

АГРОИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ AGROENGINEERING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 631.372
DOI 10.24888/2541-7835-2024-31-106-115

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА В БУНКЕРЕ С АКТИВНЫМ ВЕНТИЛИРОВАНИЕМ

Бунеев Сергей Сергеевич^{1✉}, Добрин Сергей Александрович², Шубкин Сергей Юрьевич³
^{1,2,3}Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Липецкая область, Елец, Россия
¹limes88@mail.ru✉
²dsa250499@gmail.com
³shubkin.92@mail.ru

Аннотация. Моделирование различных физических явлений, сопряженных с процессом хранения зерна, является важным этапом при разработке наиболее оптимального способа управления рисками порчи, связанными с температурой и влажностью зерна. Математическая модель для прогнозирования теплопередачи внутри зерновой массы является простым и экономически эффективным способом для оценки изменений физических параметров и риска порчи. В данной статье рассматривается проблема теплопереноса в бункере активного вентилирования семян в зерновой массе, контактирующей с вертикальной поверхностью бункера. Целью исследования является установление закономерностей процесса теплопереноса, а также определение влияния температуры окружающей среды на температуру в указанной области. Для решения рассматриваемой задачи распространения потока тепловой энергии сквозь зерновой слой построена математическая модель с точки зрения теории двойной диффузии. В предлагаемом варианте модели теплопередачи с двойной диффузией теплоперенос происходит в двух направлениях: сквозь зерно и через пустоты, имеющиеся между зерновками в слое. Кроме того, также происходит теплообмен между зёрнами и воздухом и наоборот. Синтезированная математическая модель является эффективным инструментом для решения сложных производственных задач.

Ключевые слова: бункер вентилируемый, математическая модель, двойная диффузия, теплоперенос, микроклимат зернохранилищ

Для цитирования: Бунеев С.С., Добрин С.А., Шубкин С.Ю. Математическая модель динамического процесса теплопереноса в бункере с активным вентилированием // Агропромышленные технологии Центральной России. 2024. № 1(31). С. 106-115. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2024-31-106-115>.

Original article

MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMIC PROCESS OF HEAT TRANSFER IN A BUNKER WITH ACTIVE VENTILATION

Sergey S. Buneev^{1✉}, Sergey A. Dobrin², Sergey Yu. Shubkin³
^{1,2,3}Bunin Yelets State University, Lipetsk region, Yelets, Russia
¹limes88@mail.ru✉
²shubkin.92@mail.ru
³dsa250499@gmail.com

Abstract. Modeling of various physical phenomena associated with the grain storage process is an important step in developing the most optimal way to manage spoilage risks associated with grain temperature and humidity. A mathematical model for predicting heat transfer within a grain mass is a simple and

cost-effective way to assess changes in physical parameters and the risk of spoilage. This article discusses the problem of heat transfer in the bunker of active ventilation of seeds in the grain mass in contact with the vertical surface of the hopper. The purpose of the study is to establish the regularities of the heat transfer process, as well as to determine the influence of ambient temperature on the temperature in the specified area. To solve the problem of the propagation of thermal energy flow through the grain layer, a mathematical model has been constructed from the point of view of the theory of double diffusion. In the proposed version of the double diffusion heat transfer model, heat transfer occurs in two directions – both through the grain and through the voids between the grains in the layer. In addition, there is also a heat exchange between the grains and the air, and vice versa. The synthesized mathematical model is an effective tool for solving complex production tasks.

Keywords: *ventilated bunker, mathematical model, double diffusion, heat transfer, granary microclimate*

For citation: *Buneev S.S., Dobrin S.A., Shubkin S. Yu. Mathematical model of the dynamic process of heat transfer in a bunker with active ventilation. Agro-industrial technologies of Central Russia, 2024, no. 1(31), pp. 106-115. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2024-31-106-115>.*

Введение

В течение последних лет наблюдается неуклонный рост производства зерна в России, которое составляет от 110 до 135 миллионов тонн. Согласно Долгосрочной стратегии развития зернового сектора Российской Федерации, к 2035 году планируется достигнуть объема производства зерна в размере 140 миллионов тонн. Чтобы гарантировать сохранность зерна, минимальные мощности по хранению должны превышать объем собранного урожая на 20-30%, однако на данный момент они составляют примерно 120-146 миллионов тонн, что равнозначно общему объему собранного зерна.

Хранение зерна является неотъемлемой частью сложного процесса перемещения зерна от производителей к переработчикам. Рациональное управление процессом хранения зерна без порчи и с минимальной потерей качества, сохранение его жизнеспособности является одной из основных проблем на данном этапе [1, 2]. Где, как, когда и в какой степени применять этот контроль зависит от комбинации различных взаимодействующих факторов, начиная с первоначальных условий сбора урожая и заканчивая разгрузкой складского помещения. Считается, что влажность зерна в пределах 12-14% [4] оптимальна для длительного хранения, однако трудно добиться такого показателя из-за резких изменений погодных условий. Именно это обстоятельство привело к процессам сушки и охлаждения зерна путем аэрации для последующего оптимального хранения зерновой массы. Абиотические (температура, влажность и скорость воздушного потока) и биотические (зерно, насекомые, грибы и бактерии) факторы, постоянно взаимодействующие внутри зернохранилища, а также различные внешние факторы, включающие в себя, например, внешнее воздействие ветра, солнечного излучения, меняющихся погодных условий повлекли за собой создание различных конструкций складских помещений [3]. Как следствие из вышесказанного, изучение процесса хранения зерна повлекло за собой проектирование систем аэрации. При длительном хранении зерна важно правильно понимать физические и химические процессы, происходящие внутри зерновой массы. С увеличением вместимости зернохранилищ ручной сбор данных стал обязательным, что привело к неэффективности мониторинга текущих тепловых и физических явлений.

Из-за высокой теплопроводности стальных ограждений металлических зернохранилищ температура в верхнем и пристенном слое хранящегося зерна может достигать высоких значений – до 55 °С – под воздействием солнечного излучения, что снижает качество зерна. Последующее охлаждение зерна из-за ежедневных колебаний температуры наружного воздуха может вызвать конденсацию водяных паров на внутренних стенках зернохранилищ, приводя к увлажнению и порче пристенного слоя зерна [5, 6]. Требования к условиям хранения зерна в металлических зернохранилищах, которые обеспечивают его сохранность, указаны в нормативных документах и методических рекомендациях. Согласно этим документам, загрузка

и хранение свежееубранного зерна в металлических зернохранилищах без предварительной сушки и очистки запрещены.

Цель исследования заключается в изучении проблемы теплопереноса в бункере активного вентилирования зерна в зерновой массе, контактирующей с вертикальной поверхностью бункера посредством методов математического и компьютерного моделирования, а также в определении влияния температуры окружающей среды на температуру в этой области.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились в 2022-2023 гг. на базе агропромышленного института ЕГУ им. И. А. Бунина. На кафедре технологических процессов в машиностроении и агроинженерии ведется НИР по теме «Динамика, прочность и надёжность машин, агрегатов и промышленного технологического оборудования в агропромышленном комплексе», один из разделов которой посвящен оптимизации сельскохозяйственных процессов методами математического и компьютерного моделирования.

Объект исследования – процесс теплопереноса в бункере активного вентилирования зерновых культур.

Методологическую основу исследования составили методы математической физики, а также классические методы механики.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате исследований был проанализирован процесс теплопереноса в бункере активного вентилирования (см. рис.1).

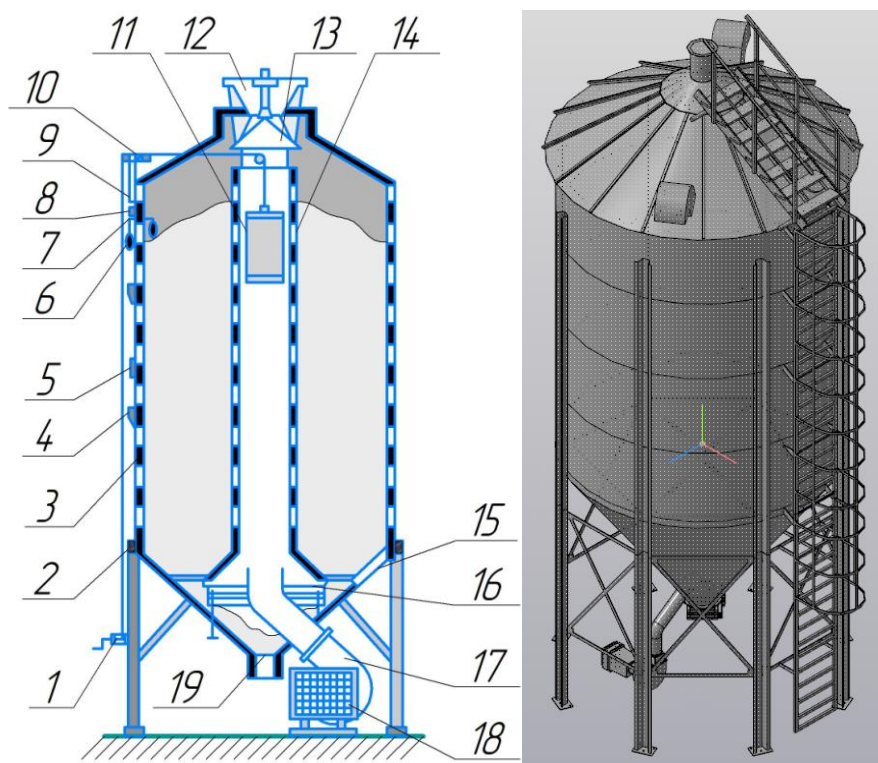


Рисунок 1. Бункер активного вентилирования типа БВ:

- 1 – лебедка; 2 – кольцевая рама; 3 – наружный цилиндр; 4 – пробоотборник;
5 – регулятор влажности; 6,7,8 – грузики; 9 – флажок; 10 – кронштейн с блоками;
11 – клапан; 12 – распределитель зерна; 13 – конус; 14 – внутренний цилиндр; 15 – люк;
16 – регулировочное кольцо; 17 – заслонка; 18 – вентилятор; 19 – электрокалорифер.

Бункер вентилируемый типа БВ предназначен для вентилирования и оперативного (кратковременного) хранения зерна (пшеницы, кукурузы, риса, ячменя и др.) и гранулированной продукции на сельскохозяйственных, заготовительных и зерноперерабатывающих предприятиях и эксплуатируется при температуре от - 30 до +40°C.

Бункер вентилируемый состоит из крыши в форме конуса, цилиндрического корпуса и конусного основания, имеющего угол в 45°. Крыша состоит из стальных оцинкованных сегментов, соединенных стропилами. Вверху крыша имеет круглое загрузочное отверстие и площадку с перилами (ограждениями). Цилиндрический корпус выполнен по кругу из стальных оцинкованных перфорированных листов, соединенных по вертикали двумя рядами болтов, а по горизонтали – одним. Конструкция выполнена из оцинкованных листов толщиной 0,8 мм. В основании бункера находится технологический люк. К стенам крепится наружная и внутренняя монтажная лестница.

Система выгрузки представляет собой конусное днище, состоящее из стальных сегментов на болтовых соединениях, в нижней части его по центру имеется выгрузное отверстие, через которое осуществляется разгрузка бункера в выгрузной шнек или транспортер, в зависимости от высоты опор бункера.

Прием зерна в бункеры осуществляется через загрузочный патрубок, находящийся в центре крыши бункера. Выгрузка зерна из бункера происходит самотёком через центральное отверстие, расположенное в конусном днище, которое оснащено ручным шибером.

Система активного вентилирования хранимого продукта включает в себя вентиляционные каналы в днище бункера и установленный снаружи бункера вентилятор.

Вентилятор состоит из следующих основных частей: корпуса, конфузора, крыльчатки, улитки рамы, перехода и фланца с сеткой.

В процессе изучения нестационарных тепловых процессов в системах обеспечения микроклимата активно используется термин «относительная избыточная температура». Этот термин позволяет обобщать и выражать в безразмерной форме результаты экспериментальных исследований различных тепловых процессов, что является его преимуществом. При рассмотрении переходных процессов в компонентах систем микроклимата с варьирующимся расходом воздуха (как в современных системах вентиляции и кондиционирования воздуха) возникает задача поиска универсального критерия для оценки и классификации таких процессов.

Применительно к бункерам активного вентилирования в [15] были получены следующие уравнения:

$$\Theta_x = t_0 - \Theta_u (t_0 - \Theta_0), \quad (1)$$

$$\Theta_x = \Theta_0 + \Theta_u b \tau, \quad (2)$$

где Θ_x – текущая температура зерна, К;

t_0 – начальная температура атмосферного воздуха, К;

Θ_u – относительная избыточная температура зерна, К;

Θ_0 – начальная температура зерна, К;

b – скорость изменения температуры атмосферного воздуха, К/с;

τ – продолжительность процесса, с.

Графическая интерпретация зависимостей (1) и (2) была получена с помощью системы символьных вычислений MathCad V.15 и представлена на рис. 2.

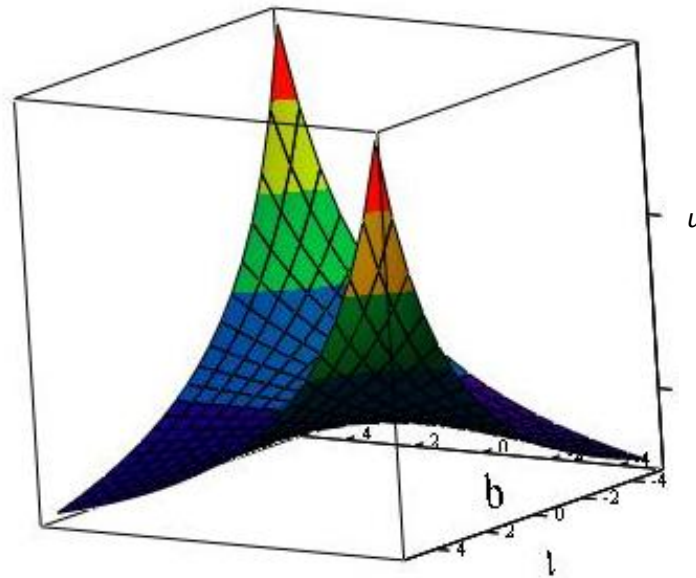


Рисунок 2. Зависимость относительной избыточной температуры от скорости изменения температуры атмосферного воздуха и продолжительности процесса.

Хорошо известно [16], что для описания диффузии в одномерной системе с градиентом концентраций вещества $\frac{\partial C}{\partial x}$ применяется уравнение, основанное на втором законе Фика, которое имеет следующий вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, D > 0, \quad (3)$$

где t – время, с; C – концентрация, кг/м³; D – коэффициент диффузии, м²/с.

Далее, для моделирования диффузии в среде, где существуют два различных направления диффузии, воспользуемся следующей системой уравнений для концентраций:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_1}{\partial t} = D_1 \Delta C_1 - K_1 C_1 + K_2 C_2 \\ \frac{\partial C_2}{\partial t} = D_2 \Delta C_2 + K_1 C_1 - K_2 C_2 \end{cases}, \quad (4)$$

где D_1 и D_2 – положительные коэффициенты диффузии, K_1 и K_2 положительные коэффициенты переноса концентрации [12], $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2}{\partial x_n^2}$ – оператор Лапласа (в нашем случае $n=1$). Эта связанная система называется моделью двойной диффузии.

Проиллюстрируем полученную нами модель теплопереноса с двойной диффузией.

Основное допущение, лежащее в основе этой модели, заключается в том, что каждая точка в объеме зерна занята как воздухом, так и зерном. Эта идея основывается на случайном распределении зерна по всему объему зерновой массы, и поскольку неизвестно занята ли конкретная точка воздухом или зерном, мы делаем допущение, что каждая точка занята и тем, и другим.

Также предполагается, что пыль, содержащаяся в зерновой массе, не оказывает существенного влияния на теплоперенос.

Рассмотрим тесно уложенную зерновую массу в контакте с вертикальной стеной зернохранилища таким образом, что каждая точка в зерновой массе соединена с каждой другой точкой либо зерном, либо воздухом. Предположим, что тепло распространяется как по воздуху, так и по зерну, как показано на рис. 3. Теплопередача тепла от зерна к зерну происхо-

дит через точку соприкосновения зерен, а передача тепла по другому направлению происходит через воздушные пустоты. В каждой точке зерновой массы мы имеем как температуру воздуха $T_g(x, t)$, так и температуру зерна $T_z(x, t)$. При этом получить фактическую температуру в данной точке можно применить, взяв среднее значение этих двух температур.

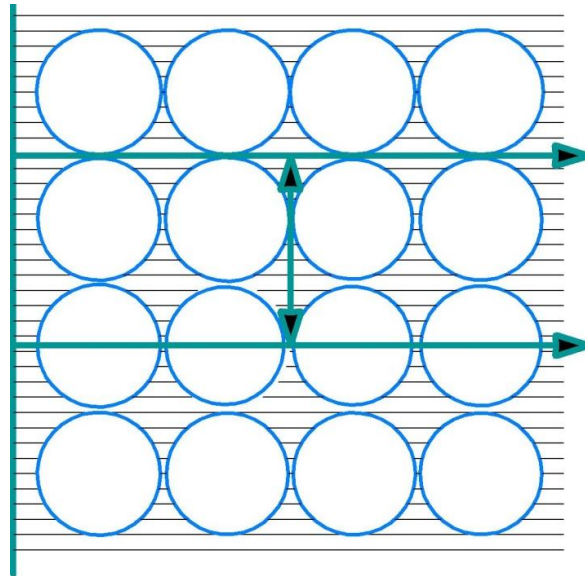


Рисунок 3. Схема распространения тепла в модели с двойной диффузией

Таким образом, фактическая температура $T(x, t)$ определяется следующим соотношением:

$$\frac{1}{2}(T_g(x, t) + T_z(x, t)), \quad (5)$$

В дополнение к теплу, распространяющемуся по воздушным и зерновым путям, мы предполагаем, что может происходить передача тепла от воздуха к зерну, и наоборот. Конвективные течения предполагаются пренебрежимо малыми, что позволяет анализировать такие ситуации.

Рассмотрим уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \Delta T = f(r, t), \quad (6)$$

где $f(r, t)$ – функция источников тепла, $\alpha = \frac{\kappa}{c_p \rho}$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; κ – теплопроводность, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$, c_p – изобарная удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для одномерного распространения тепла в декартовых координатах уравнение (4) принимает вид:

$$c_p \rho \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} - \kappa \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = f(x, t). \quad (7)$$

Далее, если $f(x, t)$ представляет собой тепло, потерянное/полученное в результате охлаждения, то для нее может быть записан закон стационарного процесса теплообмена. При неизменной температуре среды и площади поверхности тепловой поток определяется равенством:

$$f(x, t) = \alpha F(T(x, t) - T_1), \quad (8)$$

где F – поверхность теплообмена, m^2 ; T_1 – температура окружающей среды, К.

Подставляя выражение для $f(x, t)$ из (8) в (7) и учитывая (4), получим систему вида:

$$\begin{cases} c_6 \rho_6 \frac{\partial T_6(x, t)}{\partial t} - \kappa_6 \frac{\partial^2 T_6(x, t)}{\partial x^2} = \alpha F (T_6(x, t) - T_3) \\ c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3(x, t)}{\partial t} - \kappa_3 \frac{\partial^2 T_3(x, t)}{\partial x^2} = -\alpha F (T_6(x, t) - T_3) \end{cases}, \quad (9)$$

Введем обозначения:

$$\alpha_6 = \frac{\kappa_6}{c_6 \rho_6}, \alpha_3 = \frac{\kappa_3}{c_3 \rho_3}, k_1 = \frac{k_6}{\rho_6 c_6}, k_2 = \frac{k_3}{\rho_3 c_3}. \quad (10)$$

здесь α_6 и α_3 – температуропроводность воздуха и зерна соответственно, m^2/c ; T_6 – температура воздуха, К; T_3 – температура зерна, К; ρ_6, c_6 и ρ_3, c_3 – плотность ($кг/м^3$) и удельная теплоемкость ($Дж/(кг \cdot К)$) воздуха и зерна соответственно; k_6 и k_3 – коэффициенты теплоотдачи ($Вт/(м^2 \cdot К)$) из основного уравнения теплопроводности:

$$Q = k \Delta \bar{T} F t. \quad (11)$$

С учетом обозначений (8) система (7) примет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial T_6(x, t)}{\partial t} = \alpha_6 \frac{\partial^2 T_6(x, t)}{\partial x^2} - k_1 T_6(x, t) + k_1 T_3(x, t) \\ \frac{\partial T_3(x, t)}{\partial t} = \alpha_3 \frac{\partial^2 T_3(x, t)}{\partial x^2} - k_2 T_6(x, t) + k_2 T_3(x, t) \end{cases}, \quad (12)$$

Полученная система (12) является математической моделью теплопередачи с двойной диффузией.

Выводы

В результате аналитических исследований, с учетом определенных допущений, были получены следующие результаты:

1. Синтезирована математическая модель теплопередачи с точки зрения двойной диффузии в бункерах с активным вентилированием типа БВ; проиллюстрирована схема распространения тепла в бункерах типа БВ.

2. Получена графическая интерпретация зависимости относительной избыточной температуры от скорости изменения температуры атмосферного воздуха и продолжительности процесса.

Список источников

1. Агапов А.М. Обоснование параметров механизма контроля уровня зерна в бункерах активного вентилирования // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 3. С. 75-76.

2. Агапов М.А., Агапов А.М. Сушка семенного зерна в бункерах активного вентилирования // Научное обеспечение агропромышленного производства: материалы Международной научно-практической конференции, Курск, 29-31 января 2014 года. Том Часть 2. Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И.И. Иванова, 2014. С. 22-23.

3. Алексеева Л. и др. О хранении зерна в металлических силосах / Л. Алексеева, Н. Фомин, А. Лугарев, Г. Тяп, В. Господинова // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность. 1980. №4. С.41-43.
4. Бровенко В.И., Белоконь А.З., Джумагулова Г.Г. Изменение качества зерна пшеницы при хранении в металлических силосах // Труды ВНИИЗ. Москва: ЦНИИТЭИ Минзага СССР. 1983. Вып. 101. С.7-12.
5. Васильев А.Н., Джанибеков А.К. Как обеспечить предпосевную обработку семян в бункерах активного вентилирования с требуемым качеством // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 17-18 сентября 2014 года. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2014. С. 236-239.
6. Динаев И.М. Расчет энергетических параметров бункера активного вентилирования зерна // Инженерное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса России: Сборник научных трудов VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения Х.Г. Урусамбетова, Нальчик, 26-27 апреля 2018 года. Нальчик: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», 2018. С. 95-97.
7. Иванов А.Е., Савчук В.В. Эффективность функционирования бункера активного вентилирования как объекта автоматизации // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 1988. № 52. С. 117-121.
8. Иванов А.Е., Иванов А.М. Изменение неравномерности влажности зернового вороха в бункере активного вентилирования // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 1989. № 54. С. 109-115.
9. Лобанов В.И. Совершенствование конструкций бункеров активного вентилирования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2006. № 1(21). С. 37-40.
10. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа, 1967. 600с.
11. Пехович А.П., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Ленинград: Энергия. 1968. 304 с.
12. Пиляева О.В. Повышение эффективности воздухораспределительных систем бункеров активного вентилирования зерна: специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Красноярск, 2009. 126 с.
13. Северинов О.В., Васильев А.Н. Оценка эффективности усовершенствованного алгоритма управления сушкой зерна в бункерах активного вентилирования // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 3(18). С. 165-170.
14. Соловьев В.В. Бункер активного вентилирования на элеваторе // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 22 апреля 2019 года. Под общ. ред. Трушкина В.А. Саратов: ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2019. С. 201-204.
15. Сорочинский В. Хранение и сушка зерна: сложности и способы их устранения // Комбикорма. 2021. № 2. С. 27-30.
16. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов / Под ред. А.С.Гинзбурга. Москва: Пищевая пром-сть. 1975. 224 с.

References

1. Agapov A.M. Substantiation of the parameters of the grain level control mechanism in active ventilation bunkers. Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy, 2013, no. 3, pp. 75-76.
2. Agapov M.A., Agapov A.M. Drying of seed grain in active ventilation bunkers. Scientific support of agro-industrial production: materials of the International Scientific and Practical Confe-

rence, Kursk, January 29-31, 2014, volume Part 2. Kursk: Kursk State Agricultural Academy named after Professor I.I. Ivanov, 2014, pp. 22-23.

3. Alekseeva L. et al. On grain storage in metal silos. L. Alekseeva, N. Fomin, A. Lugarev, G. Tyan, V. Gospodinova. Flour milling and grain elevator and feed industry, 1980, no.4, pp.41-43.

4. Brovchenko V.I., Belokon A.Z., Dzhumagulova G.G. Changing the quality of wheat grain during storage in metal silos. Proceedings of VNIIZ. Moscow: TSNIITEI Minzaga USSR, 1983, issue 101, pp.7-12.

5. Vasiliev A.N., Dzhanibekov A.K. How to ensure pre-sowing seed treatment in active ventilation bunkers with the required quality. Innovative development of the agro-industrial complex of Russia based on intelligent machine technologies: Collection of scientific reports of the International Scientific and Technical Conference, Moscow, September 17-18, 2014. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Mechanization, 2014, pp. 236-239.

6. Dinaev I.M. Calculation of the energy parameters of the active grain ventilation hopper. Engineering support for the innovative development of the agro-industrial complex of Russia: Collection of scientific papers of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 75th anniversary of the birth of H.G. Urusmambetov, Nalchik, April 26-27, 2018. Nalchik: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov», 2018, pp. 95-97.

7. Ivanov A.E., Savchuk V.V. Efficiency of functioning of the active ventilation bunker as an object of automation. Technologies and technical means of mechanized production of crop production and animal husbandry, 1988, no. 52, pp. 117-121.

8. Ivanov A.E., Ivanov A.M. Change in the uneven moisture content of the grain pile in the active ventilation hopper. Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products, 1989, no. 54, pp. 109-115.

9. Lobanov V.I. Improving the designs of active ventilation bunkers. Bulletin of the Altai State Agrarian University, 2006, no. 1(21), pp. 37-40.

10. Lykov A.V. Theory of thermal conductivity. Moscow: High School, 1967. 600 p.

11. Pekhovich A.P., Zhidkikh V.M. Calculations of the thermal regime of solids. Leningrad: Energiya, 1968. 304 p.

12. Pilyaeva O.S. Increasing the effectiveness of the female bunker system of active ventilation under: specialization 05.20.01 «Technology and off-season environment»: dissertation on articulation at the technogenic degree of candidate of sciences. Krasnoyarsk, 2009. 126 p.

13. Severinov O.S., Vasiliev A.N. Evaluation of the effectiveness of an improved algorithm for controlling tray drying in active ventilation bunkers. Innovations in agriculture, 2016, no. 3(18), pp. 165-170.

14. Solovyov V.V. Bunker of active ventilation at the elevator. Actual problems of agroindustrial energy: Materials of the X national scientific and practical conference with international participation, Saratov, April 22, 2019. Under the general ed. Trushkina V.A. Saratov: LLC «Center for Social agroinnovations of SSAU», 2019, pp. 201-204.

15. Sorochinsky V. Grain storage and drying: difficulties and ways to eliminate them. Compound feed, 2021, no. 2, pp. 27-30.

16. Thermophysical characteristics of food products and materials. Edited by A.S. Ginzburg. Moscow: Food Industry, 1975. 224 p.

Информация об авторах

С.С. Бунеев – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технологических процессов в машиностроении и агроинженерии;

С.А. Добрин – аспирант;

С.Ю. Шубкин – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических процессов в машиностроении и агроинженерии.

Information about the authors

S.S. Buneev – Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the department of technological processes in mechanical engineering and agroengineering;

S.A. Dobrin – Postgraduate student;

S.Yu. Shubkin – Candidate of technical sciences, associate professor of the department of technological processes in mechanical engineering and agroengineering.