

УДК 631.365.22

DOI 10.18286/1816-4501-2022-1-6-11

ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ СУШКИ ЗЕРНА

Агеев Петр Сергеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Долгов Владимир Иванович, инженер

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.: 89050359200; e-mail: andrejpavlu@yandex.ru

Ключевые слова: тепловой баланс, контактный теплообмен, режимные параметры, температура греющей поверхности, влагообмен.

Целью проводимых исследований является выявление факторов, непосредственно оказывающих влияние на теплофизические характеристики разрабатываемых средств механизации для контактной сушки зерна. При системном анализе указанная цель достигается широким использованием моделирования, что дает возможность обосновать не только параметры оптимального режима процесса, но и выбрать наиболее целесообразный способ управления процессом сушки в производственных условиях. Условия передачи теплоты от греющей поверхности к зерну зависят от теплоты, отдаваемой греющей поверхностью сушильной камеры Wt ; коэффициента теплопередачи $Wt/(m^2 \cdot ^\circ C)$, температуры греющей поверхности и зерна на выходе из сушильной камеры $^\circ C$; площадь греющей поверхности, m^2 . Кроме того, при контактной теплопередаче задача нагрева зерна является одномерной ($t_{z2} = f(z, t)$), где z – расстояние от зерна до греющей поверхности, m ; t – время с момента начала сушки, s . Выявлено, что допустимая температура нагрева поверхности сушильной камеры, выполненной в виде цилиндра, с винтовым транспортирующим рабочим органом не должна превышать $61^\circ C$ для обеспечения температуры зерна на выходе из камеры $39^\circ C$. При использовании в сушильной камере ленточного транспортера и ее исполнения в форме прямоугольного параллелепипеда допустимая температура нагрева поверхности камеры составляет $69^\circ C$. При выполнении сушильной камеры в виде заключенной в короб ступенчатой поверхности с вибропобуждением движения зерна температуру нагрева этой поверхности без ущерба для качества высушенного зерна можно повысить до $129^\circ C$. Это также позволяет увеличить пропускную способность установки по сравнению с первым вариантом исполнения сушильной камеры вдвое: с $0,2$ т/ч до $0,4$ т/ч.

Исследование выполнено при финансировании Советом по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации в рамках научного проекта СП-870.2021.1 «Теоретические и экспериментальные исследования энергоэффективного процесса сушки сыпучих продуктов при осциллирующе-контактном подводе теплоты»

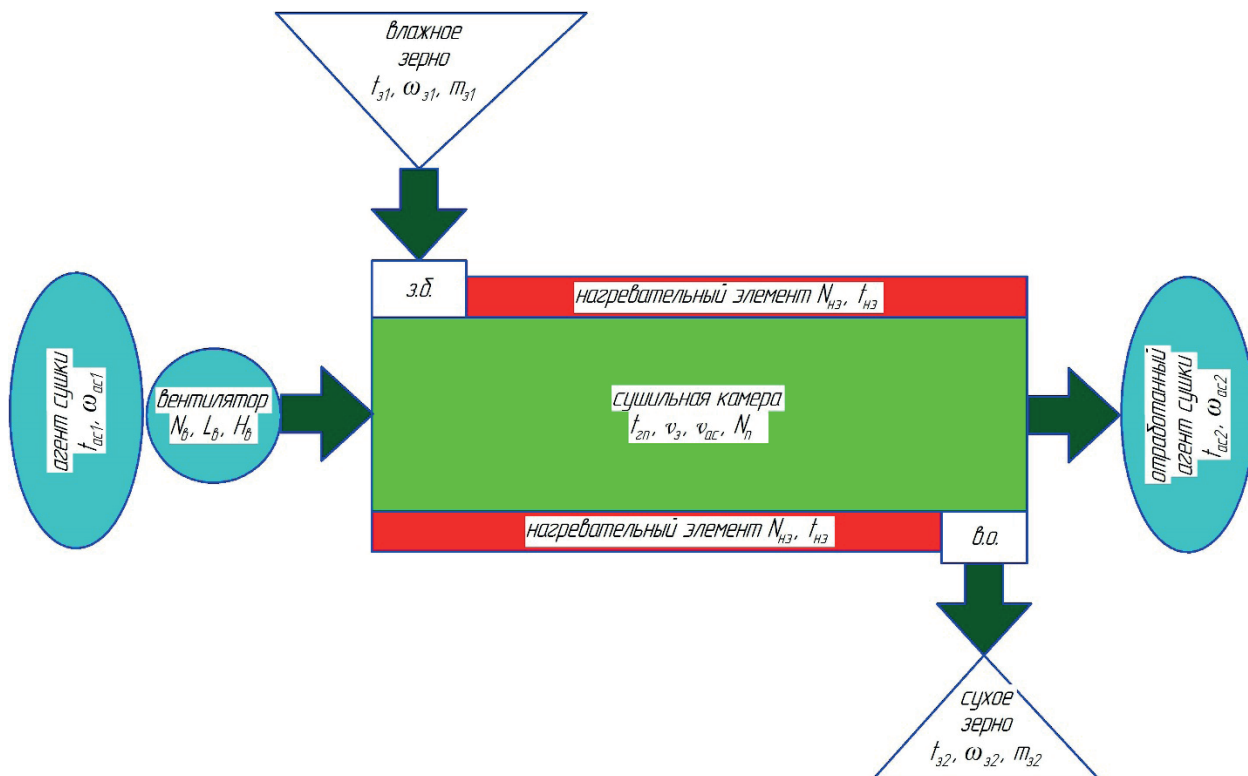


Рис. – Параметрическая модель устройства контактного типа для сушки влажного зерна:

з.б. – загрузочный бункер; в.о. – выгрузное окно; t_{ac} – температура агента сушки, °C; ω_{ac} – влажность агента сушки, %; t_z – температура зерна, °C; ω_z – влажность зерна, %; m_z – масса зерна, подвергаемого тепловому воздействию, кг; $t_{гп}$ – температура греющей поверхности, °C; v_z – скорость движения зерна, м/с; v_{ac} – скорость движения агента сушки, м/с; N_n – мощность, требуемая на привод транспортирующего рабочего органа, кВт; $N_{н3}$ – мощность, потребляемая нагревательным элементом, кВт; $t_{н3}$ – температура нагревательного элемента, °C; $N_в$ – мощность, потребляемая вентилятором, кВт; $L_в$ – производительность (подача) вентилятора, м³/ч; $H_в$ – давление (напор), создаваемое вентилятором, Па (индексы 1 относятся к исходному состоянию системы, индексы 2 характеризуют состояние системы после теплового воздействия)

Введение

Создание и внедрение высокоэффективных технических средств, осуществляющих тепловую сушку продовольственного и семенного зерна на качественно высоком уровне, зачастую ограничивается отсутствием соответствующего научного обоснования. Теплоэнергетический баланс проектируемых зерносушилок контактного типа при этом является важным критерием, характеризующим в конечном итоге технико-экономическую эффективность процесса сушки зерна. Необходима чёткая идентификация всех входных и выходных факторов, задействованных в реализации теплоэнергетической модели создаваемых средств механизации.

Таким образом, научное обоснование теплоэнергетического баланса в зерносушилке контактного типа с полной идентификацией всех действующих факторов являются актуальным и важным направлением проведения исследований.

Материалы и методы исследований

С целью выявления исследуемых факто-

ров, непосредственно оказывающих влияние на теплофизические характеристики разрабатываемого средства механизации для контактной сушки зерна, важно знать физическую природу распределения градиента температуры по объёму высушиваемого слоя зерна, контактирующего с греющей поверхностью, в запатентованной нами зерносушилке. В рассматриваемом случае характерной особенностью является условие, что этот исследуемый параметр процесса сушки ограничивается технологическими условиями, которые определяются конечным назначением обрабатываемого продукта.

Валидная интерпретация исследуемого процесса теплового воздействия на движущийся слой зерна при выполнении условия равномерного подвода теплоты на практике вызывает много сложностей. Для решения указанной проблемы при проведении исследований прибежим к созданию комплексной физической модели, которая будет с необходимой точностью характеризовать работу реальной технической системы. При этом упрощение реализации про-

цесса физического моделирования контактного нагрева зерна достигается посредством перехода от одностадийного формирования целостной модели к ее поэтапной разработке [1, 2].

Конечным результатом как физического моделирования, так и проведения основного эксперимента по выявлению теплоэнергетических параметров разрабатываемого средства механизации контактной сушки зерна является определение температуры нагрева зерна и особенностей распределения температурного градиента на всём участке сушильной камеры исследуемого устройства [3].

Аспекты теоретической интерпретации механизма действия зерносушилки при контактном способе подвода теплоты на начальной стадии могут базироваться на методологическом аппарате теоретического обоснования работы теплообменных систем и аппаратов. Использование данного сравнения позволяет в доступной форме проиллюстрировать основные режимные параметры процесса контактного нагрева при различных граничных условиях.

При интерпретации исследуемого процесса (рис.) примем, что на греющую поверхность сушильной камеры, предварительно нагретую до обоснованной в процессе поисковых исследований температуры, из загрузочного бункера подаётся влажное зерно, характеризующееся следующими исходными параметрами: t_{31} , ω_{31} и m_{31} [4, 5, 6]. При выходе из выгрузочного окна разработанной контактной зерносушилки состояние зерна будут определять характеристики: t_{32} , ω_{32} и m_{32} . При этом температуру греющей поверхности сушильной камеры, от которой передаётся теплота обрабатываемому зерну, примем постоянной и равной t_m .

В анализируемом случае на влажное зерно, находящееся в сушильной установке, воздействуют воздушный поток (агент сушки), создаваемый вентилятором, и теплота, передающаяся от нагревательных элементов. При этом агент сушки служит для удаления испарившейся с поверхности зерна влаги. Итоговой характеристикой вышеуказанной модели служат режимные параметры процесса контактной сушки: пропускная способность устройства для сушки зерна Q , кг/ч, и суммарные энергетические затраты, приходящиеся на испарение 1 кг влаги q , МДж/кг.

Верхнее граничное значение температуры нагрева обрабатываемого зерна стремится к температуре греющей поверхности. В качестве лимитирующего фактора выступает процесс ис-

парения с поверхности зерна влаги в виде пара, что, в свою очередь, снижает температуру нагрева зерна. Также важно не допускать перегрева зерна выше определённых пределов, что может привести к минимизации качественных показателей высушенного зерна в зависимости от его конечного назначения (семенное или продовольственное). В рассматриваемом процессе нагрева зерна до температуры t_{32} греющая поверхность при этом отдаёт теплоту.

Ввиду того, что процесс взаимодействия обрабатываемого зерна с греющей поверхностью протекает непрерывно, и температура нагрева зерна при достижении последним выгрузочного окна контактной зерносушилки не превосходит значение температуры греющей поверхности, за основу физического моделирования процесса теплоэнергетического обмена при сушке зерна можно с определёнными упрощениями принять систему распределения теплоты в рекуперативном теплообменнике прямоточного типа [7, 8, 9, 10].

Данную физическую модель можно охарактеризовать, применяя генеральные характеристические зависимости.

1. Уравнение, описывающее условия передачи теплоты от греющей поверхности к зерну:

$$Q = \Delta \omega c_3 (t_{32} - t_{31}),$$

где Q - теплота, отдаваемая греющей поверхностью сушильной камеры, Вт; K - коэффициент теплопередачи $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, t_{32} и t_{31} - температура соответственно греющей поверхности и зерна на выходе из сушильной камеры, $^{\circ}\text{C}$; $S_{гр}$ - площадь греющей поверхности, м^2 .

В данной модели берётся во внимание температура зерна в конкретный исследуемый промежуток времени.

2. Уравнение баланса теплоты:

$$Q = \Delta \omega c_3 (t_{32} - t_{31}),$$

где $\Delta \omega$ - изменение влажности обрабатываемого зерна, кг; c_3 - полная теплоемкость обрабатываемого зерна, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$; t_{32} и t_{31} - соответственно температура зерна после теплового воздействия и до тепловой обработки [11].

Количество теплоты, передаваемое за единицу времени от элементарной греющей поверхности, можно представить в следующем виде:

$$Q = S_{гр} \cdot \frac{1}{S_{гр}} \alpha (t_{гр} - t_{32}) dS_{гр} = S_{гр} \alpha (t_{гр} - t_{32})_{cp},$$

где α - коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Примем допущения и ограничения, необходимые для дальнейшего расчётного обоснования теплоэнергетического процесса, протекающего в сушильной камере контактной зерносушилки.

1. Подвод теплоты происходит по всей контактной греющей поверхности сушильной камеры постоянно и равномерно.

2. Полное отсутствие переноса теплоты посредством конвекции и радиации.

3. Теплоёмкость зерна постоянна в процессе всего теплового нагрева.

В рассматриваемом частном случае контактного подвода теплоты с введёнными ограничениями решаемая задача нагрева зерна является одномерной ($t_{z2} = f(z, t)$), где z – расстояние от зерна до греющей поверхности, м; t – время с момента начала сушки, с. Следовательно, решением этой задачи вполне может служить решение дифференциального уравнения теплопроводности при одномерном тепловом потоке:

$$\frac{\partial t_{z2}}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t_{z2}}{\partial z^2}, (t_{z2} > 0, 0 < z < \infty),$$

где a – температуропроводность влажного зерна, подвергаемого сушке, м²/с.

При соответствующих начальных и граничных условиях полученную зависимость представим в виде [12, 13]:

$$\frac{t_z(z, \tau) - t_{zn}}{t_{zn} - t_{z2}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}} e^{-\frac{z^2}{4a\tau}} \frac{dz}{2\sqrt{a\tau}},$$

где $t(z, t)$ – средняя арифметическая температура зерна на расстоянии z от греющей поверхности, по истечении t , с, с момента начала сушки, °С.

Подставляя в полученное выражение вместо бесконечного расстояния z известную толщину зернового слоя d и зная температуру зерна на выходе из выгрузного окна t_{z2} , температуропроводность a зерна, а также экспозицию

контактной сушки, мы имеем возможность выявить требуемую температуру греющей поверхности разрабатываемой зерносушилки.

Результаты исследований

С целью подтверждения результатов, полученных на основании теоретического обоснования, нами были проведены экспериментальные исследования по определению теплоэнергетических параметров разработанных средств механизации. По итогам проведённых научных изысканий получены адекватные значения режимных параметров для различных конструкций сушильных камер [14, 15].

Так, для сушильной камеры, выполненной в виде горизонтально расположенного цилиндра, были получены следующие результаты.

Обсуждение

Проведённые исследования показали, что нагрев зерна в сушильной камере зерносушилки происходит до температуры, предельное значение которой стремится к температуре греющей поверхности. Максимальная температура нагрева обрабатываемого зерна при этом зависит от толщины обрабатываемого слоя зерна [16, 17, 18], от скорости его движения в сушильной камере, экспозиции сушки и конструктивных особенностей сушильной камеры. При этом по мере увеличения экспозиции происходит уменьшение температурного градиента. Таким образом, в ходе поисковых исследований можно выявить оптимальное значение конструктивных параметров сушильной камеры и режимов сушки, позволяющие осуществить выбрать длительность теплового воздействия, которая позволит обеспечить требуемое качество сушки с максимальной возможной скоростью протекания процесса.

Выявлено, что допустимая температура нагрева поверхности сушильной камеры, выполненной в виде цилиндра, с винтовым транспортирующим рабочим органом [14] не должна

Таблица

Математические модели, интерпретирующие процесс сушки зерна пшеницы в установке контактного типа

Частные ограничительные условия	Характеристическое уравнение регрессии в кодированных значениях факторов
$v_3 = 0,0205$ м/с	$Y = 3103,89 + 88,51x_2 + 69,93x_3 - 234,91x_2^2 + 39,51x_2x_3 + 158,47x_3^2$
$v_8 = 3,8$ м/с	$Y = 3042,9282 + 1,9281x_1 - 33,0899x_3 - 2,3147x_1^2 + 15,2589x_1x_3 + 152,23x_3^2$
$t_m = 60$ °С	$Y = 3260,85 + 1,82x_1 + 165,65x_2 - 3,31x_1^2 - 17,34x_1x_2 - 234,91x_2^2$

здесь: Y – суммарные удельные затраты энергии на испарение влаги, кДж/кг; x_1 – скорость движения зерна; x_2 – скорость движения воздуха; x_3 – средняя температура греющей поверхности.

превышать 61 °С для обеспечения температуры зерна на выходе из камеры 39 °С. При использовании в сушильной камере ленточного транспортера и ее исполнении в форме прямоугольного параллелепипеда [15] допустимая температура нагрева поверхности камеры составляет 69 °С. При выполнении сушильной камеры в виде заключенной в короб ступенчатой поверхности с вибропобуждением движения зерна температура нагрева этой поверхности без ущерба для качества высушенного зерна можно повысить до 129 °С. Это также позволяет увеличить пропускную способность установки по сравнению с первым вариантом исполнения сушильной камеры вдвое: с 0,2 т/ч до 0,4 т/ч.

Простое же снижение скорости сушки способно сохранить качественные показатели процесса в требуемых пределах, но при этом оно отрицательно сказывается на производительности зерносушилки.

Заключение

Таким образом, определив с помощью теоретических и экспериментальных исследований необходимые конструктивные и режимные параметры сушилки и обеспечив нагрев рабочей поверхности сушильной камеры конкретной конструкции до температуры, которая не превысит предельно допустимую температуру обрабатываемого зерна, можно добиться идеального соотношения между пропускной способностью сушилки и качеством готового продукта.

Библиографический список

1. Пахомов, В. И. Оптимизация тепловой обработки фуражного зерна СВЧ-энергией / В. И. Пахомов, В. Д. Каун // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. - № 9. – С. 8-11.
2. Vargas, W. L. Heat conduction in granular materials / W. L. Vargas, J. J. McCarthy // AIChE Journal. – 2011. – 47. - P. 1052-1059.
3. Yadollahinia, A. R. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products / A. R. Yadollahinia, M. Omid, S. Rafie // Int. J. Agri. Biol. - 2010. – 10. - P. 61-65.
4. Converse, H. H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin / H. H. Converse // Amer. Soc. Agr. Engrs. - 2016. - № 855. - P. 254-256.
5. Технология послеуборочной обработки, хранения и предреализационной подготовки продукции растениеводства / В. И. Манжесов, И. А. Попов, И. В. Максимов [и др.]; под общей редакцией В. И. Манжесова. - Санкт-Петербург :

Лань, 2020. - 624 с. - ISBN 978-5-8114-5282-8.

6. Курдюмов, В. И. Теоретические аспекты распределения теплоты в установке контактного типа при сушке зерна / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, С. А. Сутягин // Инновации в сельском хозяйстве. - 2015. – № 2(12). - С.159-161.

7. Kwanchai, C. Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high-moisture particulate materials / C. Kwanchai, D. Sakamon, S. Somchart // Drying Technology. – 2010. – 28:1. - P. 20-29.

8. Савченко, С. В. Развитие научных основ и практических методов повышения эффективности технологии зерносушения: спец. 05.18.01 технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Савченко Светлана Вениаминовна; Московский государственный университет пищевых производств (МГУПП). - Москва, 2009. – 387 с.

9. Повышение эффективности послеуборочной обработки зерна / В. И. Курдюмов, Г. В. Карпенко, А. А. Павлушин, С. А. Сутягин // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. - 2011. – № 6. - С. 56-58.

10. Pabis, Stanisław. Grain drying: theory and practice / Stanisław Pabis, Digvir S. Jayas, Stefan Cenkowski. - New York: John Wiley, 2018. - 303 p. - ISBN: 0471573876.

11. Николаев, В. А. Очистка зерна от примесей и его предварительная сушка: монография / В. А. Николаев. – Ярославль: Ярославская ГСХА, 2017. - 212 с. - ISBN 978-5-98914-180-7.

12. Малин, Н. И. Энергосберегающая сушка зерна : учебное пособие / Н. И. Малин. - Москва : КолосС, 2004. – 240 с. – ISBN 5-9532-0100-1.

13. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 599 с.

14. Патент № 2323580 Российская Федерация, МПК F26B 11. Устройство для сушки зерна : № 2006109961/13: заявл. 28.03.06: опубл. 10.05.08 / Курдюмов В. И., Карпенко Г. В., Павлушин А. А.; патентообладатель ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. – 5 с.

15. Патент № 2436630 Российская Федерация, МПК B02B 1/00. Устройство для сушки зерна : № 2010122224: заявл. 31.05.10: опубл. 20.12.11 / Курдюмов В. И., Павлушин А. А., Сутягин С. А.; патентообладатель ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. – 5 с.

16. Мойзес, Б. Б. Статистические методы

контроля качества и обработка экспериментальных данных / Б. Б. Мойзес, И. В. Плотникова, Л. А. Редько. – Томск: ТПУ, 2016. - 119 с. - ISBN 978-5-4387-0700-4.

17. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Мо-

сква: Наука, 1976. – 279 с.

18. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алёшкин, П. М. Роцин. – Ленинград: Колос, Ленинградское отделение, 1980. – 168 с.

JUSTIFICATION OF HEAT AND ENERGY PARAMETERS OF CONTACT DRYING PROCESS OF GRAIN

Ageev P.S., Dolgov V.I., Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Agrarian University
432017, Ulyanovsk, Novyi Venets boulevard, 1; tel.: 89050359200; e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.*

Key words: heat balance, contact heat transfer, regime parameters, heating surface temperature, moisture exchange.

The purpose of the research is to identify factors that directly affect the thermophysical characteristics of the developed means for grain contact drying. In case of system analysis, this goal is achieved by widespread usage of modeling, which allows to substantiate not only the parameters of the appropriate process mode, but also to choose the most suitable way to control the drying process under production conditions. The conditions for heat transfer from the heating surface to the grain depend on the heat given off by the heating surface of the drying chamber, W ; heat transfer coefficient $W/(m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, temperature of the heating surface and the grain at the outlet from the drying chamber, $^\circ\text{C}$; heating surface area, m^2 . In addition, in case of contact heat transfer, the problem of grain heating is linear ($t_{gr} = f(z, t)$), where z is the distance from the grain to the heating surface, m ; t - time from the drying process start, s . It was found that the heating temperature limit of the surface of the drying chamber (made in the form of a cylinder, with a screw transporting working body) should not exceed 61°C to ensure the grain temperature at the chamber outlet of 39°C . In case of using a belt conveyor in the drying chamber and if it is in the form of a rectangular parallelepiped, the temperature limit of the chamber surface heating is 69°C . When the drying chamber is made in the form of a stepped surface enclosed in a box with vibration induction of grain movement, the heating temperature of this surface can be increased to 129°C without harm to the dried grain quality. It also allows to increase the throughput of the device compared to the first version of the drying chamber: from 0.2 t/h to 0.4 t/h .

Bibliography:

1. Pakhomov, V. I. Improvement of thermal treatment of feed grain with microwave energy / V. I. Pakhomov, V. D. Kaun // *Mechanization and electrification of agriculture*. - 2000. - № 9. - P. 8-11.
2. Vargas, W. L. Heat conduction in granular materials / W. L. Vargas, J. J. McCarthy // *AIChE Journal*. - 2011. - 47. - P. 1052-1059.
3. Yadollahinia, A. R. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products / A. R. Yadollahinia, M. Omid, S. Rafie // *Int. J. Agri. Biol.* - 2010. - 10. - P. 61-65.
4. Converse, H. H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin / H. H. Converse, *Amer. soc. Agr. Engrs.* - 2016. - № 855. - P. 254-256.
5. Technology of post-harvest processing, storage and pre-sale preparation of crop products / V. I. Manzhosov, I. A. Popov, I. V. Maksimov [and others]; under the general editorship of V. I. Manzhosov. - St. Petersburg: Lan, 2020. - 624 p. - ISBN 978-5-8114-5282-8.
6. Kurdyumov, V. I. Theoretical aspects of heat distribution in a contact-type device during grain drying / V. I. Kurdyumov, A. A. Pavlushin, S. A. Sutyagin // *Innovations in agriculture*. - 2015. - № 2 (12). - P. 159-161.
7. Kwanchai, C. Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high-moisture particulate materials / C. Kwanchai, D. Sakamon, S. Somchart // *Drying Technology*. - 2010. - 28:1. - P. 20-29.
8. Savchenko, S. V. Development of scientific bases and practical methods for improving the efficiency of grain drying technology: spec. 05.18.01 technology of processing, storage and processing of grasses, legumes, cereals, fruits and vegetables and viticulture: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Svetlana Veniaminovna Savchenko; Moscow State University of Food Production (MSUFP). - Moscow, 2009. - 387 p.
9. Improvement of efficiency of post-harvest grain processing / V. I. Kurdyumov, G. V. Karpenko, A. A. Pavlushin, S. A. Sutyagin // *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. - 2011. - № 6. - P. 56-58.
10. Pabis, Stanislaw. Grain drying: theory and practice / Stanislaw Pabis, Digvir S. Jayas, Stefan Cenkowski. - New York : John Wiley, 2018. - 303 p. - ISBN: 0471573876.
11. Nikolaev, V. A. Purification of grain from impurities and its pre-drying: monograph / V. A. Nikolaev. - Yaroslavl: Yaroslavl State Agricultural Academy, 2017. - 212 p. - ISBN 978-5-98914-180-7.
12. Malin, N. I. Energy-saving drying of grain / N. I. Malin. - Moscow: KolosS, 2004. - 240 p. - ISBN 5-9532-0100-1.
13. Lykov, A. V. Theory of heat conduction / A. V. Lykov. - Moscow: Higher School, 1967. - 599 p.
14. Patent № 2323580 Russian Federation, IPC F26B 11. Device for grain drying: № 2006109961/13: Appl. 28.03.06: publ. 10.05.08 / Kurdyumov V.I., Karpenko G.V., Pavlushin A.A.; Patent holder FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin. - 5 p.
15. Patent № 2436630 Russian Federation, IPC B02B 1/00. Grain dryer: № 201012222: Appl. 31.05.10: publ. 20.12.11 / Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A.; Patent holder FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin. - 5 p.
16. Moizes, B. B. Statistical methods of quality control and processing of experimental data / B. B. Moizes, I. V. Plotnikova, L. A. Redko. - Tomsk: TPU, 2016. - 119 p. - ISBN 978-5-4387-0700-4.
17. Adler, Yu. P. Planning an experiment in search for appropriate conditions / Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Granovsky. - Moscow: Nauka, 1976. - 279 p.
18. Melnikov, S.V. Experimental planning in research of agricultural processes / S.V. Melnikov, V.R. Aleshkin, P.M. Roshchin, - Leningrad: Kolos, Leningrad branch, 1980. - 168 p.