. Для сокращения затрат на сушку, обеззараживание и микронизацию зерна, а также улучшения качества его тепловой обработки нами разработан экспериментальный образец установки с инфракрасным нагревом. Исследование разработанной установки проводили в режиме сушки зерна. В качестве объекта исследования выбрали технологический процесс высушивания зерна пшеницы с исходной влажностью 18…19 %. В качестве параметра оптимизации приняли суммарные удельные затраты энергии на сушку зерна. В результате исследования разработанной установки с инфракрасным нагревом зерна определены рациональные значения выбранных факторов: время сушки зерна* $t_1 = 100^0C$*; температура, создаваемая инфракрасным нагревателем внутри кожуха установки* $t_{ин} = 65^0C$*. Далее провели серию экспериментов на разработанной установке на указанных выше режимах. В каждом эксперименте делали замеры температуры нагрева зерна, определяли процент снижения влажности зерна и пропускную способность установки, а также фиксировали суммарные удельные затраты энергии. Температура нагрева зерна находилась в пределах 37 - 38,5 ºС, при этом влажность зерна снижалась на 2,56 %. Разработанная установка обеспечивает требуемое качество сушки зерна, поддерживая пропускную способность около 800 кг/ч и минимальные суммарные удельные затраты энергии, которые составили 4342,3 кДж·ч/кг.*

Ключевые слова: *установка, инфракрасный нагрев, зерно, подвод теплоты, ленточный транспортёр, разделители слоя, сушка.*

STUDY OF AN INSTALLATION WITH INFRARED HEATING OF GRAIN

Sergey Sutyagin [1], Pyotr Ageev [2], Galina Karpenko [3], Andrey Pavlushin [4], Vladimir Kurdyumov [5]
[1,2,3,4,5] *Ulyanovsk State Agrarian University, Ulyanovsk, Russia*
[1] sergeysut@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6477-3817, [2] ageev_petr@mail.ru
[3] karpenko.galina@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0214-4193
[4] andrejpavlu@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7678-2876
[5] bgdie@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1603-1779

Abstract. *Thermal post-harvest processing of grain currently intended to improve its quality is highly energy-intensive and expensive. The development of new means of mechanization with infrared heating of grain, capable of reducing specific energy costs for heat treatment processes, as well as ensuring resource conservation, is a pressing and important scientific and technical problem. To reduce the cost of drying, disinfection and micronization of grain, as well as improve the quality of its heat*

treatment, we have developed an experimental model of an installation with infrared heating. The study of the developed installation was carried out in grain drying mode. The technological process of drying wheat grain with an initial moisture content of 18...19% was chosen as the object of study. The total specific energy consumption for grain drying was taken as an optimization parameter. The rational values of the selected factors were determined as a result of a study of the developed installation with infrared heating of grain: grain drying time t1 = 1000C; the temperature created by the infrared heater inside the installation casing is tin = 650C. Next, a series of experiments was carried out on the developed installation in the above modes. In each experiment, measurements were taken of the heating temperature of the grain, the percentage of reduction in grain moisture content and the throughput of the installation were determined, and the total specific energy consumption was recorded. The heating temperature of the grain was in the range of 37 - 38.5 ºC, while the moisture content of the grain decreased by 2.56%. The developed installation provides the required quality of grain drying, maintaining a throughput of about 800 kg/h and a minimum total specific energy consumption, which amounted to 4342.3 kJ h/kg.

Keywords: *installation, infrared heating, grain, heat supply, conveyor belt, layer separators, drying.*

Для цитирования: Сутягин С.А., Агеев П.С., Карпенко Г.В., Павлущин А.А., Курдюмов В.И., Исследование установки с инфракрасным нагревом свинца // Наука в Центральной России. 2023. Т. 65, № 5. С. 78-85. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-5-78-85.

For citation: Sutyagin S.A., Ageev P.S., Karpenko G.V., Pavluschin A.A., Kurdyumov V.I., Study of an installation with infrared heating of lead. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 65(5): 78-85. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-5-78-85.

Введение. В настоящее время тепловое воздействие на зерно применяют во многих технологических процессах его переработки. Процессы сушки, обеззараживания, микронизации зерна соответственно направлены на снижение его влажности до значения, соответствующего ГОСТу, на увеличение сроков его хранения путем уничтожение вредных насекомых и микрофлоры, а также на повышение качества и питательной ценности. Тепловую обработку зерна применяют для изменения технологических и обеспечения потребительских свойств – это улучшение вкуса, запаха, цвета и других показателей [1, 2, 3]. Способы тепловой обработки зерна и средства механизации для их осуществления разнообразны. Одним из направлений развития тепловой обработки зерна является разработка средств механизации с инфракрасным электронагревом.

Материалы и методы. Для сушки и обеззараживания зерна в сельском хозяйстве применяют установки с инфракрасным модулем нагрева продукта, к которым относят установки ИСЛ-1, установки серии Агрохит (рисунок 1), сушилку Трин-Микс-1200 и другие [7].

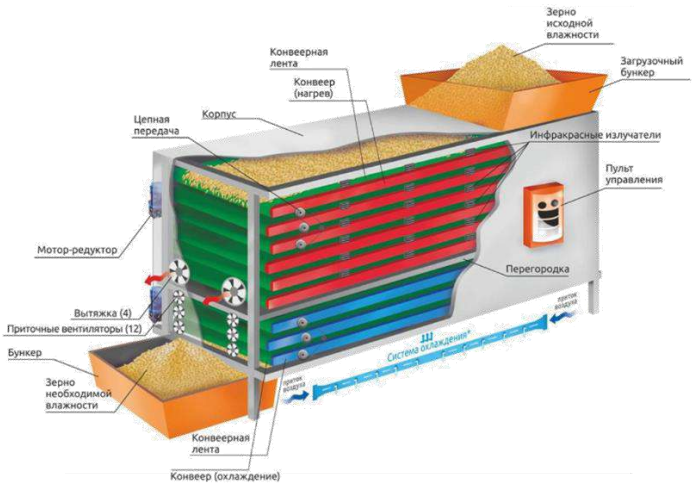

Рисунок 1 - Конвейерная зерносушилка Агрохит с инфракрасными излучателями

Пропускная способность таких установок при сушке зерна варьируется от 0,5 т/ч до 5 т/ч, но при работе в режиме обеззараживания зерна их пропускная способность не превышает 300 кг/ч.

Технические характеристики существующих установок с инфракрасным модулем нагрева зерна представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики существующих установок с инфракрасным модулем нагрева зерна

Марка установки	Параметры		
	Удельная металлоемкость, кг·ч/т	Удельная капиталоёмкость, тыс. руб.·ч/т	Удельные затраты энергии, кВт·ч/т
ИСЛ-1	800	2500	12
ИКСЗ	1600	1500	72
Агрохит	1800	4800	72
Трин-Микс-1200	1240	1290	54

Проанализировав приведенные в таблице 1 данные, можно отметить, что широко применяемые в настоящее время средства механизации тепловой обработки зерна имеют недостатки: высокую удельную металлоемкость, завышенную капиталоёмкость и большие удельные энергозатраты.

Поэтому разработка новых средств механизации с инфракрасным нагревом зерна, способных снизить удельные энергозатраты на процессы тепловой обработки, а также обеспечить ресурсосбережение, является актуальной и важной научно - технической проблемой. [3, 4, 5, 6].

Для решения указанной проблемы нами предложена установка с инфракрасным электронагревом зерна (рисунок 2).

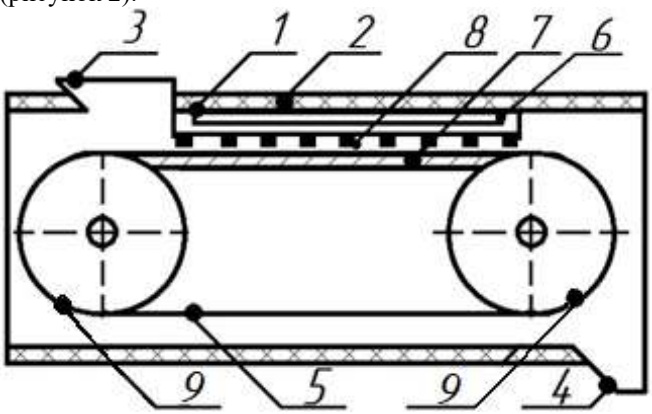

Рисунок 2 – Конструктивно-технологическая схема предложенной установки с инфракрасным нагревом зерна: 1 – кожух установки; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – бункер для загрузки зерна; 4 – лоток для выгрузки зерна; 5 – гибкая лента; 6 – инфракрасный нагреватель; 7 – пластина; 8 – разделители зернового слоя; 9 – барабаны

На рисунке 3 изображен вид сверху транспортирующего рабочего органа, представленного вращающейся на двух барабанах гибкой лентой, с разделителями зернового слоя.

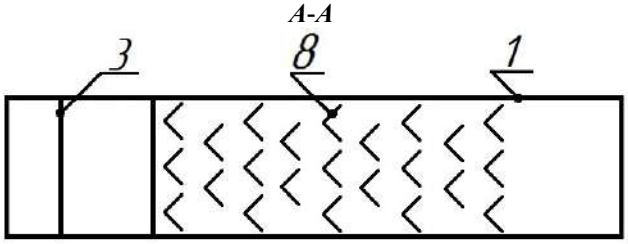

Рисунок 3 – Вид сверху транспортирующего рабочего органа

Предложенная установка для тепловой обработки зерна состоит из кожуха, внутренняя поверхность которого покрыта теплоизолирующим материалом. С одной стороны кожуха на верхней поверхности размещён бункер для загрузки зерна. С противоположной стороны кожуха в нижней его поверхности выполнен лоток для выгрузки зерна. Внутри кожуха горизонтально закреплена пластина, с противоположных сторон которой параллельно друг другу с возможностью вращения установлены два барабана, связанные между собой гибкой лентой. Верхняя ветвь гибкой ленты выполнена опирающейся на пластину. Над верхней ветвью гибкой ленты в шахматном порядке на минимальном расстоянии от нее установлены разделители зернового слоя. Разделители зернового слоя выполнены из двух прямоугольных пластин, установленных вертикально и соединенных между собой таким образом, что они образуют в плане острый угол. Разделители зернового слоя устанавливают так, чтобы их вершина острого угла была направлена противоположно направлению движения гибкой ленты.

Рассмотрим схему сил, действующих на единичную частицу зерна в направлении оси x при её соударении с разделителем зернового слоя (рисунок 4).

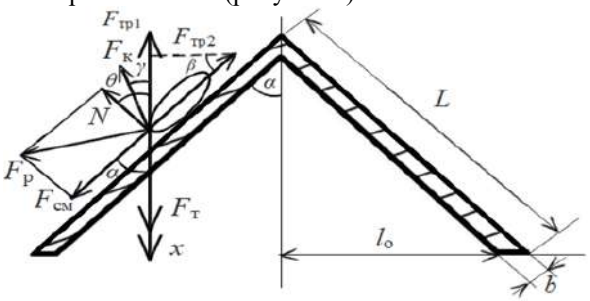

Рисунок 4 - Схема сил, действующих на частицу зерна при её соударении с разделителем зернового слоя: L – длина пластины, м; b – толщина пластины, м; $l_о$ – длина половины основания разделителя, м; $F_т$ - сила тяги рабочего органа, Н; $F_{тр1}$ – сила трения частицы о поверхность гибкой ленты, Н; $F_{см}$ - сила смещения частицы, Н; N - сила реакции пластины разделителя зернового слоя, при действии на неё рассматриваемой частицы, Н; $F_р$ - результирующая сила, Н; $F_{тр2}$ - сила трения частицы о поверхность разделителя зернового слоя, Н; $F_к$ - сила Кориолиса, Н; α - угол между осью x и силой $F_{см}$, град; β - угол между силой $F_{тр2}$ и нормалью к оси x, град; γ - угол между силой $F_к$ и осью x, град; θ – угол между силой $F_к$ и осью x

Направление оси x выберем совпадающим с направлением движения гибкой ленты транспортёра. Запишем сумму сил, действующих на частицу [9, 10, 11].

$$F_т + F_{см}\cos\alpha - F_{тр1} - N\cos\theta - F_{тр2}\sin\beta - F_к\cos\gamma = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) преобразуем и выразим из него силу $F_т$.

$$F_т = - ma_л\cos\theta + k_1N_1 + ma_ч\cos\alpha + k_2N_2\sin\beta + 2m\omega L\cos\gamma/t, \quad (2)$$

где: m – масса частицы, кг; $a_л$ – ускорение гибкой ленты, м/с^2; k_1 - коэффициент трения частицы о материал гибкой ленты; N_1 - реакция опоры при трении частицы о поверхность гибкой ленты, Н; $a_ч$ - ускорение частицы, движущейся вдоль поверхности гибкой ленты, м/с^2; k_2 - коэффициент трения частицы о разделитель зернового слоя; N_2 - реакция опоры при трении частицы о разделитель зернового слоя, Н; ω – угловая скорость вращения частицы вокруг своей оси, с$^{-1}$; t – время движения частицы по разделителю зернового слоя, с.

Из уравнения (2) вынесем массу частицы, в результате получим:

$$F_т = m(a_ч\cos\alpha - a_л\cos\theta + 2\omega L\cos\gamma/t) + k_1N_1 + k_2N_2\sin\beta. \quad (3)$$

Найдем силу тяги рабочего органа $F_т$ когда по поверхности разделителя зернового слоя движется количество частиц, равное $n_ч$, причём масса каждой частицы равна $m_{ср}$, кг.

Тогда:

$$F_т = n_ч m_{ср}(a_ч\cos\alpha - a_л\cos\theta + 2\omega L\cos\gamma/t) + k_1N_1 + k_2N_2\sin\beta + \Sigma F_{трч}. \quad (4)$$

где: $\Sigma F_{трч}$ – суммарная сила трения между частицами, Н.

За время нахождения зерна в установке каждая частица встречается с количеством разделителей $n_р$ зернового слоя.

Поэтому сила тяги рабочего органа $F_т$ будет равна:

$$F_т = n_р\,(n_ч m_{ср}(a_ч\cos\alpha - a_л\cos\theta + 2\omega L\cos\gamma/t) + k_1N_1 + k_2N_2\sin\beta + \Sigma F_{трч}) \quad (5)$$

Мощность, P, Вт, требуемую для непрерывного перемещения гибкой лентой зернового слоя через установку, можно определить по формуле (6):

$$P = F_т(n_р L + l_{рз})/t_1, \quad (6)$$

где $l_{рз}$ – расстояние между рядами разделителей зернового слоя, м; t_1 - время нахождения зерна в установке, с.

С учётом формулы (5) уравнение (6) примет вид:

$$P = n_р\,n_ч\,m_{ср}\,(a_ч\cos\alpha - a_л\cos\theta + 2\omega L\cos\gamma/t) + k_1N_1 + k_2N_2\sin\beta + \Sigma F_{трч})(n_р L + l_{рз})/t_1. \quad (7)$$

Пропускная способность предложенной установки Q, кг/ч, зависит от конструктивных параметров гибкой ленты, разделителей зернового слоя, а также от времени нахождения зерна в установке.

$$Q = 3600\gamma_з B_{гл} h_{рз}(n_р L + l_{рз})/t_1, \quad (8)$$

где: $\gamma_з$ - насыпная плотность зерна, кг/м^3; $B_{гл}$ – ширина гибкой ленты, м; $h_{рз}$ – высота разделителей зернового слоя, м.

С учётом уравнений (7) и (8), а также в соответствии с разработанной конструктивно-технологической схемой, создан экспериментальный образец установки с инфракрасным нагревом зерна (рисунок 5).

Рисунок 5 – Установка с инфракрасным нагревом зерна: 1 – рама установки; 2 – рабочая камера; 3 – привод гибкой ленты; 4 – регулятор температуры инфракрасного нагревателя; 5 – регулятор частоты вращения ведущего барабана рабочего органа

Результаты и их обсуждение. Исследование разработанной установки проводили в режиме сушки зерна. В качестве объекта исследования выбрали зерно пшеницы с исходной влажностью 18…19 %.

Сушку зерна в разработанной установки выполняли в соответствии с планом экспериментальных исследований (рисунок 6).

Рисунок 6 - План экспериментальных исследований разработанной установки с инфракрасным нагревом зерна

В качестве параметра оптимизации процесса сушки зерна выбраны суммарные удельные затраты энергии $\Sigma P_{экс}$, кДж·ч/кг, которые в ходе эксперимента определяли по формуле (9).

$$\Sigma P_{экс} = 3600(P + P_1)/Q_ф, \quad (9)$$

где: P_1 – мощность, потребляемая инфракрасным нагревателем, Вт; $Q_ф$ - фактическая пропускная способность установки, кг/ч.

При сушке зерна в разработанной установке с его инфракрасным нагревом наибольше влияние из действующих независимых факторов оказывают время сушки зерна t_1, с, и температура $t_{ин}$, ºС, создаваемая инфракрасным нагревателем внутри кожуха установки. В ходе экспериментальных исследований температуру $t_{ин}$ изменяли в диапазоне 40…80 ºС с шагом 5 ºС, а время сушки зерна изменяли в диапазоне 60…120 с с шагом 20 с. При этом определяли суммарные удельные затраты энергии, температуру нагрева зерна, а также процент снижения влажности зерна в каждом цикле эксперимента.

Результаты экспериментальных исследований обрабатывали, используя лицензированную программу Statistica 10. В ходе обработки полученных данных построен график (рисунок 7) и найдено уравнение (10), которые характеризуют влияние времени сушки зерна и температуры, создаваемой инфракрасным нагревателем, на суммарные удельные затраты энергии.

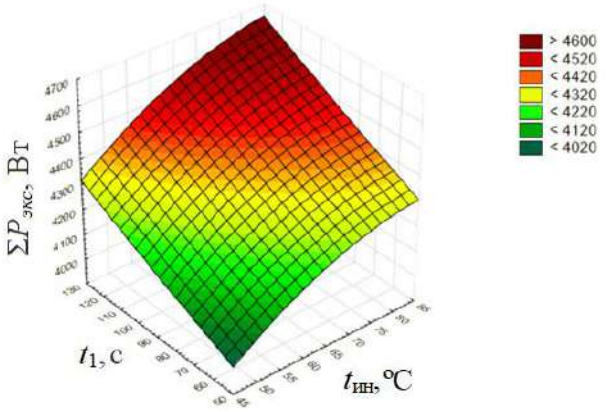

Рисунок 7 – Зависимость суммарных удельных затрат энергии от времени сушки зерна и температуры, создаваемой инфракрасным нагревателем внутри кожуха установки

$$\Sigma P_{экс} = 2949{,}52 + 26{,}44\, t_1 + 2{,}71\, t_{ин} - 0{,}15 t_1^2 + 0{,}013 t_{ин} t_1 - 0{,}0028 t_{ин}^2. \quad (10)$$

Решив уравнение (10), определили рациональные значения выбранных факторов. При этом время сушки зерна составило 100^0С, а температура, создаваемая инфракрасным нагревателем, равна 65^0С. Далее провели серию экспериментов на разработанной установке на указанных выше режимах. В каждом эксперименте делали замеры температуры нагрева зерна, определяли процент снижения влажности зерна и пропускную способность установки, а также фиксировали суммарные удельные затраты энергии. Температура нагрева зерна находилась в пределах 37…38,5 ºС, при этом влажности зерна снижалась на 2,56 %. Пропускная способность составила 800 кг/ч, а суммарные удельные затраты энергии, требуемые на сушку зерна в разработанной установке, составили 4342,3 кДж·ч/кг.

Заключение. В результате исследования разработанной установки с инфракрасным нагревом зерна определены рациональные значения выбранных независимых факторов процесса сушки зерна пшеницы: время сушки t_1 = 100 с, $t_{ин}$ = 65 ºС. При этом пропускная способность установки составляет 800 кг/ч, а суммарные удельные затраты энергии составили 4342,34 кДж·ч/кг. Качество сушки зерна удовлетворяло предъявляемым требованиям.

Сравнение разработанной установки для тепловой обработки зерна с серийно выпускаемыми средствами механизации показало, что экспериментальный образец имеет в 2,72 раза меньшую удельную металлоемкость, в 3,1 раза меньшую удельную капиталоёмкость, а также обеспечивает в 2,3 раза меньшие удельные затраты энергии на сушку зерна.

Список источников

1. Борхерт, Р. Техника инфракрасного нагрева / Р. Борхерт, В. Юбиц. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 278 с.

2. Гуляев, Г.А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна / Г.А. Гуляев. – М.: Агропромиздат, 1990. – 236 с.

3. Иванов, Б.Л. Пути снижения энергетических затрат при сушке зерна / Б.Л. Иванов, Б.Г. Зиганшин, И.Н. Сафиуллин // Развитие АПК и сельских территорий в условиях модернизации экономики: Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.э.н., профессора Н.С. Каткова. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. – С. 83-89.

4. Sutyagin, S.A., Features of heat treatment of grain in dryers of the contact type // E3S Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2019). 2019. P. 00045.

5. Converse H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin. Amer. Soc. Agr. Engrs., 2006. № 855. pp. 129-0133.

6. Pavlushin A.A., Research of a machine with a belt conveyor for drying grain // E3S Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2020). 2020. P. 01071.

7. Козлов, Д.Г. Инфракрасная сушка зерна и зернопродуктов / Д.Г. Козлов, Н.А. Савишин, А.В. Калинин // Энергетика и информационные технологии: Сборник научных трудов / Ответственный редактор О.А. Пустовая. Выпуск 10. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2017. – С. 80-86.

8. Устройство для сушки зерна: патент 96467 Рос. Федерация. № 2010105281/22; заявл. 15.02.2010; опубл. 10.08.2010 г., Бюл. № 22.

9. Устройство для сушки зерна: патент 92603 Рос. Федерация. № 2009140702/22; заявл. 03.11.2009; опубл. 27.03.2010 г., Бюл. № 9.

10. Устройство для сушки зерна: патент 96468 Рос. Федерация. № 2010105283/22; заявл. 15.02.2010; опубл. 10.08.2010г., Бюл. № 22.

11. Tsottsas E. Modeling of contact dryers // Drying Technology. 2007. 25:1, pp. 1377-1391.

References

1. Borkhert, R. Tekhnika infrakrasnogo nagreva / R. Borkhert, V. Yubits. – M.-L.: Gosenergoizdat, 1963. – 278 s.

2. Gulyayev, G.A. Avtomatizatsiya protsessov posleuborochnoy obrabotki i khraneniya zerna / G.A. Gulyayev. – M.: Agropromizdat, 1990. – 236 s.

3. Ivanov, B. L. Puti snizheniya energeticheskikh zatrat pri sushke zerna / B.L. Ivanov, B.G. Ziganshin, I.N. Safiullin // Razvitiye APK i sel'skikh territoriy v usloviyakh modernizatsii ekonomiki: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati d.t.n., professora N.S. Katkova. – Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2021. – S. 83-89.

4. Sutyagin, S., Features of heat treatment of grain in dryers of the contact type // E3S Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2019). 2019. P. 00045.

5. Converse H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin. Amer. Soc. Agr. Engrs., 2006. № 855. pp. 129-0133.

6. Pavlushin A.A. Research of a machine with a belt conveyor for drying grain // E3S Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2020). 2020. P. 01071.

7. Kozlov, D.G. Infrakrasnaya sushka zerna i zernoproduktov / D.G. Kozlov, N.A. Savishin, A.V. Kalinin // Energetika i informatsionnyye tekhnologii: Sbornik nauchnykh trudov / Otvetstvennyy redaktor O.A. Pustovaya. Tom Vypusk 10. – Blagoveshchensk: Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2017. – S. 80-86.

8. Ustroistvo dlya sushki zerna: patent 96467 Ros. Federatsiya. № 2010105281/22; zayavl. 15.02.2010; opubl. 10.08.2010 g., Byul. № 22.

9. Ustroistvo dlya sushki zerna: patent 92603 Ros. Federatsiya. № 2009140702/22; zayavl. 03.11.2009; opubl. 27.03.2010 g., Byul. № 9.

10. Ustroistvo dlya sushki zerna: patent 96468 Ros. Federatsiya. № 2010105283/22; zayavl. 15.02.2010; opubl. 10.08.2010g., Byul. № 22.

11. Tsottsas E. Modeling of contact dryers // Drying Technology. 2007. 25:1, pp. 1377-1391.

Информация об авторах

С. А. Сутягин – кандидат технических наук, доцент; П. С. Агеев – кандидат технических наук; Г.В. Карпенко - кандидат технических наук, доцент; А.А. Павлушин – доктор технических наук, профессор; В.И. Курдюмов - доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

S. Sutyagin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; P. Ageev – Candidate of Technical Sciences; G. Karpenko - candidate of technical sciences, associate professor; A. Pavlushin – Doctor of Technical Sciences, Professor; V. Kurdyumov - Doctor of Technical Sciences, Professor.

Вклад авторов все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: *all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication*.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 25.09.2023 Принята к публикации (Accepted): 22.10.2023