Тип статьи: научная
УДК 631:362.7
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-6-71-79

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДИСКА ПРИ ОБЖАРКЕ ЗЕРНА В УСТАНОВКЕ КОНТАКТНОГО ТИПА

Сергей Алексеевич Сутягин [1]***, Пётр Сергеевич Агеев*** [2]***,***
Андрей Александрович Павлушин [3]***, Владимир Иванович Курдюмов*** [4]
Владимир Анатольевич Семыкин [5]
[1,2,3,4] *Ульяновский государственный аграрный университет, г. Ульяновск, Россия*
[1] sergeysut@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6477-3817, [2] ageev_petr@mail.ru
[3] andrejpavlu@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7678-2876
[4] bgdie@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1603-1779
[5] *Курский государственный аграрный университет им.И.И.Иванова, г. Курск, Россия*
[5] semykin-v@internet.ru, https://orcid.org/0009-0001-4769-4738

Автор ответственный за переписку: Сергей Алексеевич Сутягин, sergeysut@mail.ru
Corresponding author: Sergey Sutyagin, sergeysut@mail.ru

Реферат. *Анализ средств механизации для обжарки зерна, которое используется в кормах для животных, показал, что они имеют ряд недостатков: низкое качество обжарки зерна, высокую стоимость, повышенные удельную металлоемкость и удельные затраты энергии. Разработка новых технических средств, способных с учетом ресурсосбережения качественно обжаривать зерно, является актуальной и важной научно-технической проблемой. Для ее решения была разработана физическая модель установки с рабочим органом, который выполнен в виде плоской спирали. Устройство включает в себя кожух, выполненный в виде вертикально установленного цилиндра, внешняя поверхность которого покрыта теплоизолирующим материалом, из которого через перфорированную пластину удаляются излишки влаги в виде пара. Исследование разработанной установки проводили в лабораторных условиях для зерна ячменя. Для процесса обжарки выбрали в качестве критерия оптимизации - удельные затраты энергии, наиболее значимых независимых факторов - температуру нагрева диска и время пребывания зерна на диске. Во избежании обугливания зерновки в экспериментах диапазоны изменения температуры нагрева диска составляли 180 - 250ºС, а время пребывания зерна на диске 140 - 200 ^{0}С. Для оценки качества обжарки зерна определяли массовую долю декстринов. В результате исследования установлено, что рациональное значение температуры диска составляет 224 ºС, а время пребывания зерна в установке - 168 с. При таких значениях независимых факторов процесса удельные затраты энергии на обжарку зерна составляют 3922 кДж·ч/кг, а пропускная способность установки достигает 30 кг/ч. Качество обжарки зерна удовлетворяет предъявляемым требованиям.*

Ключевые слова*: установка, контактный подвод теплоты, зерно, обжарка зерна, температура диска.*

DETERMINATION OF DISK TEMPERATURE FOR GRAIN ROASTING IN CONTACT TYPE INSTALLATION

Sergey Sutyagin [1]***, Pyotr Ageev*** [2]***, Andrey Pavlushin*** [3]***, Vladimir Kurdyumov*** [4]
Vladimir Semykin [5]
[1,2,3,4] *Ulyanovsk State Agrarian University, Ulyanovsk, Russia*
[1] sergeysut@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6477-3817, [2] ageev_petr@mail.ru
[3] andrejpavlu@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7678-2876
[4] bgdie@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1603-1779
[5] *KUR State Agrarian University named after I.I. Ivanov, Kursk, Russia*

[5] semykin-v@internet.ru, https://orcid.org/0009-0001-4769-4738

Abstract. *Analysis of mechanization means for roasting grain, which is used in animal feed, showed that they have a number of disadvantages: low quality of grain roasting, high cost, increased specific metal consumption and specific energy consumption. The development of new technical means capable of frying grain efficiently, taking into account resource conservation, is a pressing and important scientific and technical problem. A physical model of the installation with a working body, which is made in the form of a flat spiral, was developed to solve it. The device includes a casing made in the form of a vertically mounted cylinder, the outer surface of which is covered with heat-insulating material, from which excess moisture is removed through a perforated plate in the form of steam. The study of the developed installation was carried out in laboratory conditions for barley grain. For the roasting process, we chose specific energy consumption as an optimization criterion; the most significant independent factors were the heating temperature of the disk and the residence time of the grain on the disk. The range of changes in the heating temperature of the disk in experiments to avoid charring of the grain was 180 - 250ºC, and the time the grain remained on the disk was 140 - 200 0C. To assess the quality of grain roasting, the mass fraction of dextrins was determined. As a result of the study, it was established that the rational value of the disk temperature is 224 ºC, and the residence time of the grain in the installation is 168 s. The specific energy consumption for roasting grain at such values of independent process factors is 3922 kJ h/kg, and the throughput of the installation reaches 30 kg/h. The quality of grain roasting meets the requirements.*

Keywords: *installation, contact heat supply, grain, grain roasting, disk temperature*.

Для цитирования: Сутягин С.А., Агеев П.С., Павлущин А.А., Курдюмов В.И., Семыкин В.А. Определение температуры диска при обжарке зерна в установке контактного типа // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2023. Т. 66, № 6. С. 71-79. https://doi.org/10.35887/2305- 2538-2023-6-71-79.

For citation: Sutyagin S.A., Ageev P.S., Pavluschin A.A., Kurdyumov V.I., Semykin V. Determination of disk temperature for grain roasting in contact type installation". *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 66(6): 71-79. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-6-71-79.

Введение. Для получения качественной продукции фермеры при выращивании сельскохозяйственных животных должны обеспечивать их полноценными и сбалансированными кормами. Благодаря правильному кормлению животных молочные и мясные продукты будут иметь требуемое качество, а их себестоимость будет минимальна. Правильное использование кормов, в свою очередь, зависит от того, насколько качественно компоненты корма подготовлены к скармливанию [1, 3].

Одним из основных компонентов в кормах является зерно. Зерно пшеницы, ячменя, сои, рапса кукурузы, гороха и других культур используют для корма свиней, КРС, птицы, лошадей, кроликов и многих других животных.

Технологии подготовки зерна к скармливанию разнообразны, они могут включать различные процессы: обжаривание, запаривание, осолаживание, дрожжевание, плющение, микронизацию и другие [1, 2, 4].

Обжаривание зерна – тепловая обработка предварительно увлажненного зерна при высокой температуре. При обжарке часть крахмала в зерне распадается до моносахаров, происходит его декстринизация (термическая деструкция). Благодаря этому зерно приобретает более сладкий вкус, улучшается его перевариваемость. Обжаренное зерно скармливают, например, поросятам с 5…7 дневного возраста до отъёма. Обжаренное зерно начинают скармливать животным в небольшом количестве, обычно это 30 - 50 г. Затем суточную норму обжаренного зерна постепенно увеличивают до 120 -150 г [6, 11].

Материалы и методы. В настоящее время зерно обжаривают в установках барабанного типа с замкнутой циркуляцией горячего воздуха (рисунок 1).

Рисунок 1 – Установка барабанного типа для обжаривания сыпучих продуктов

Установка барабанного типа предназначена для обжаривания крупяных культур, масличных и мелкозернистых семян трав, а также зерен кофе, арахиса, семян тыквы и других сыпучих продуктов. Принцип работы такой установки основан на подводе теплоты к обрабатываемому продукту от вращающегося барабана. Барабан снабжен электронагревателями, которые разделены на 2 секции. В каждой секции установлены 6 электронагревателей суммарной мощностью 13,8 кВт. Масса барабана составляет 150 кг, а для его вращения установлен привод мощностью 2,2 кВт. Пропускная способность установки барабанного типа может быть от 25 кг/ч до 150 кг/ч в зависимости от вида обрабатываемого продукта. При обжарке зерна в установке барабанного типа удельные затраты энергии превышают 4320 кДж·ч/кг.

В настоящее время для обжаривания зерна применяют также установки камерного типа, установки с ленточным рабочим органом и инфракрасным источником теплоты, установки с конвективным нагревом продукта. Однако такие установки имеют низкую равномерность обжарки зерна, а также их удельные затраты энергии в 1,2 - 1,7 раза превышают удельные затраты энергии установок барабанного типа [2, 4, 6]. Поэтому разработка энергосберегающих средств механизации обжарки зерна, обеспечивающих требуемое качество готового продукта, является актуальной и важной научно- технической проблемой [1, 3, 4].

Для решения указанной проблемы нами предложена принципиально новая конструкция установки с рабочим органом, который выполнен в виде плоской спирали (рисунок 2) [8, 9, 10, 11].

Устройство для обжарки зерна включает в себя кожух, выполненный в виде вертикально установленного цилиндра, внешняя поверхность которого покрыта теплоизолирующим материалом.

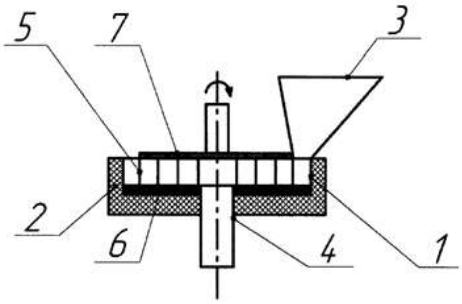

Рисунок 2 – Конструктивно-технологическая схема предложенной установки: 1 – кожух; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – бункер; 4 – выгрузной цилиндр; 5 – транспортирующий рабочий орган; 6 – диск с электрическим нагревателем; 7 – перфорированная пластина круглой формы

С одной стороны внешней образующей поверхности цилиндра закреплён загрузочный бункер. Внутри вертикального цилиндра на нижнем его основании установлен диск с электрическим нагревателем. В центре диска установлен выгрузной цилиндр. Над диском установлен с

возможностью вращения транспортирующий рабочий орган, который выполнен в виде соединенных между собой перфорированной пластины круглой формы и плоской спирали (рисунок 3). Перфорированная пластина снабжена приводом.

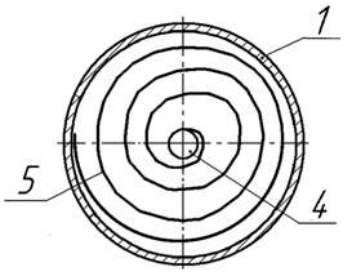

Рисунок 3 – Рабочая камера предложенной установки:
1 – кожух; 4 – выгрузной цилиндр; 5 - транспортирующий рабочий орган

Установка работает следующим образом. Включают нагреватель диска и привод перфорированной пластины. Привод начинает вращать перфорированную пластину, а вместе с ней и плоскую спираль. После того, как температура диска достигнет требуемой температуры, засыпают подготовленное зерно в загрузочный бункер. Из загрузочного бункера зерно попадает на нагретый диск, захватывается внешним витком транспортирующего рабочего органа и далее единичным слоем перемещается по виткам плоской спирали к выгрузному цилиндру.

Контактируя с поверхностью нагретого диска, зерно также нагревается и обжаривается. При обжаривании излишки влаги из зерна в виде пара удаляется из кожуха через перфорированную пластину. Подбором частоты вращения транспортирующего рабочего органа устанавливают время пребывания зерна в установке. Обжаренное зерно удаляется из устройства через выгрузной цилиндр.

Для определения температуры диска $t_д$, ºС, которую необходимо создать для передачи количества теплоты q, кДж, необходимого для равномерной обжарки зерна, выберем краевые условия для случая, когда направление теплового потока совпадает с осью x (рисунок 4).

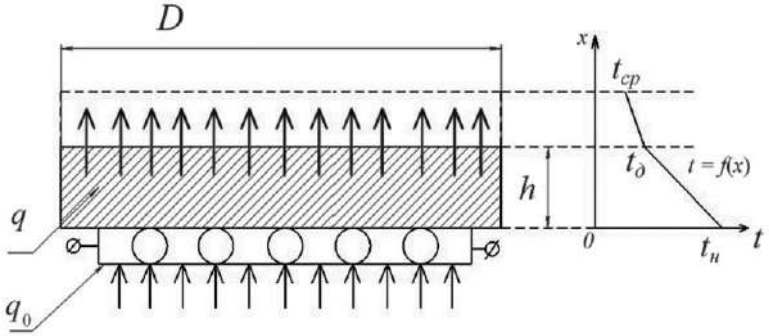

Рисунок 4 - Схема передачи теплового потока от нагретого диска к зерну
где: D – диаметр диска, м; h – толщина диска, м; q_0 – количество теплоты, подводимое к диску, кДж; q – количество теплоты, которое нагретый диск передает зерну, кДж; $t_н$ – температура нагревательного элемента, ºС; $t_{ср}$ – средняя температура слоя зерна, загружаемого в установку, ºС

При этом [5, 7].

$$t(x, \tau) = t_{ср}. \quad (1)$$

$$dt(0, \tau)/dx = 0, \quad (2)$$

где: τ – время пребывания зерна на диске, с.

После дифференцирования уравнений (1) и (2) запишем частное решение:

$$t(x, \tau) = a \sin k_в x e^{-a\tau k_в} + b \cos k_в x e^{a\tau k_в}, \quad (3)$$

где: a, b – постоянные коэффициенты; $k_в$ - коэффициент влагопроводности материала, м^2/ч.

$$dt(0, \tau)/dx = \lim_{x\to 0}(ak_в\cos k_в x - bk_в\sin k_в x)e^{-a\tau k_в}, \quad (4)$$

Общее решение уравнений (3) и (4) будет иметь вид [3]:

$$t(x, \tau) = \Sigma^{\infty}_{n=1} b \cos(2a - 1)\pi x/2) \exp(-2a - 1)^2\pi^2 a/4b). \quad (5)$$

Обозначим в частице зерна элементарную площадку dS, м^2. Пусть к этой площадке за время, $d\tau$, с, нагретый диск передаёт количество теплоты

$$\Delta q = - \lambda dSd\tau(dt/dm), \quad (6)$$

где: λ - коэффициент теплопроводности зерна, Вт/(м·°С); (dt/dm) - градиент температуры, °С/м.

Проинтегрируем уравнение (6) по площади S и интервалу $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$.

$$\Delta q = - \int_{\tau 1}^{\tau}{}_2 \int_S \lambda dSd\tau(dt/dm), \quad (7)$$

где t_1 и t_2 – соответственно начальная и конечная температура элементарной частицы зерна объёмом dV при ее нагреве в течение времени $\Delta\tau$.

После преобразования получаем

$$\Delta q = - \int_{\tau 1}^{\tau}{}_2 \lambda Sd\tau(dt/dm). \quad (8)$$

При условии, что элементарная частица зерна объёмом $dV = dxdydz$ за время $\Delta\tau$ нагревается от температуры t_1 до значения t_2, то к этому объёму будет подведено количество теплоты

$$\Delta q = c\rho(t_2 - t_1)dV, \quad (9)$$

где: c - удельная теплоёмкость диска, кДж/(кг·°С); ρ – насыпная плотность обжариваемого зерна, кг/м^3.

С учётом этого количество теплоты, которое нагретый диск передает зерну, характеризует уравнение (10):

$$q = c\rho\iiint_V(t_2 - t_1)dV = c\rho V\int_0^V(t_2 - t_1)dV, \quad (10)$$

Тогда температуру диска можно определить по выражению:

$$t_д = (1/V)\int_0^V t(x, \tau)dV = (1/Dh)\int_0^D\int_0^h t(h, \tau)dxdydz = (1/h)\int_0^h t(h, \tau)dh. \quad (11)$$

С учётом полученных выражений, а также в соответствии с указанной на рисунке 2 конструктивно-технологической схемой, разработана физическая модель установки с рабочим органом, который выполнен в виде плоской спирали (рисунок 5).

Рисунок 5 – Физическая модель установки с рабочим органом, выполненным в виде плоской спирали: 1 – рама; 2 – вертикальный цилиндр; 3 – загрузочный бункер; 4 - привод перфорированной пластины; 5 – плоская спираль; 6 – диск

Результаты и их обсуждение. Разработанную физическую модель установки со спиральным рабочим органом исследовали в лабораторных условиях в режиме обжарки зерна ячменя. Методика лабораторных исследований включала в себя несколько этапов, указанных на схеме, которая представлена на рисунке 6.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ЭКСПЕРИМЕНТА
ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ
ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ И ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ НЕЗАВИСИМЫХ ФАКТОРОВ
ВЫБОР ИНТЕРВАЛОВ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ
ВЫБОР ВИДА РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ
ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ
ПОЛУЧЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ И ИХ АНАЛИЗ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕЗАВИСИМЫХ ФАКТОРОВ
ПРОВЕРКА РАБОТЫ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ ПРИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРАХ И РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Рисунок 6 - Методика лабораторных исследований разработанной физической модели установки для обжарки зерна

В качестве критерия оптимизации при обжарке зерна выбрали удельные затраты энергии $P_{уд}$, кДж·ч/кг, которые определяли по методике, указанной в работе [12]. Для оценки качества обжарки зерна определяли массовую долю декстринов ω, %, по ГОСТу 29177-91.

В качестве наиболее значимых независимых факторов выбрали температуру нагрева диска $t_д$, ºС, и время τ, с, пребывания зерна на диске. В экспериментах температуру нагрева диска изменяли в диапазоне 180…250 ºС, а время пребывания зерна на диске изменяли в диапазоне 140…200 С. Такие режимы обеспечивают нагрев зерна ячменя до температуры, не превышающей 180 ºС, при превышении которой начинается обугливание зерновки.

При обжаривании зерна на каждом этапе изменения значений независимых факторов определяли удельные затраты энергии, среднюю температуру $t_{ср}$ обжаренного зерна, а также массовую долю декстринов и жиров в обжаренном зерне.

В результате исследований получен график (рисунок 7) и уравнение (12), которые характеризуют влияние температуры диска и времени пребывания зерна в установке на массовую долю декстринов в обжаренном зерне.

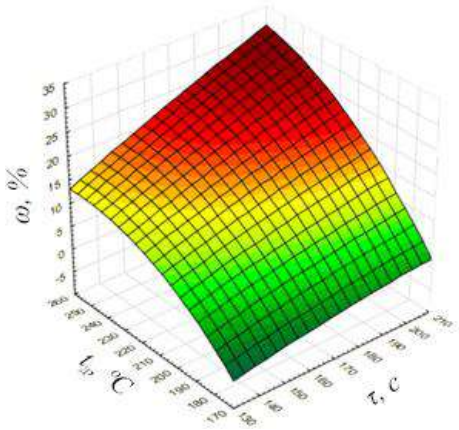

Рисунок 7 – Зависимость массовой доли декстринов от температуры диска и времени пребывания зерна в установке

$$\omega = -129{,}67 - 0{,}08\tau + 1{,}05t_д - 0{,}0004\tau^2 + 0{,}0017\tau t_д - 0{,}0025t_д^2. \quad (12)$$

После решения уравнения (12) определили, что при температуре диска 245 ºС и времени пребывания зерна в установке 182 с, массовая доля декстринов в обжаренном зерне находилась на уровне 26…28 %.

Далее провели экспериментальные исследования разработанной физической модели установки, в которых определяли влияние выбранных независимых факторов на удельные затраты энергии. В результате построен график (рисунок 8) и получено уравнение (13), которые характеризуют влияние температуры диска и времени пребывания зерна в установке на удельные затраты энергии.

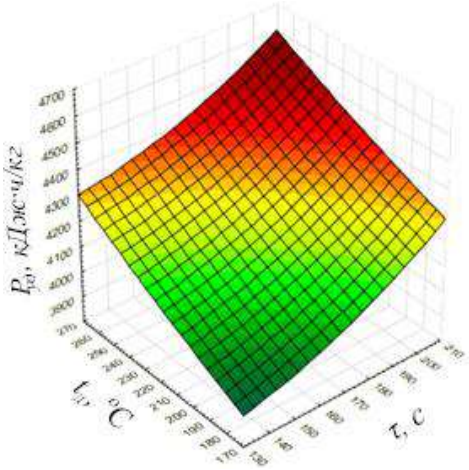

Рисунок 8 - Зависимость удельных затрат энергии от температуры диска и времени пребывания зерна в установке

$$P_{уд} = 3586{,}68 + 4{,}06\tau + 2{,}21t_д - 0{,}03\tau^2 - 0{,}0076\tau t_д + 0{,}0058t_д^2. \quad (13)$$

После решения уравнения (13) установили, что при полученных ранее значениях температуры диска 245 ºС, времени пребывания зерна в установке 182 с, удельные затраты энергии на обжаривание зерна ячменя составляют 4017 кДж·ч/кг. Однако при этом происходит резкое снижение массовой доли жиров в обжаренном зерне, что отрицательно сказывается на его питательной ценности. Поэтому для исследуемой установки выбрали рациональные значения независимых факторов: $t_д$ = 224 ºС, τ = 168 с. Далее провели серию экспериментов при выбранных рациональных значениях, в результате установили, что удельные затраты энергии составляют 3922 кДж·ч/кг, массовая доля декстринов в обжаренном зерне составила 25…27 %, а массовая доля жиров находилась в пределах 16…20 %, что соответствует требованиям, предъявляемым к качеству готового продукта. При этом пропускная способность установки составила 30 кг/ч.

Заключение. Таким образом, разработанная физическая модель установки с рабочим органом, выполненным в виде плоской спирали, позволяет с требуемым качеством выполнять обжарку зерна. В результате исследования установлено, что рациональное значение температуры диска установки составляет 224 ºС при времени обжаривания зерна ячменя 168 с. При таких значениях независимых факторов удельные затраты энергии на обжарку зерна составляют 3922 кДж·ч/кг, а пропускная способность достигает 30 кг/ч. Качество обжарки зерна удовлетворяло предъявляемым требованиям.

Список источников

1. Гинзбург, А.С. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов / А.С. Гинзбург, И.М. Савина - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 280 с.

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

3. Грачев, Ю.П. Моделирование и оптимизация тепло- и массообменных процессов пищевых производств / Ю.П. Грачев, А.К. Тубольцев, В.К. Тубольцев - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. - 216 с.

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. Куцов, С.В. Физико-математическое моделирование процесса обжарки зерна овса / С.В. Куцов, А.В. Дранников // Вестник Воронежской государственной технологической академии. – 2008. – № 1(35). – С. 26-30.

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. Минухин, Л.А. Расчеты сложных процессов тепло-, и массообмена в аппаратах пищевой промышленности / Л.А. Минухин. М.: Агропромиздат, 1986. - 175 с.

8. Патент на полезную модель № 167410 U1 Российская Федерация, МПК A23B 9/08. Устройство для сушки зерна: № 2016130462: заявл. 25.07.2016: опубл. 10.01.2017 / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина».

9. Патент на полезную модель № 92603 U1 Российская Федерация, МПК A23B 9/08. Устройство для сушки зерна: № 2009140702/22: заявл. 03.11.2009: опубл. 27.03.2010 / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия».

10. Патент на полезную модель № 170451 U1 Российская Федерация, МПК A23B 9/08. устройство для сушки зерна: № 2016131956: заявл. 03.08.2016: опубл. 25.04.2017 / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина».

11. Патент № 2632181 C Российская Федерация, МПК A23B 9/08. устройство для сушки зерна: № 2016124458: заявл. 20.06.2016: опубл. 02.10.2017 / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина».

12. Сутягин, С.А. Снижение удельных затрат энергии на обжаривание зерна в установке непрерывного типа /, П.С. Агеев, В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 4(48). – С. 18…22.

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

References

1. Ginzburg, A.S. Mass and moisture exchange characteristics of food products / A.S. Ginzburg, I.M. Savina - M.: Light and food industry, 1982. - 280 p.

2. Gulyaev, G.A. Automation of post-harvest processing and grain storage processes / G.A. Gulyaev. – M.: Agropromizdat, 1990. – 236 p.

3. Grachev, Yu.P. Modeling and optimization of heat and mass transfer processes in food production / Yu.P. Grachev, A.K. Tuboltsev, V.K. Tuboltsev - M.: Light and food industry, 1984. - 216 p.

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. Kutsov, S.V. Physico-mathematical modeling of the process of roasting oat grains / S.V. Kutsov, A.V. Drannikov // Bulletin of the Voronezh State Technological Academy. – 2008. – No. 1(35). – P. 26-30.

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. Minukhin, L.A. Calculations of complex heat and mass transfer processes in food industry apparatuses / L.A. Minukhin. M.: Agropromizdat, 1986. - 175 p.

8. Utility model patent No. 167410 U1 Russian Federation, IPC A23B 9/08. Device for drying grain: No. 2016130462: application. 07/25/2016: publ. 01/10/2017 / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin [and others]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin".

9. Utility model patent No. 92603 U1 Russian Federation, IPC A23B 9/08. Device for drying grain: No. 2009140702/22: application. 03.11.2009: publ. 03/27/2010 / V.I. Kur-dyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin; applicant Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Ulyanovsk State Agricultural Academy".

10. Utility model patent No. 170451 U1 Russian Federation, IPC A23B 9/08. device for drying grain: No. 2016131956: appl. 08/03/2016: publ. 04/25/2017 / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin [and others]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin".

11. Patent No. 2632181 C Russian Federation, IPC A23B 9/08. device for drying grain: No. 2016124458: appl. 06/20/2016: publ. 10/02/2017 / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin [and others]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin".

12. Sutyagin, S.A. Reducing specific energy consumption for roasting grain in a continuous type installation /, P.S. Ageev, V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. – 2019. – No. 4(48). – P. 18…22.

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

Информация об авторах

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

Information about the authors

S. Sutyagin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; P. Ageev – Candidate of Technical Sciences; A. Pavlushin – Doctor of Technical Sciences, Professor; V. Kurdyumov - Doctor of Technical Sciences, Professor; V. Semykin – Doctor of agricultural 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): 20.11.2023 Принята к публикации (Accepted): 22.12.2023