

Научная статья  
УДК 536.65:635.21:631.573

## РАСЧЕТ ТЕПЛОВЛАГООБМЕНА В СЛОЕ СОЧНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

<sup>1</sup>Анатолий Михайлович Моисеенко, <sup>2</sup>Юрий Алексеевич Кузнецов, <sup>3</sup>Игорь Николаевич Кравченко,  
<sup>2</sup>Светлана Юрьевна Гришина, <sup>2</sup>Владимир Владимирович Гончаренко,  
<sup>4</sup>Алексей Иванович Купреенко

<sup>1</sup>АНОО ВО «Воронежский экономико-правовой институт», Филиал в г. Орел, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина, Орел, Россия

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию теплообмена в картофелехранилищах с системой активного вентилирования при навалной загрузке сочного растительного сырья. Целью данной работы является разработка методов теплотехнического расчета хранилищ путем решения сопряженных задач нестационарного тепло- и массообмена, выяснение возможностей активного воздействия на тепловлажностные процессы в насыпи хранимой продукции. Проведены теоретические и экспериментальные исследования в зданиях по хранению сочной сельскохозяйственной продукции с целью уменьшения потерь хранимого сырья. Предложена математическая модель исследования нестационарного процесса теплообмена в биологической продукции, находящейся в хранилище. Реализация математической модели осуществлялась аналитическим и численным методами. Установлено, что снижение степени черноты поверхностей покрытия позволяет сократить максимальные конвективные потоки тепла, поступающие в воздух верхней зоны хранилища на 40%. Снижение максимальной температуры на поверхности продукции позволит оптимизировать энергетические расходы на охлаждение слоя за счет сокращения продолжительности работы систем охлаждения и вентиляции, что приведет к уменьшению потерь сырья за период хранения.

**Ключевые слова:** математическая модель, картофелехранилище, температура, процессы теплообмена, численное решение, поверхность покрытия, конвективные потоки тепла, насыпь, сочная продукция

**Для цитирования:** Расчет теплообмена в слое сочной сельскохозяйственной продукции А.М. Моисеенко, Ю.А. Кузнецов, И.Н. Кравченко и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 6 (106). С. 64-70.

### Original article

## CALCULATION OF HEAT AND MOISTURE EXCHANGE IN THE LAYER OF JUICY AGRICULTURAL PRODUCTS

<sup>1</sup>Anatoly M. Moiseenko, <sup>2</sup>Yury A. Kuznetsov, <sup>3</sup>Igor' N. Kravchenko, <sup>2</sup>Svetlana Yu. Grishina,  
<sup>2</sup>Vladimir V. Goncharenko, <sup>4</sup>Alexei I. Kupreenko

<sup>1</sup>Voronezh Economic and Legal Institute, Branch in Oryol, Russia

<sup>2,5</sup>Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Oryol, Russia

<sup>3</sup>Russian State Agrarian University – Moscow State Agricultural Academy  
named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Kokino, Russia

**Abstract.** The work is devoted to research of heat and moisture exchange in potato storage with an active ventilation system during bulk loading of succulent plant raw materials. The purpose of this work is to develop methods for thermotechnical calculation of storage facilities by solving related problems of non-stationary heat and mass transfer, to clarify the possibilities of actively influencing heat and moisture processes in the embankment of stored products. Theoretical and experimental researches were carried out in buildings for the storage of succulent agricultural products in order to reduce losses of stored raw materials. A mathematical model for research the non-stationary process of heat and moisture exchange in biological products located in storage is proposed. The implementation of the mathematical model was carried out using analytical and numerical methods. It has been established that reducing the degree of blackness of the coating surfaces makes it possible to reduce the maximum convective heat fluxes entering the air in the upper zone of the storage facility by 40%. Reducing the maximum temperature on the surface of the product will optimize the energy costs for cooling the layer by reducing the operating time of the cooling and ventilation systems, which will lead to a reduction in losses of raw materials during the storage period.

**Key words:** mathematical model, potato storage, temperature, heat and moisture exchange processes, numerical solution, coating surface, convective heat flows, embankment, succulent products.

**For citation:** Calculation of heat and moisture exchange in the layer of juicy agricultural products / A.M. Moiseenko, Yu.A. Kuznetsov, I.N. Kravchenko, etc. // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2024. 6 (106). 64-70.

**Введение.** Одной из причин высоких потерь сочного растительного сырья (овощей, фруктов, картофеля) при хранении является недостаточная изученность процессов тепло- и влагообмена в хранилищах и насыпи сырья, неумение правильно воздействовать на них [1-11]. В зданиях по хранению сочной продукции необходимо обеспечивать требуемые температурно-влажностные режимы, как в насыпи сырья, так и в самих помещениях. Вентиляция - очень важное условие для нормального хранения картофеля. Для предотвращения отпотевания верхнего слоя насыпи необходимо выровнять температуру в хранилище и в насыпи путем обогрева электрокалориферами ее верхней зоны. При этом в верхнем слое температура воздуха над насыпью должна быть выше на 1–2°C, чем в насыпи [4]. При недостатке кислорода мякоть клубней чернеет. Вентиляцией регулируют все факторы, влияющие на хранение - температуру, влажность и воздухообмен [12].

В клубнях и другом сочном сырье содержится от 60 до 95 % воды [13-15]. Высокая влажность внутреннего воздуха и малые скорости потока снижают потери влаги. Поэтому, например, в картофелехранилищах необходимо поддерживать влажность около 95-98%. Высокая скорость вентилирующего воздуха, особенно когда он имеет низкую относительную влажность, ускоряет сушку.

Для хранения фруктов, овощей и картофеля достаточно часто применяют наземные и заглубленные (полузаглубленные) хранилища. Наземные хранилища отличают большие энергозатраты на обогрев и вентилирование в зимний период хранения продукции. В заглубленных (полузаглубленных) хранилищах эти затраты, как правило, в 1,5-2 раза ниже [1, 3, 4].

Бункерные хранилища начала строить в 60-х годах прошлого века фирма «Ябельман» (Германия). Также они были построены в Польше, Чехии [16]. В России подобные хранилища полузаглубленного типа, вместимостью около 10 тыс. т. впервые появились в Орле и Брянске [17].

В России применяется как контейнерное хранение картофеля [18], так и навалное. Однако существенные недостатки контейнерного хранения заставили отказаться от этого способа [6].

Во Франции ограждения картофелехранилища имеют толщину 290 мм и содержат термоизоляционный и водоотталкивающий слой. Максимальная высота насыпи, как правило, составляет 3-3,5 м [6, 16].

В Чехии при навальном способе хранения (рис.1) применяют вентиляцию под давлением. Для продовольственного картофеля в основной период хранения поддерживают температуру около 2,5-4 °С и относительную влажность 87-90 %. Этот период продолжается 140-230 дней [6, 16]. Общая тенденция в строительстве хранилищ в европейских странах [6] заключается в укрупнении помещений для хранения сочного сырья: от 1 до 25 тыс. т.

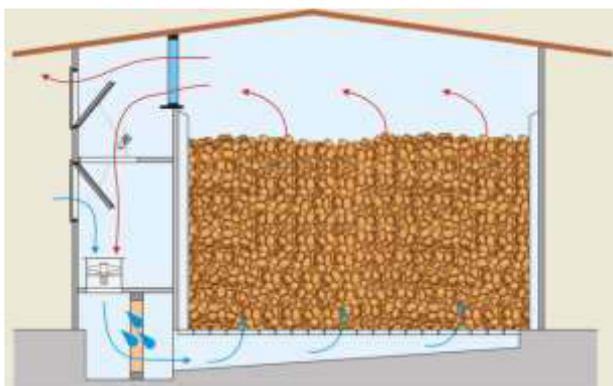


Рисунок 1 - Схема хранилища с навальным способом хранения картофеля

Необходимость создания рациональных конструкций выдвигает задачу совершенствования теплотехнического расчета хранилищ.

Вопросы теплоустойчивости ограждения и помещения для картофелехранилища представлены в работе [19]. Рассмотрена система двух уравнений теплопроводности для ограждения и насыпи картофеля с начальными условиями и граничными условиями 1-го рода. Данную математическую модель необходимо уточнить с учетом влияния на теплоустойчивость картофелехранилищ различных факторов.

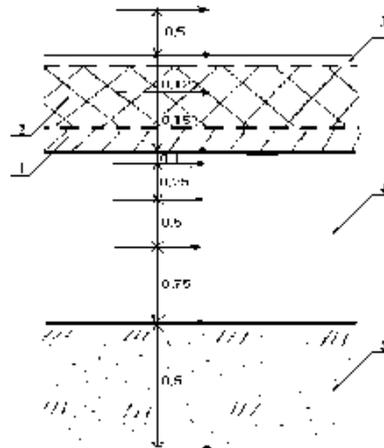
В процессе вентиляции градиенты температуры по высоте насыпи картофеля достигают 1,5-1,7 °С/м, которые интенсифицируют потерю им влаги [20]. Требуемая влажность подаваемого воздуха обеспечивается конденсационными теплообменниками, которые утилизируют влагу из отработанного вентиляционного воздуха и возвращают ее в вентиляционные установки [1, 5].

Разработку мероприятий, направленных на совершенствование технологий хранения продукции можно существенно упростить, уточнить и улучшить с помощью методов математического моделирования [21, 22].

**Целью исследований** явилось построение более совершенной математической модели процессов теплообмена в насыпи хранимой сочной продукции и в хранилище.

**Материалы и методы.** Натурные исследования были проведены в картофелехранилище, расположенном в совхозе «Куликовский» Орловской области Российской Федерации. Измерения производились круглосуточно, через каждые три часа.

Натурные исследования проводились в зимний период (февраль). Схема расположения термомпар показана на рисунке 2.



1 – термомпара 2 – датчик теплового потока ИТП-МГ4.03/Х(Ш) «Поток»

Рисунок 2 - Схема установки термомпар в опытном хранилище:

1 – железобетонная плита, 2 – утеплитель (минераловатные плиты), 3 – кровельный слой (рубероид), 4 – верхняя воздушная зона между насыпью и покрытием, 5 – насыпь хранимой продукции

Температура в хранилище измерялась между насыпью картофеля и покрытием в верхней зоне. Измерения осуществлялись с помощью термодатчиков, установленных по высоте (рис. 2).

Для измерения теплотерь через наружные ограждения использовался измеритель плотности тепловых потоков ИТП-МГ4.03/Х(Ш) «Поток» (Россия).

Математическая модель исследуемого явления [22] состоит из уравнений теплопроводности для трехслойной ограждающей конструкции (покрытия или стены) (1), слоя сельскохозяйственной продукции (2), уравнения энергии для воздуха (3), подаваемого в насыпь, дифференциального уравнение массопереноса в воздухе внутри насыпи (4) а также начальных (5) и граничных (6) – (10) условий:

$$\frac{\partial t_j}{\partial \tau} = a_j \frac{\partial^2 t_j}{\partial x^2}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_4}{\partial \tau} = \frac{a_4}{1-m} \frac{\partial^2 t_4}{\partial x^2} + \frac{q}{c} - \beta_2(t_4 - t) - \frac{q_n \beta_m S \varepsilon_u E}{\rho_n c_4} [f(t_4) - d] \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v \frac{\partial t}{\partial x} = \beta_1(t_4 - t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial d}{\partial \tau} + v \frac{\partial d}{\partial x} = \frac{D}{m} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \frac{\beta_m S \varepsilon_u E}{\rho_s m} [f(t_4) - d] \quad (4)$$

$$\tau = 0; \quad t_1 = t_{10}, \quad t_2 = t_{20}, \quad t_3 = t_{30}, \quad t_4 = t_{40}, \quad t = t_0, \quad d = d_0 \quad (5)$$

$$x = 0; \quad \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} = \alpha_n (t_1 - t_{cp}) \quad (6)$$

$$x = \delta_j; \quad \lambda_j \frac{\partial t_j}{\partial x} = \lambda_{j+1} \frac{\partial t_{j+1}}{\partial x}, \quad t_j = t_{j+1}, \quad j = 1, 2 \quad (7)$$

$$x = \delta_3; \quad -\lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} = \alpha_n (t_3 - \eta(\tau)) + \alpha_{k_1} (t_3 - t_g) \quad (8)$$

$$x = \delta_4; -\lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} = \alpha_n (\xi(\tau) - t_4) - \alpha_{k_2} (t_4 - t_e), \frac{\partial d}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$x = L; t_4 = t = t_0, d = d_1, \quad (10)$$

где  $t_1(x, \tau)$  – температура, °С;  $x$  – координата, м;  $\tau$  – время, с;  $a_i$  – коэффициент теплопроводности внешнего слоя покрытия (стены), м<sup>2</sup>/с;  $S$  – удельная поверхность насыпи, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\rho_B$  и  $\rho_H$  – плотность воздуха и продукции, кг/м<sup>3</sup>;  $c_B$  и  $c_H$  – удельная теплоемкость воздуха и продукции, Дж/(кг·°С);  $m$  – пористость насыпи, доли единиц;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена между продукцией и воздухом внутри насыпи, который определяется формой, размером включений, физическими свойствами, скоростью воздуха, принимаемый в виде:  $\alpha = 0,8 + 15\sqrt{v}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $t_4(x, \tau)$  – температура продукции, °С;  $a_4$  – коэффициент теплопроводности продукции, м<sup>2</sup>/с;  $\frac{q}{c}$  – постоянно действующий источник тепла, общее количество которого, исходя из уравнения Гора:  $\frac{dq}{d\theta} = bq$ ,  $q = q_0 \exp b\theta$ , где  $q_0$  – количество тепла, выделяемого при 0°С, Вт/кг;  $b$  – температурный коэффициент, характеризующий скорость распада веществ в сырье, 1/°С;  $\theta$  – температура сырья, °С;  $c$  – удельная теплоемкость сырья, Дж/кг·°С;  $f(t_4)$  – функция равновесного влагосодержания воздуха от температуры на интервале возможного изменения  $t_4$  температуры продукции;  $q_n$  удельная теплота парообразования, кДж/кг;  $\beta_m$  коэффициент массообмена, кг/(м<sup>2</sup>·Па·с);  $S$ ,  $\varepsilon_u$  коэффициент испарительной способности продукции, доли единиц,  $E = 161332$  – переводной коэффициент, Па;  $\rho_n, \rho_e, c_4$  удельная теплоемкость продукции, кДж/(м<sup>3</sup>·°С);  $d$  – влагосодержание воздуха кг/кг;  $D$  – коэффициент диффузии влаги в воздухе, м<sup>2</sup>/с;  $t_{10}, t_{20}, t_{30}, t_{40}, t_0$  – постоянные значения температур, °С;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  – коэффициенты теплопроводности соответственно кровельного слоя покрытия, утеплителя, слоя несущей конструкции, насыпи продукции, Вт/(м·°С); граница  $x = 0$  наружная поверхность ограждения, граница  $x = \delta_1$  – между кровельным слоем и утеплителем,  $x = \delta_2$  – между утеплителем и несущей конструкцией,  $x = \delta_j$  – внутренняя поверхность ограждения,  $x = \delta_4$  – верхняя поверхность насыпи, соприкасающаяся с внутренним воздухом,  $x = L$  – нижняя поверхность насыпи;  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С),  $t_{cp}, t_e$  – температуры соответственно наружного и внутреннего воздуха хранилища, °С,  $\alpha_{k_1}$  и  $\alpha_{k_2}$  – конвективные коэффициенты теплообмена соответственно внутренней поверхности ограждения и поверхности насыпи продукции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С),  $\alpha_n$  – коэффициент лучистого теплообмена между внутренней поверхностью ограждения и поверхностью насыпи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С),  $t_0$  – на границе  $x = L$  постоянное значение температуры насыпи продукции и вентилирующего воздуха, °С,  $d_1$  – на границе  $x = L$  постоянное значение влагосодержания  $d$ , кг/кг.

Аналитически краевая задача (1) – (10) решается методом интегрального преобразования Лапласа.

Для численного решения этой краевой задачи применяется метод сеток [31], т.е. всю исследуемую область, кроме воздушной зоны между покрытием и поверхностью продукции, разбиваем на конечное число точек  $x_i$  ( $i = 0, 1, \dots, N$ ), называемых узлами сетки, с шагом  $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ . Далее систему дифференциальных уравнений вместе с начальными и граничными условиями представляем в конечноразностном виде, используя неявную двухслойную схему, т.е., например для температур, функции непрерывных аргументов  $t_1(x, \tau), t_2(x, \tau), t_3(x, \tau), t_4(x, \tau), t(x, \tau)$  заменяем сеточными функциями дискретных аргументов  $T1_i^j, T2_i^j, T3_i^j, T4_i^j, T_i^j$ , где  $\tau_j = j\Delta\tau$  – временной слой ( $j = 0, 1, 2, \dots$ ),  $\Delta\tau$  – шаг по времени, (с).

Каждое разностное уравнение с соответствующими к ним граничными условиями решается методом прогонки [24].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Результаты вычислений, проведенных на ПЭВМ, для температур  $t_{3|x=\delta_3}$  и  $t_{4|x=\delta_4}$  в различные моменты времени сведены в таблицу 1, из которой

видно, что отличие между аналитическим и численным решением составляет  $\approx 3\%$ , что говорит о достоверности полученных результатов.

Таблица 1 - Расчетные значения температур на внутренней поверхности покрытия  $t_{3|x=\delta_3}$  и на поверхности слоя продукции  $t_{4|x=\delta_4}$  в различные моменты времени  $\tau$

t, °C $\tau$ , ч	$t_{3 x=\delta_3}$		$t_{4 x=\delta_4}$	
	аналитические	численные	аналитические	численные
1	2,18	2,12	2,22	2,14
12	2,96	3,07	2,58	2,74
24	5,72	5,97	4,20	4,32
36	5,58	5,74	4,39	4,51

Конкретные расчеты проведены для наземного картофелехранилища с температурой внутреннего воздуха  $t_g = 2^\circ\text{C}$ .

Максимальные конвективные потоки тепла  $q_{\max}$ , поступающие в воздух верхней зоны хранилища (табл. 2), зависят от значений амплитуды суточных колебаний температуры  $t_3|x=\delta_3$  и  $t_4|x=\delta_4$ .

Таблица 2 - Зависимость максимального конвективного потока и максимальной суточной температуры поверхности слоя продукции от степени черноты поверхностей покрытия

Степень черноты внешней поверхности покрытия, $\varepsilon_1$	0,9	0,9	0,5
Степень черноты внутренней поверхности покрытия, $\varepsilon_2$	0,9	0,3	0,3
Максимальный конвективный поток ( $q_{\max}$ ), Вт/м <sup>2</sup>	19,42	17,72	12,56
Максимальная суточная температура поверхности слоя продукции ( $t_{4\max}$ ), °C	5,08	4,86	4,25
Термическое сопротивление покрытия (R), м <sup>2</sup> °C /Вт	3,02		

Результаты измерений температур в зимний период хранения продукции приведены в виде графиков зависимости температуры от времени (рис. 3). Температура откладывалась вдоль оси у в °C, а время, измеренное в течение 3-х суток – вдоль оси x в ч.

Слой картофеля на глубине 0,5 м имел температуру  $t_4$  от 2 до 3°С.

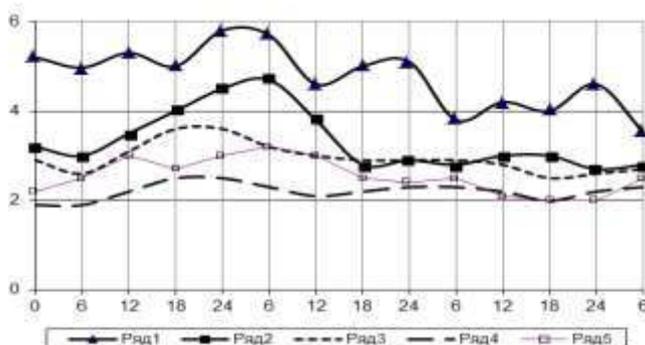


Рисунок 3 - Графики изменения температуры воздуха в верхней зоне хранилища  $t_{возд}^e$  (ряд 1), на поверхности насыпи картофеля  $t_{4|x=\delta_4}$  (ряд 2), массы картофеля на глубине 0,5 м от поверхности насыпи (ряд 5), - экспериментальная кривая (ряд 4); ----- - расчетная кривая (ряд 3)

Рисунок 3 показывает, что теория удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, что свидетельствует о применимости модели при проектировании хранилищ в различных климатических зонах строительства и их эксплуатации.

**Заключение.** Получена математическая модель процесса теплообмена в системе «наружный воздух-ограждение-внутренний воздух хранилища-экзотермический слой сырья».

Используя преобразования Лапласа по временной координате получено аналитическое решение задачи теплоустойчивости трехслойного ограждения с учетом сложного теплообмена.

На основе конечно-разностного метода предложено численное решение нестационарной задачи теплообмена хранилищ корнеклубнеплодов. Получено поле температур на внутренней поверхно-

сти покрытия и поверхности насыпи продукции в зависимости от времени хранения при различной толщине утеплителя.

Установлено, что фазы колебаний температуры на внутренней поверхности ограждения и температуры на поверхности насыпи практически совпадают; а сдвиг по фазе по сравнению с колебаниями наружного воздуха увеличивается с ростом толщины утеплителя.

Снижение степени черноты поверхностей покрытия позволяет сократить максимальный конвективный поток теплоты на 40 %. Снижение температуры на поверхности продукции уменьшит энергетические расходы на охлаждение хранимого слоя продукции за счет сокращения продолжительности работы системы вентиляции хранилища.

#### Список источников

1. Инновационные технологии и оборудование для сортировки и хранения картофеля: аналит. обзор / В.Ф. Федоренко, В.И. Старовойтов, О.А. Старовойтова и др. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. 84 с.
2. Мальцев С.В., Пшеченков К.А., Зейрук В.Н. Влияние химических и физических методов воздействия на клубни картофеля различного назначения при хранении // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. Обнинск, 2018. С. 285-289.
3. Конкурентоспособные технологии семеноводства, производства и хранения картофеля / О.А. Старовойтова, С.В. Жевора, В.И. Старовойтов и др. М., 2018. 236 с.
4. Современные технологии хранения картофеля / К.А. Пшеченков, С.В. Мальцев, В.Н. Зейрук и др.; под общ. ред. Б.В. Анисимова. Чебоксары: Всерос. науч.-исслед. ин-т картофельного хозяйства им. А.Г. Лорха, 2017. 25 с.
5. Колошеин Д.В. Разработка устройства и обоснование параметров усовершенствованного воздуховода картофелехранилища // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2017. № 3 (35). С. 123-127.
6. Анализ технологий хранения картофеля в странах Евросоюза и США / Д.В. Колошеин, Н.Ю. Харламова, Р.И. Сизов и др. // Молодой ученый. 2017. № 2. С. 113–115.
7. Жихарев А.А. Уменьшение потерь картофеля при хранении // Главный агроном. 2017. № 2. С. 67-72.
8. Балужева Н.П., Немирова Н.А. Сортовые особенности лежкости клубней картофеля в центральной зоне Курганской области // Научно-инновационные технологии как фактор устойчивого развития агропромышленного комплекса: материалы Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. Курган, 2020. С. 21-24.
9. Жолобова М.С., Карамеева К.А. Современные технологии хранения овощей // Молодежь и наука. 2019. № 10-11. С. 14.
10. Гришина С.Ю., Гришин А.В. Исследования микроклимата при стимуляции семян инфракрасным излучением // Современные проблемы обеспечения экологической безопасности: сб. материалов Всерос. очно-заочной науч.-практ. конф. с междунар. участием. Орел, 2017. С. 106-110.
11. Stimulation of tomato seeds by infrared radiation / S.Yu. Grishina, Yu.A. Kuznetsov, L.I. Goltsova et al. // Agricultural and Mechanical Engineering. 2017. S. 49-54.
12. Колчин Н.Н., Фомин С.Л. Хранение картофеля: состояние и перспективы развития // Картофель и овощи. 2006. № 1. С. 28–31.
13. Драная Е.В., Мушинский А.А. Сравнительная оценка сортов и гибридов картофеля для почвенно-климатических условий Оренбургской области // Аграрный научный журнал. 2024. № 3. С. 17–22.
14. Васильев А.А., Дергилева Т.Т., Дергилев В.П. Оценка адаптивного потенциала белорусских сортов картофеля в условиях Челябинской области // Аграрный вестник Урала. 2021. № 4 (207). С. 17–23.
15. Балужева Н.П., Немирова Н.А. Сортовые особенности лежкости клубней картофеля в центральной зоне Курганской области // Научно-инновационные технологии как фактор устойчивого развития агропромышленного комплекса: материалы Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. Курган, 2020. С. 21-24.
16. Литун Б.П., Замотаев А.И., Андришина Н.А. Картофелеводство зарубежных стран. М.: Агропромиздат, 1988. 167 с.
17. Екимов С.П. Надежное хранилище // Сельское хозяйство. 1987. № 2. С. 25-28.
18. Васильева И.Г. Повышение эффективности хранения сельскохозяйственных продуктов на объектах общественного питания // Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. № 8. С. 19-21.
19. Гиндоян А.Г., Файнштейн В.А., Иванова Н.Н. Влияние временного отключения энергоснабжения систем обеспечения микроклимата на тепловой режим в картофелехранилищах // Холодильная техника. 1986. № 9. С. 20–24.
20. Екимов С.П., Кондрашов В.И., Моисеенко А.М. Охлаждение очагов самосогревания клубней картофеля при навальном хранении // Холодильная техника. 1986. № 11. С. 15-19.

21. Математическая модель процесса комбинированной сушки товарного зерна в установках конвейерного типа / Е.А. Четвериков, К.М. Усанов, А.В. Волгин и др. // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 171–176.

22. Кондрашов В.И., Моисеенко А.М. Математическое моделирование теплового состояния овощекртофелехранилищ с многослойным внешним ограждением при отключении систем энергоснабжения // Доклады РАСХН. 2003. № 3. С. 50–52.

23. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Изд. Бином, 2015. 636 с.

24. Тынкевич М.А., Пимонов А.Г. Введение в численный анализ: учеб. пособие. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2017. 176 с.

25. Технология Restrain: оптимизация атмосферы для качественного хранения картофеля и лука [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://arknews.su/article/213/1347/> (дата обращения: 17.05.2024).

26. Вентиляционное оборудование для овощехранилищ (МикроКлимат) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://ckbagro.ru/razdely-ckb-agro/oborudovanie-dlya-ovoshchekhranilishcha/production/> (дата обращения: 08.05.2024).

#### **Информация об авторах:**

**А.М. Моисеенко** – доктор технических наук, профессор кафедры экономической информатики, АНОО ВО «Воронежский экономико-правовой институт», Филиал в г. Орел, [puare54@yandex.ru](mailto:puare54@yandex.ru).

**Ю.А. Кузнецов** - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры надежности и ремонта машин, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина, [kentury@yandex.ru](mailto:kentury@yandex.ru).

**И.Н. Кравченко** - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования, ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru).

**С.Ю. Гришина** - кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры цифровой экономики и информационных технологий, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина, [Svetlana.Grischina@rambler.ru](mailto:Svetlana.Grischina@rambler.ru).

**В.В. Гончаренко** - кандидат технических наук, доцент, заместитель декана факультета агротехники и энергообеспечения, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина, [vovaniiii@bk.ru](mailto:vovaniiii@bk.ru).

**А.И. Купреенко** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, [kupreenkoai@mail.ru](mailto:kupreenkoai@mail.ru).

#### **Information about the authors:**

**A.M. Moiseenko** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Economic Informatics, Voronezh Economics and Law Institute, Branch in Orel, [puare54@yandex.ru](mailto:puare54@yandex.ru).

**Yu.A. Kuznetsov** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Reliability and Machine Repair, Orel State Agrarian University named after. N.V. Parakhin, [kentury@yandex.ru](mailto:kentury@yandex.ru).

**I.N. Kravchenko** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru).

**S.Yu. Grishina** - candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor of the department of digital economics and information technologies, Orel State Agrarian University named after. N.V. Parakhin, [Svetlana.Grischina@rambler.ru](mailto:Svetlana.Grischina@rambler.ru).

**V.V. Goncharenko** - candidate of technical sciences, associate professor, deputy dean of the faculty of agricultural technology and energy supply, Orel State Agrarian University named after. N.V. Parakhin, [vovaniiii@bk.ru](mailto:vovaniiii@bk.ru).

**A.I. Kupreenko** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of technological equipment of animal husbandry and processing industries, Bryansk State Agrarian University, [kupreenkoai@mail.ru](mailto:kupreenkoai@mail.ru).

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

**Статья поступила в редакцию 11.10.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024, принята к публикации 28.11.2024.**

**The article was submitted 11.10.2024; approved after reviewing 08.11.2024; accepted for publication 28.11.2024.**

© Моисеенко А.М., Кузнецов Ю.А., Кравченко И.Н., Гришина С.Ю., Гончаренко В.В., Купреенко А.И.