

УДК 631.365.29

4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ  
ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РЕЖИМОВ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ  
ОБРАБОТКИ СЕМЯН ИМПУЛЬСНЫМ  
ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В  
БУНКЕРНО-КОНВЕЙЕРНОМ УСТРОЙСТВЕ**

Воложанинов Сергей Сергеевич  
канд. техн. наук, доцент  
РИНЦ SPIN-код: 1333-7600  
Scopus Author ID: 57218094232  
ID РИНЦ: 891361  
ORCID: 0000-0002-6686-1220  
s.volozhaninov@mail.ru  
*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный  
университет имени В.И. Вернадского»,  
Симферополь, Россия*

Завалий Алексей Алексеевич  
д-р. техн. наук, доцент  
РИНЦ SPIN-код: 3604-5109  
Scopus Author ID: 57214120527  
ID РИНЦ: 784509  
ORCID: 0000-0002-0806-1110  
zavalym@mail.ru  
*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный  
университет имени В.И. Вернадского»,  
Симферополь, Россия*

Шиян Ольга Владимировна  
канд. физ.-мат. наук  
РИНЦ SPIN-код: 6887-2122  
ID РИНЦ: 800482  
ORCID: 0009-0009-1383-1704  
olgshiyana@yandex.ru  
*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный  
университет имени В.И. Вернадского»,  
Симферополь, Россия*

Основной целью исследования является определение режимных параметров процесса импульсной инфракрасной сушки в бункерно-конвейерном устройстве с возможностью установления взаимосвязи между теплофизическими свойствами семян, технологическими и конструктивными параметрами устройства посредством применения расчетно-теоретических моделей. Моделирование проводилось для процесса сушки семян пшеницы, горчицы и кориандра. В результате моделирования установлено, что сушка может осуществляться при удельном тепловом потоке от 4000 до 8000 Вт/м<sup>2</sup>, скважности от 0,8 до 0,9 при скорости движения

UDC 631.365.29

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

**COMPUTATIONAL AND THEORETICAL  
SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGICAL  
MODES OF POST-HARVEST SEED  
TREATMENT BY PULSED INFRARED  
RADIATION IN A HOPPER CONVEYOR  
DEVICE**

Volozhaninov Sergey Sergeevich  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
RSCI SPIN code: 1333-7600  
Scopus Author ID: 57218094232  
RSCI ID: 891361  
ORCID: 0000-0002-6686-1220  
s.volozhaninov@mail.ru  
*FSAEI HE «V.I. Vernadsky Crimean Federal  
University», Simferopol, Russia*

Zavaliy Alexey Alekseevich  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
RSCI SPIN code: 3604-5109  
Scopus Author ID: 57214120527  
RSCI ID: 784509  
ORCID: 0000-0002-0806-1110  
zavalym@mail.ru  
*FSAEI HE «V.I. Vernadsky Crimean Federal  
University», Simferopol, Russia*

Shiyan Olga Vladimirovna  
Candidate of Physical and Mathematical Sciences  
RSCI SPIN code: 6887-2122  
RSCI ID: 800482  
ORCID: 0009-0009-1383-1704  
olgshiyana@yandex.ru  
*FSAEI HE «V.I. Vernadsky Crimean Federal  
University», Simferopol, Russia*

The main purpose of the study is to determine the operating parameters of the pulsed infrared drying process in a hopper conveyor device with the possibility of establishing a relationship between the thermophysical properties of seeds, technological and design parameters of the device through the use of computational and theoretical models. The simulation was carried out for the drying process of wheat, mustard and coriander seeds. As a result of the simulation, it was found that drying can be carried out with a specific heat flow from 4000 to 8000 W/m<sup>2</sup>, a borehole from 0.8 to 0.9 with a conveyor belt speed from 0.07 to 0.2 m/s, depending on the seeds being processed

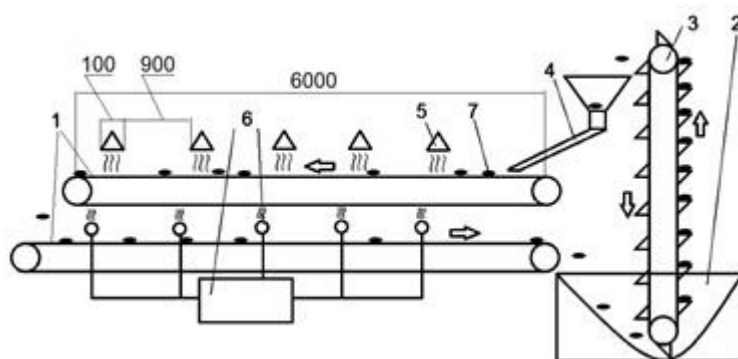
ленты конвейера от 0,07 до 0,2 м/с в зависимости от обрабатываемых семян

Ключевые слова: БУНКЕРНО-КОНВЕЙЕРНОЕ УСТРОЙСТВО, СЕМЕНА, СУШКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Keywords: HOPPER CONVEYOR DEVICE, SEEDS, DRYING, MODELING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-209-009>

**Введение.** Бункерно-конвейерное устройство, схема которого представлена на рисунке 1, предназначено для щадящей послеуборочной и предпосевной обработки семенного материала инфракрасным и ультрафиолетовым излучением [1, 2]. Послеуборочная обработка включает в себя снижение влажности семян до значений 7-8%, обеспечивающей длительное хранение семенного материала без его порчи, аспирацию мелкодисперсных частиц с поверхности семян в процессе их сушки, обеззараживание поверхности семян под действием инфракрасного и ультрафиолетового излучения [3, 4].



1 – горизонтальный ленточный конвейер; 2 – бункер-накопитель; 3 – вертикальный конвейер (нория); 4 – устройство раскладки семян на ленту горизонтального конвейера; 5 – инфракрасные излучатели; 6 – система вентиляции; 7 – семена

Рисунок 1 – Схема бункерно-конвейерного устройства обработки семян

Процесс обработки семян состоит из загрузки семян в бункер-накопитель, подачи семян вертикальным конвейером (норией) и устройством раскладки семян на ленту горизонтального конвейера, облучения движущегося по горизонтальному конвейеру слоя семян

инфракрасным и ультрафиолетовым излучением, генерируемым расположенными поперёк ленты горизонтального конвейера линейными инфракрасными излучателями и ультрафиолетовым излучателем, ссыпания семян на ленту горизонтального конвейера обратного хода, ссыпания обработанных семян в бункер-накопитель. Процесс обработки выполняется до тех пор, пока семена в бункере-накопителе не получат требуемые кондиции по содержанию влаги. После обработки семена вертикальным конвейером и устройством раскладки выгружаются из бункера-накопителя в ёмкости для хранения семян.

Щадящая обработка семян включает в себя атравматичное перемещение семян в устройстве, предотвращающее истирающее и давящее воздействие на семена, и предотвращение перегрева поверхности семян, приводящее к последующему нарушению целостности оболочки семени. В соответствии с агротехнологическими требованиями [5, 6] максимальное значение температуры поверхности семян не должно превышать 45 °С.

Для предотвращения перегрева поверхностного слоя семян воздействие на семена в бункерно-конвейерном устройстве осуществляется тепловыми импульсами источников излучения при перемещении семян на ленте горизонтального конвейера так, чтобы при ссыпании семян на ленту обратного хода максимальная температура поверхности семян не превышала допустимое значение. Естественное перемешивание семян в слое при движении на ленте горизонтального конвейера способствует равномерному нагреву слоя семян. Движущиеся по ленте обратного хода семена остывают, возвращаются в бункер-накопитель, где смешиваются с семенами бункера-накопителя, а их температура и влагосодержание выравниваются по объёму, что снижает риск появления в оболочке семян микротрещин из-за высоких градиентов температуры и влагосодержания в объёме семени. В ходе обработки

влажность семян в бункере-накопителе постепенно снижается, а температура растёт.

**Целью настоящей работы** является расчётно-теоретическое установление режимных параметров процесса импульсной инфракрасной сушки в бункерно-конвейерном устройстве для заданных значений снижения влажности семян, предельно допустимой температуры поверхностного слоя семян при нагреве, геометрических параметров ленты горизонтального конвейера, количества и тепловой мощности инфракрасных излучателей, размещённых над лентой горизонтального конвейера. Режимными параметрами являются: скорость движения ленты горизонтального конвейера; интенсивность обдува семян воздухом системы вентиляции; толщина слоя семян на ленте горизонтального конвейера; тепловая мощность источников теплового излучения; скважность теплового облучения семян при движении по ленте горизонтального конвейера.

Целевыми показателями работы бункерно-конвейерного устройства являются: время сушки одной загрузки бункера-накопителя устройства; удельные затраты энергии на процесс сушки.

**Методика исследования.** Исходными данными для расчёта параметров процесса сушки являются теплофизические свойства семян: влажность до начала сушки, удельная теплоёмкость, теплопроводность, плотность, коэффициент влагопроводности, коэффициент термодиффузии. Представленная на рисунке 1 схема теплового взаимодействия слоя семян и источников инфракрасного излучения позволяет рассматривать процесс сушки семян как нестационарную задачу тепло- и влагопереноса в одномерной постановке. Система дифференциальных уравнений для такой задачи имеет вид [7, 8]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial \tau} &= k_{11} \nabla^2 u + k_{12} \nabla^2 t; \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} &= k_{22} \nabla^2 t + k_{21} \nabla^2 u,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $u$  – влагосодержание, г/кг;  $t$  – температура, °C;  $\tau$  – время, с;  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{21}$  – коэффициенты, определяемые уравнениями (2) и (3).

Так для системы 1-2 – системы пар – жидкость:

$$k_{11} = a_m, \quad k_{12} = a_m^t = a_m \delta, \quad (2)$$

$$k_{22} = a + a_{m1}^t \frac{r_{12}}{c}, \quad k_{21} = a_{m1} \frac{r_{12}}{c}. \quad (3)$$

где  $a_m$  – коэффициент влагопроводности пористого тела, м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  – коэффициент термодиффузии,  $0 \leq \delta \leq 1$ , 1/К;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $a = \lambda / (c \cdot \rho_1)$ , где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К);  $c$  – теплоёмкость тела, Дж/(кг·К);  $\rho_1$  – плотность тела, кг/м<sup>3</sup>;  $r_{12}$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг, индекс 1 соответствует парообразной фазе влаги.

Задачу сушки слоя семян под действием инфракрасного излучения решали в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.

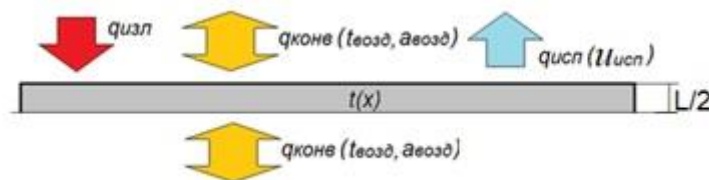


Рисунок 2 – Схема взаимодействия слоя семян с окружающей средой

Представленная схема соответствует двустороннему воздействию на слой семян толщиной  $L$  потока теплового излучения  $q_{изл}$  и конвективного теплового потока  $q_{конв}$ . Из слоя удаляется поток влаги  $u_{исп}$ . То есть при рассмотрении размещённого на ленте горизонтального конвейера слоя семян толщиной  $L/2$  при симметричном двустороннем воздействии производные температуры и влагосодержания по толщине слоя на глубине  $L/2$  равны 0. Схема позволяет также анализировать несимметричное двустороннее воздействие на слой семян. Начальными условиями решения

задачи являются постоянные по глубине слоя семян величины влагосодержания и температуры:

$$u(x, \tau=0)=const; t(x, \tau=0)=const. \quad (4)$$

Такие начальные условия соответствуют условиям обработки семян в бункерно-конвейерном устройстве, так как семена попадают на ленту конвейера из бункера-накопителя, в котором температура и влагосодержание семян одинаковы как по глубине отдельного семени, так и для массива семян в целом. Граничными тепловыми условиями задачи являются условия теплового баланса на поверхностях слоя сырья (граничные условия 3-го рода):

$$\begin{aligned} -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_1 \cdot (t_{f1} - t(x=0, \tau)) + ql - qw; \\ -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=L} &= \alpha_2 \cdot (t_{f2} - t(x=L, \tau)) + ql - qw, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхностях слоя сырья 1 и 2 соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{f1}$  и  $t_{f2}$  – температура воздуха, омывающего поверхности 1 и 2 соответственно;  $t(x=0, \tau)$  – температура на поверхности 1 слоя сырья;  $t(x=L, \tau)$  – температура на поверхности 2 слоя сырья;  $ql$  – тепловой поток излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $qw$  – тепловой поток испарения влаги, Вт/м<sup>2</sup>.

Граничные условия влагопереноса задавали двумя способами: граничными условиями 1-го рода и граничными условиями 3-го рода. Граничные условия 1-го рода - значение влагосодержания на поверхности слоя семян:

$$u(x=0, \tau)=const; u(x=L, \tau)=const. \quad (6)$$

Граничные условия 3-го рода - условия баланса движения влаги на границе тела [9, 10]:

$$\begin{aligned} a_m \cdot \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} &= A \cdot (pn(t) - pp(ta))^K; \\ a_m \cdot \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L} &= A \cdot (pn(t) - pp(ta))^K, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $pn(t)$  – давление паров насыщения, Па;  $pp(t)$  – парциальное давление паров в атмосфере, Па;  $t$  – температура тела, °С;  $ta$  – температура атмосферного воздуха, °С;  $A$  и  $K$  – эмпирические коэффициенты.

Решение системы уравнений (1) при начальных условиях (4) и граничных условиях (5-7) получали для следующих допущений: теплофизические свойства семян, воздуха и величины коэффициентов конвективной теплоотдачи не зависят от температуры; теплофизические свойства семян постоянны по толщине слоя; толщина слоя семян  $L/2$  постоянна по величине.

Расчётное моделирование процесса сушки слоя семян в бункерно-конвейерном устройстве выполняли в компьютерной системе для научных и инженерных расчётов Mathcad. Для моделирования использовали встроенную функцию решения систем дифференциальных уравнений в частных производных Pdsolve() [11] и алгоритм численного решения краевой задачи для дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных с использованием метода прогонки [12 - 14]. Для задания импульсного теплового воздействия на слой семян использовали гармоническую функцию, задающую период, и функцию Хевисайда  $\Phi()$ , задающую скважность П-образного ступенчатого воздействия теплового излучения:

$$\Phi(\sin(\omega \cdot t) - b), \quad (8)$$

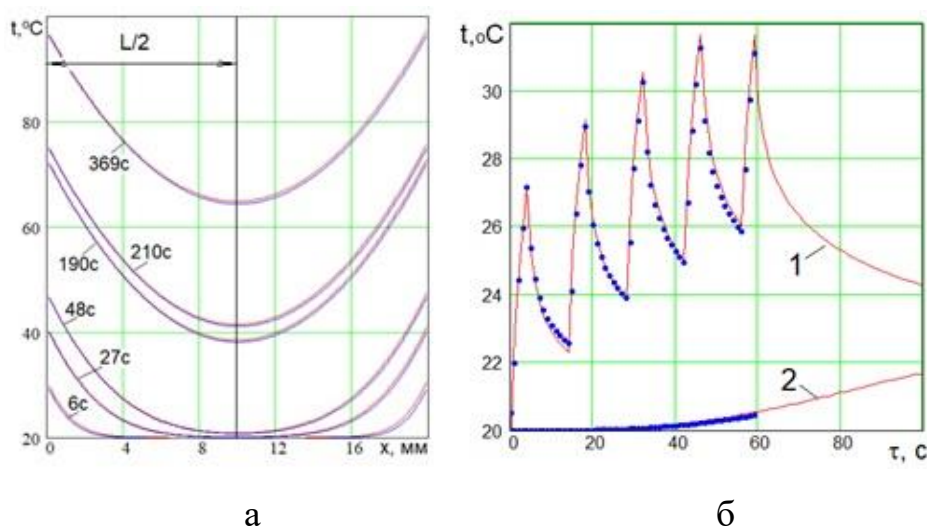
где  $\omega$  – параметр периода;  $b$  – параметр скважности.

Исходные данные для моделирования сушки семян пшеницы влажностью 20% представлены в таблице 1. Теплофизические свойства пшеницы заданы в соответствии с данными, приведенными в [15 - 17].

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования сушки семян пшеницы влажностью 20%

| №  | Наименование                    | Обозначение  | Размерность            | Значение (диапазон) |
|----|---------------------------------|--------------|------------------------|---------------------|
| 1  | Начальная температура семян     | $t(x,0)$     | °C                     | 20                  |
| 2  | Начальное влагосодержание семян | $u0$         | -                      | 20                  |
| 3  | Плотность семян                 | $\rho z2$    | кг/м <sup>3</sup>      | 1200                |
| 4  | Теплоёмкость семян              | $Cz2$        | Дж/(кг·К)              | 1949                |
| 5  | Теплопроводность семян          | $\Lambda z2$ | Вт/(м·К)               | 0,504               |
| 6  | Толщина слоя семян              | $L0$         | мм                     | 20                  |
| 7  | Поток теплового излучения       | $Qizl$       | Вт/м <sup>2</sup>      | 4000                |
| 8  | Температура воздуха             | $tatm$       | °C                     | 20                  |
| 9  | Коэффициент теплоотдачи         | $\alpha$     | Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | 10 - 20             |
| 10 | Расчётный шаг по времени        | $\Delta\tau$ | с                      | 1                   |

**Результаты исследования.** Моделирование проводилось в несколько этапов. Первый этап моделирования предусматривал установление адекватности описания процесса нагрева слоя семян функцией Pdsolve() и методом прогонки. На рисунке 3 а представлены распределения температуры по глубине слоя семян в различные моменты времени, полученные моделями с использованием функции Pdsolve() и методом прогонки для постоянного нагрева слоя. Максимальное отличие вычисленных значений температуры различными моделями не превышает 1% от расчётного значения температуры. На рисунке 3 б представлены результаты моделирования импульсного нагрева инфракрасным излучением. Преимуществами использования модели с использованием метода прогонки является его более высокая вычислительная производительность и возможность моделировать комбинированное тепловое воздействие на слой семян. На рисунке 3 б процесс импульсного теплового воздействия заканчивается на 60-й секунде, далее моделируется процесс остывания нагретого слоя.



а - сравнение распределений температуры, полученных моделями для различных моментов времени нагрева слоя сырья; б - изменение температуры во времени при импульсном нагреве (1 – температура поверхности слоя ( $x = 0$ ); 2 – температура середины слоя ( $x = L/2$ ); линия – метод прогонки; точки – функция Pdesolve())  
 Рисунок 3 – Распределение температуры по глубине слоя семян и результаты моделирования импульсного нагрева инфракрасным излучением

При реализации второго этапа моделирования устанавливали значимые для моделируемого процесса тепло- и массопереноса в слое семян параметры системы уравнений (1). Для этого дополнительно к данным таблицы 1 задавали величины коэффициента влагопроводности  $D = k_{11}$ , коэффициента термодиффузии  $d = \delta$ , коэффициента  $Re = k_{21}$ , характеризующего поглощение теплоты при парообразовании влаги в элементарном объёме слоя сырья.

Значения этих коэффициентов зависят от свойств сырья, условий теплоподвода, температуры сырья и её градиента в сырье и могут изменяться в широких пределах. Для определения степени влияния коэффициентов  $d$  и  $Re$  на решение системы уравнений (1) выполнены расчёты системы уравнений при заданных в соответствии с данными таблицы 1 значениях теплофизических свойств пшеницы. В результате моделирования получены значения снижения влагосодержания  $u$  в слое семян за 1 цикл импульсного нагрева слоя в течение 60 секунд, представленные в таблице 2.

Таблица 2 - Влагосодержание  $u$  в слое семян после цикла нагрева

| $D, \text{м}^2/\text{с}$ | $Re, \text{м}^2/\text{с}$ | $d$      | $u$       | Средне-квадратичное отклонение |
|--------------------------|---------------------------|----------|-----------|--------------------------------|
| 3,00E-11                 | 1,00E-20                  | 1,00E+00 | 19,986349 | 0,049412<br>0,25 %             |
|                          | 1,00E-10                  | 1,00E+00 | 19,986346 |                                |
|                          | 1,00E-20                  | 1,00E-02 | 19,986323 |                                |
|                          | 1,00E-10                  | 1,00E-02 | 19,986323 |                                |
| 3,00E-09                 | 1,00E-20                  | 1,00E+00 | 19,895095 |                                |
|                          | 1,00E-10                  | 1,00E+00 | 19,895079 |                                |
|                          | 1,00E-20                  | 1,00E-02 | 19,892732 |                                |
|                          | 1,00E-10                  | 1,00E-02 | 19,892731 |                                |
| 3,00E-06                 | 1,00E-20                  | 1,00E+00 | 18,153832 | 0,210211<br>1,17 %             |
|                          | 1,00E-10                  | 1,00E+00 | 18,153816 |                                |
|                          | 1,00E-20                  | 1,00E-02 | 17,789727 |                                |
|                          | 1,00E-10                  | 1,00E-02 | 17,789728 |                                |

При увеличении величины  $Re$  до значений  $10^{-7}$  результаты моделирования становятся нефизичными (температура в слое семян снижается до значительных отрицательных величин), блок решения функции  $Pdesolve()$  сообщает об ошибках сингулярности (вычисляемые производные стремятся к бесконечности). При несущественном нагреве слоя семян (среднее значение температуры за цикл нагрева увеличивается не более чем на  $6^\circ\text{C}$ ) можно предположить, что движение влаги в слое происходит без испарения, то есть величина коэффициента  $Re$  близка к 0. Как следует из таблицы 2, за 1 цикл импульсного нагрева слой семян снижает влажность с 20 до 19,986 для  $D = 3 \cdot 10^{-11} - 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  и с 20 до 17,789 – 18,154 для  $D = 3 \cdot 10^{-6}$ . Постоянство величины  $u$  для выбранных значений влагонепроводности  $D$  указывает на несущественность влияния коэффициентов  $Re$  и  $d$  на процесс влагоудаления. Влияние коэффициентов  $Re$  и  $d$  для моделируемых диапазонов изменения параметров системы уравнений (1) на характер изменения температуры в процессе нагрева слоя семян также пренебрежимо мало. Таким образом, для выбранных диапазонов изменения параметров системы уравнений (1) и условий нагрева слоя семян уравнения системы можно рассматривать независимо друг от друга. Для моделирования влагоудаления из слоя семян следует решать уравнение

влажноперееноса, а для моделирования теплового состояния слоя семян – уравнение теплоперееноса.

На третьем этапе моделирования определяли характер снижения влагосодержания семян в процессе сушки. Для этого выполнено моделирование снижения влагосодержания для ряда начальных значений влагосодержания при заданном значении влагосодержания на границах слоя семян. В результате моделирования получены значения снижения влагосодержания  $du$  в слое семян за 1 цикл импульсного нагрева слоя для ряда начальных значений влагосодержания  $u_0$ , представленные в таблице 3. Значение  $du$  определено по формуле:

$$du = u(1)/u_0, \quad (9)$$

где  $u(1)$  – влагосодержание после 1 цикла нагрева слоя семян или после одного прохода слоя семян по ленте горизонтального конвейера.

Таблица 3 – Снижение влагосодержания  $du$  после цикла нагрева

| $u_0$ | 20       | 15       | 10       | 5        | Среднее  | Средне-квадратичное отклонение |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------------------|
| $du$  | 0,985378 | 0,985684 | 0,986296 | 0,988297 | 0,986414 | 0,001312                       |

Из данных таблицы следует, что темп снижения влагосодержания слоя семян есть величина практически постоянная, то есть кривая снижения влагосодержания может быть описана экспоненциальной зависимостью.

На четвертом этапе проводили моделирование процесса сушки семян в бункерно-конвейерном устройстве циклической импульсной инфракрасной сушки. При этом учитывали конструктивные и геометрические характеристики устройства. Ленты горизонтального конвейера 1 имеют ширину 2000 мм, длину 6000 мм, над верхней лентой установлены линейные инфракрасные излучатели длиной 1000 мм тепловой мощностью 800 Вт с параболическими отражателями, ширина среза которых составляет 100 мм. Расстояние между срезами отражателей составляет 900 мм (см. рисунок 1). Таким образом, скважность облучения

составляет  $1/10$ , а параметр  $b$  в функции (8) равен  $0,9$ , а удельный тепловой поток излучения составляет  $8000 \text{ Вт/м}^2$  при размещении среза отражателя непосредственно над поверхностью слоя семян. При увеличении расстояния от среза отражателя до поверхности семян зона облучения поверхности увеличивается, величина параметра  $b$  уменьшается, уменьшается и величина удельного теплового потока излучения на поверхность семян. При  $b = 0,8$  удельный тепловой поток излучения составляет  $4000 \text{ Вт/м}^2$ .

Моделирование нагрева семян пшеницы выполняли с помощью модели на основе метода прогонки для диапазонов варьируемых параметров скважности  $b$ , скорости движения ленты  $V$ , толщины слоя семян  $L/2$ . Исходные данные для моделирования представлены в таблице 1. Параметры моделируемых режимов представлены в таблице 4.

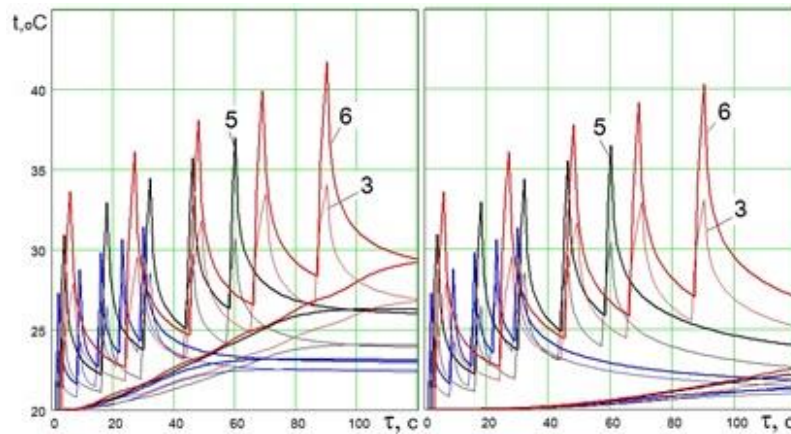
Таблица 4 – Режимы моделирования нагрева семян

| № режима | $L/2$ , мм | $V$ , м/с | $\tau$ , с | $\omega$ | $Q_{izl}$ , Вт/м <sup>2</sup> |
|----------|------------|-----------|------------|----------|-------------------------------|
| 1        | 5          | 0,2       | 30         | 0,9      | 4000                          |
| 2        | 5          | 0,1       | 60         | 0,45     | 4000                          |
| 3        | 5          | 0,07      | 90         | 0,3      | 4000                          |
| 4        | 5          | 0,2       | 30         | 0,9      | 8000                          |
| 5        | 5          | 0,1       | 60         | 0,45     | 8000                          |
| 6        | 5          | 0,07      | 90         | 0,3      | 8000                          |
| 1        | 10         | 0,2       | 30         | 0,9      | 4000                          |
| 2        | 10         | 0,1       | 60         | 0,45     | 4000                          |
| 3        | 10         | 0,07      | 90         | 0,3      | 4000                          |
| 4        | 10         | 0,2       | 30         | 0,9      | 8000                          |
| 5        | 10         | 0,1       | 60         | 0,45     | 8000                          |
| 6        | 10         | 0,07      | 90         | 0,3      | 8000                          |

$\tau$  – время пребывания семян на верхней ленте конвейера.

На рисунке 4 приведены кривые нагрева верхней и нижней поверхностей слоя семян толщиной 5 и 10 мм для указанных в таблице 4 режимов. На рисунке 5 приведены значения температуры на поверхности и средние по глубине слоя в конце цикла нагрева, то есть в момент схода семян с верхней ленты горизонтального конвейера. Как следует из рисунков 4 и 5 предпочтительными для нагрева слоя семян пшеницы являются режимы 3, 5 и 6, обеспечивающие нагрев поверхности семян до  $34 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  при начальном значении температуры  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . При уменьшении

толщины слоя средняя по толщине слоя температура увеличивается, что улучшает условия для влагоудаления из семян и снижает градиент температуры по толщине слоя.



толщина слоя 5 мм

толщина слоя 10 мм

Рисунок 4 – Изменение температуры слоя пшеницы при импульсном нагреве

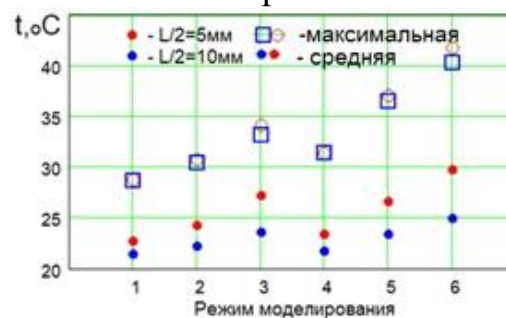


Рисунок 5 - Температура семян на поверхности и средняя по высоте слоя

Таким образом, сушка слоя семян пшеницы толщиной 5 – 10 мм может осуществляться при удельном тепловом потоке  $Q_{izl} = 8000 \text{ Вт/м}^2$  со скважностью  $b = 0,9$  при скорости движения ленты конвейера  $V = 0,07 - 0,1 \text{ м/с}$  (время пребывания семян на ленте 60 – 90 с). Моделирование влагоудаления из семян выполняли с помощью блока решения функции  $Pdesolve()$  для граничных условий 3-го рода, а также для граничных условий 1-го рода. Исходные данные для моделирования представлены в таблице 1. В граничных условиях модели влагоудаления правая часть выражений (7) представляет собой интенсивность испарения влаги  $uv \text{ (кг/(с} \cdot \text{м}^2))$ :

$$uv = A \cdot (pn(t) - pp(ta))^K. \quad (10)$$

В [9] для условий испарения влаги со свободной поверхности при конвективном теплообмене с окружающей средой и скорости воздуха над поверхностью не более 0,5 м/с зависимость (10) имеет вид:

$$uv(\varphi, t, tm) = 1,262 \cdot 10^{-8} \cdot (pn(tm) - pp(\varphi, t))^{1,165}. \quad (11)$$

В [18] для условий испарения влаги со свободной поверхности при воздействии на поверхность воды теплового излучения и скорости воздуха над поверхностью от 0,5 до 1 м/с зависимость имеет вид:

$$u = 1,422 \cdot 10^{-8} \cdot F \cdot (pn - pp)^{1,154}, \quad (12)$$

В соответствии с (7) величина производной влагопереноса в блоке решения системы уравнений равна:

$$uk = uv / (D \cdot \rho). \quad (13)$$

Результатом моделирования являются значения темпа снижения влагосодержания слоя семян, размещённых на ленте горизонтального конвейера за один цикл нагрева (формула (9)), которое позволяет определить время снижения влагосодержания до заданного значения и затраты энергии на процесс сушки. Темп снижения влагосодержания слоя семян на ленте конвейера определяли по зависимости:

$$u(n) = u0 - (n \cdot u0 \frac{\sum_{i=0}^{199} (u0 - u_{i,60})}{\sum_{i=0}^{199} u0}), \quad (14)$$

где  $u0$  – начальное влагосодержание;  $n$  – количество циклов нагрева (проходов на ленте конвейера);  $u_{i,60}$  – влагосодержание в расчётной точке слоя семян в момент выхода слоя с ленты конвейера (при скорости 0,1 м/с и длине конвейера 6000 мм время пребывания семян на ленте составляет 60 секунд);  $i = 0 \dots 199$  – номера расчётных точек слоя семян.

Темп снижения влагосодержания всей массы семян, загруженных в устройство сушки, определяли по зависимости:

$$u \sum 20(t) = u0 - t \cdot (u0 - \frac{u(1) \cdot m1 + u(0) \cdot m2}{m1 + m2}), \quad (15)$$

где  $t$  – время, с;  $u(1)$  – влагосодержание семян после цикла нагрева;  $m1$  –

масса семян на ленте, кг;  $u(0)$  – влагосодержание семян до цикла нагрева;  $m_2$  – масса семян в бункере, кг.

На рисунке 6 приведены кривые снижения влагосодержания всей массы семян для принятых значений  $m_1 = 15$  кг,  $m_2 = 135$  кг.

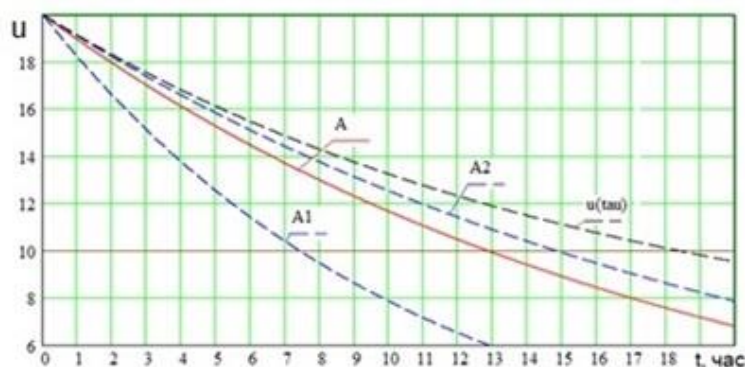


Рисунок 6 - Кривые снижения влагосодержания массы семян

Линия A получена при решении системы уравнений (1) для граничных условий 1-го рода при  $u_k = 19,5$ , линия A1 – для граничных условий 1-го рода при  $u_k = 19$ , линия A2 – для граничных условий 3-го рода при влажности воздуха 60 %, температуре воздуха 20 °С, температуре поверхности слоя семян 40°С с использованием формулы (11). Использование формулы (12) существенного отличия не дало.

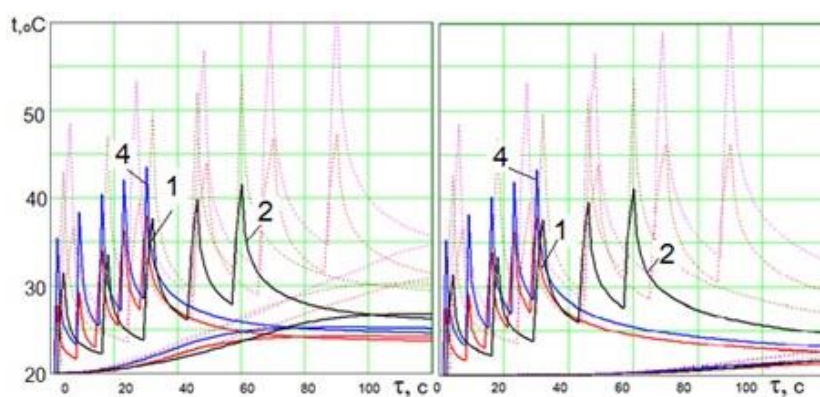
Линия  $u(\tau)$  получена по зависимости Шервуда-Лыкова вида [19]:

$$u(\tau) = u_p + (u_0 - u_p) \times e^{-K \cdot \tau}, \quad (16)$$

где  $u_0$  – влагосодержание семян до цикла нагрева;  $u_p$  – равновесное влагосодержание семян;  $K$  – коэффициент сушки.

Из графиков на рисунке 6 следует, что время сушки семян пшеницы может составлять от 8 до 18 часов. В процессе сушки семена потеряют 16,7 кг влаги при снижении влажности от 20 до 10 %. Затраты энергии инфракрасных излучателей на процесс сушки составят от 64 до 144 кВт·час. Затраты энергии на сушку 1 кг семян составят от 0,43 до 0,96 кВт·час/кг. Затраты энергии на испарение 1 кг влаги от 3,83 до 8,62 кВт·час/кг.

Аналогичное моделирование процесса сушки было проведено для семян горчицы. Моделирование нагрева семян выполняли с помощью модели на основе метода прогонки. На рисунке 7 приведены кривые нагрева верхней и нижней поверхностей слоя семян горчицы толщиной 5 и 10 мм для принятых режимов. На рисунке 8 приведены значения температуры на поверхности и средние по глубине слоя в конце цикла нагрева. Как следует из рисунков 7 и 8 предпочтительными для нагрева слоя семян горчицы являются режимы 1, 2 и 4, обеспечивающие нагрев поверхности семян до 38 – 43 °С при начальном значении температуры 20 °С.



толщина слоя 5 мм

толщина слоя 10 мм

Рисунок 7 – Изменение температуры слоя горчицы при импульсном нагреве

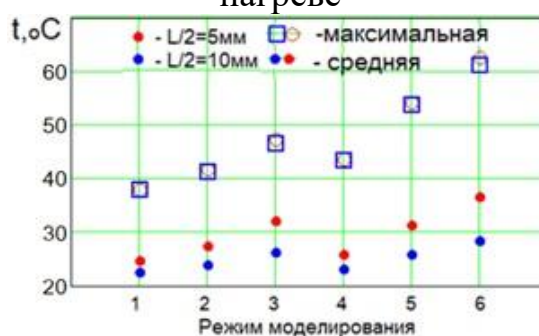


Рисунок 8 - Температура семян на поверхности и средняя по высоте слоя

При уменьшении толщины слоя средняя по толщине слоя температура увеличивается, что улучшает условия для влагоудаления из семян и снижает градиент температуры по толщине слоя.

Таким образом, сушка слоя семян горчицы толщиной 5 – 10 мм может

осуществляться при удельном тепловом потоке  $Q_{izl} = 4000 \text{ Вт/м}^2$  со скважностью  $b = 0,8$  при скорости движения ленты конвейера  $V = 0,1 - 0,2 \text{ м/с}$  (время пребывания семян на ленте 30 – 60 с).

Моделирование влагоудаления из семян горчицы выполнены с помощью блока решения функции  $\text{Pdesolve}()$  для граничных условий 3-го рода, а также для граничных условий 1-го рода, результаты влагосодержания всей массы семян для принятых значений  $m1 = 15 \text{ кг}$ ,  $m2 = 70 \text{ кг}$  представлены на рисунке 9.

В результате установлено, что в процессе сушки семена горчицы потеряют 6,33 кг влаги при снижении влажности от 13 до 6%. Затраты энергии инфракрасных излучателей на процесс сушки семян горчицы составят от 32 до 60 кВт·час. Затраты энергии на сушку 1 кг семян горчицы составят от 0,38 до 0,71 кВт·ч/кг. Затраты энергии на испарение 1 кг влаги от 5,1 до 9,5 кВт·ч/кг.

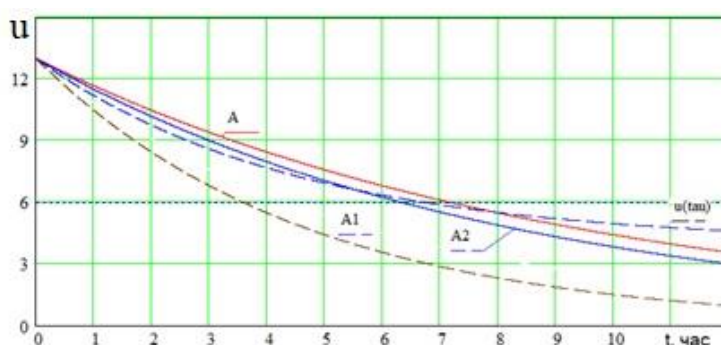


Рисунок 9 - Кривые снижения влагосодержания массы семян горчицы

В ходе работы проведено моделирование процесса сушки для семян кориандра. Моделирование нагрева семян выполняли с помощью модели на основе метода прогонки. На рисунке 10 приведены кривые нагрева верхней и нижней поверхностей слоя семян кориандра толщиной 5 и 10 мм для принятых режимов. На рисунке 11 приведены значения температуры на поверхности и средние по глубине слоя в конце цикла нагрева.

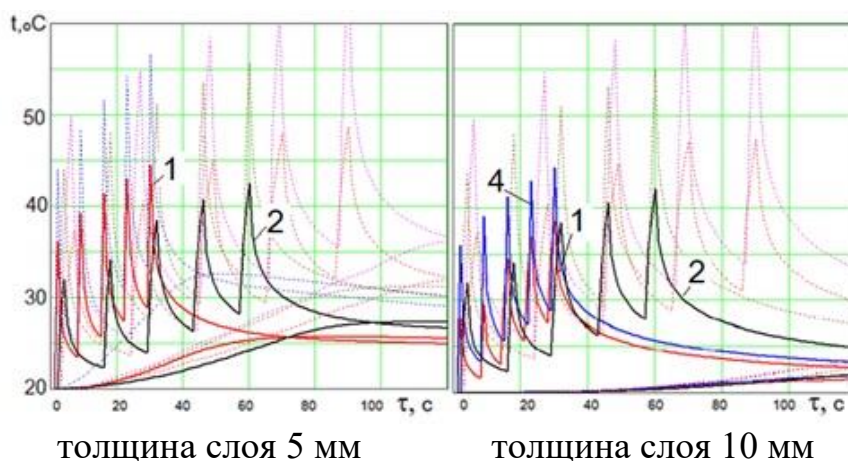


Рисунок 10 – Изменение температуры слоя кориандра при импульсном нагреве

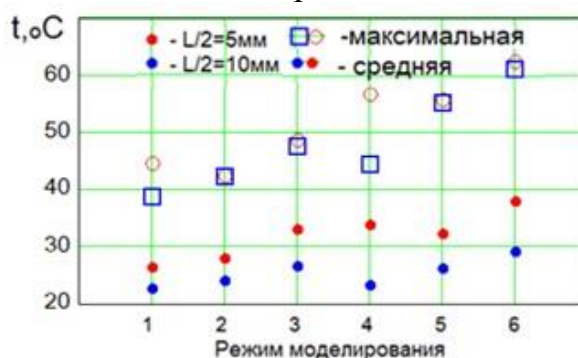


Рисунок 11 - Температура семян на поверхности и средняя по высоте слоя

Как следует из рисунков 10 и 11 предпочтительными для нагрева слоя семян являются режимы 1, 2 и 4 (для слоя 10 мм), обеспечивающие нагрев поверхности семян до 38 – 44 °С при начальном значении температуры 20 °С. При уменьшении толщины слоя средняя по толщине слоя температура увеличивается, что улучшает условия для влагоудаления из семян и снижает градиент температуры по толщине слоя. Таким образом, сушка слоя семян кориандра толщиной 5 – 10 мм может осуществляться при удельном тепловом потоке  $Q_{izl} = 4000 \text{ Вт/м}^2$  со скважностью  $b = 0,8$  при скорости движения ленты конвейера  $V = 0,1 - 0,2 \text{ м/с}$  (время пребывания семян на ленте 30 – 60 с).

Моделирование влагоудаления из семян кориандра выполнены с помощью блока решения функции  $P_{\text{dsolve}}()$  для граничных условий 3-го рода, а также для граничных условий 1-го рода, результаты снижения влагосодержания всей массы семян для принятых значений  $m_1 = 10 \text{ кг}$ ,  $m_2$

= 50 кг представлены на рисунке 12.

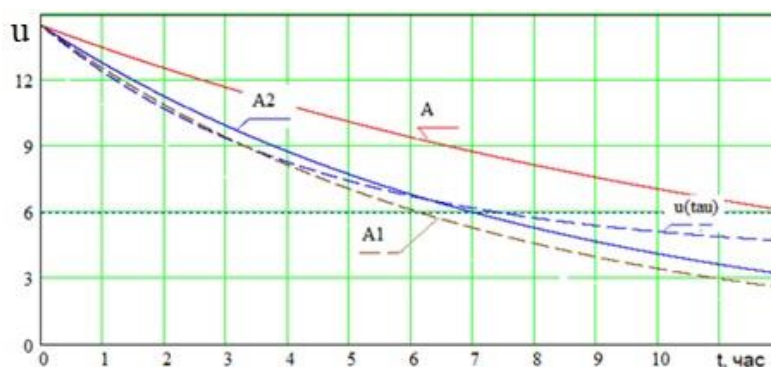


Рисунок 12 - Кривые снижения влагосодержания массы семян кориандра

При моделировании процесса сушки семян кориандра установлено, что семена потеряют 5,4 кг влаги при снижении влажности от 14,5 до 6 %. Затраты энергии инфракрасных излучателей на процесс сушки составят от 32 до 60 кВт·час. Затраты энергии на сушку 1 кг семян составят от 0,53 до 1 кВт·ч/кг. Затраты энергии на испарение 1 кг влаги от 5,9 до 11,1 кВт·ч/кг.

**Выводы.** Проведенное расчётно-теоретическое моделирование режимных параметров процесса импульсной инфракрасной сушки в бункерно-конвейерном устройстве позволяет определить взаимосвязь между теплофизическими свойствами семян, технологическими и конструктивными параметрами устройства и может быть использовано для проектирования конвейерных устройств для сушки сельскохозяйственной продукции инфракрасным излучением.

## Список литературы

1. Завалий А. А. Конвейерные устройства инфракрасной сушки и очистки семян / А. А. Завалий, С. С. Воложанинов // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2019) : сборник трудов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ДГТУ (РИСХМ). – Ростов-на Дону: ДГТУ-Принт, 2019. – С. 327–331.
2. Технологии и машины для физических методов воздействия на почву, семена и растения / А. А. Завалий, Н. В. Алдошин, С. С. Воложанинов [и др.]. – // Агроинженерия. – 2022. – № 6(106). – С. 11.
3. Трисвятский, Л. А. Хранение зерна / Л. А. Трисвятский. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 351 с.
4. Завалий, А. А. Совершенствование методов послеуборочной термомеханической переработки зерна / А. А. Завалий, С. С. Воложанинов,

В. С. Рутенко // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2017. – № 12 (175). – С. 46–58.

5. Постановление Правительства РФ от 1 августа 2016 г. №740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования».

6. Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов, В. А. Буханцов, Б. К. Маратов, А. С. Прокопец. – Ростов на Дону : МарТ, 2001. – 240 с.

7. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М: Энергия, 1968. – 472 с.

8. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. В. Михайлов. - М-Л: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 536 с.

9. Глауберман, Х. Б. Отопление, вентиляция и сушка / Х. Б. Глауберман. – М. – Л.: ГНТИ легкой промышленности, 1949. – 460 с.

10. Нестеренко, А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / А. В. Нестеренко. – М.: Высш. шк., 1971. – 460 с.

11. Макаров, Е. Инженерные расчёты в Mathcad 15: Учебный курс / Е. Макаров. – СПб.: Питер, 2011. – 400 с.

12. Солодов, А. П. Электронный курс теплообмена // Открытое образование. 2013. № 1 (96). С. 8 – 16.

13. Солодов, А.П. Электронный курс. Тепломассообмен в энергетических установках. – URL: [http://twm.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook\\_2009/index.htm](http://twm.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/index.htm) (дата обращения: 25.11.2021). – Текст : электронный.

14. Сергеев, М. А. Обоснование параметров и режимов инфракрасной сушки высоковлажного сельскохозяйственного сырья с высокой концентрацией фенольных веществ : специальность 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сергеев Михаил Александрович. - Ростов-на-Дону, 2022. - 188 с.

15. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. А. Красовская. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 288 с.

16. Гинзбург, А. С. Технология сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 250 с.

17. Егоров, Г. А. Влияние тепла и влаги на процессы переработки и хранения зерна / Г. А. Егоров. – М: Колос, 1973. – 264 с.

18. Завалий, А. А. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабильных материалов / А. А.Завалий, Ю. Ф.Снежкин. – Симферополь: ИТ «Ариал», 2016. – 263 с.

19. Рудобашта, С. П. Экспериментальное исследование процесса конвективной сушки нарезанных яблок [Текст] / С. П. Рудобашта, В. М. Дмитриев // Материалы I Всероссийской конференции с международным участием «Импортозамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья». – Тамбов. – 2019. – С. 276–281.

## References

1. Zavalij A. A. Konvejernye ustrojstva infrakrasnoj sushki i ochistki semjan / A. A. Zavalij, S. S. Volozhaninov // Innovacionnye tehnologii v nauke i obrazovanii (ITNO-2019) : sbornik trudov VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj 90-letiju DGTU (RISHM). – Rostov-na Donu: DGTU-Print, 2019. – S. 327–331.

2. Tehnologii i mashiny dlja fizicheskikh metodov vozdejstviya na pochvu, semena i rastenija / A. A. Zavalij, N. V. Aldoshin, S. S. Volozhaninov i dr. – // Agrozhennerija. –

2022. – № 6(106). – С. 11.

3. Trisvjatskij, L. A. Hranenie zerna / L. A. Trisvjatskij. – Moskva : Agropromizdat, 1987. – 351 s.

4. Zavalij, A. A. Sovershenstvovanie metodov posleuborochnoj termomehanicheskoj pererabotki zerna / A. A. Zavalij, S. S. Volozhaninov, V. S. Rutenko // Izvestija sel'skohozjajstvennoj nauki Tavridy. – 2017. – № 12 (175). – С. 46–58.

5. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 1 avgusta 2016 g. №740 «Ob opredelenii funkcional'nyh harakteristik (potrebitel'skih svojstv) i jeffektivnosti sel'skohozjajstvennoj tehniki i oborudovanija».

6. Posleuborochnaja obrabotka i hranenie zerna / E. M. Voblikov, V. A. Buhancov, B. K. Maratov, A. S. Prokopec. – Rostov na Donu : MarT, 2001. – 240 s.

7. Lykov, A. V. Teorija sushki / A. V. Lykov. – M: Jenergija, 1968. – 472 s.

8. Lykov, A. V. Teorija teplo- i massoperenosa / A. V. Lykov, Ju. V. Mihajlov. - M-L: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo, 1963. – 536 s.

9. Glauberman, H. B. Otoplenie, ventiljacija i sushka / H. B. Glauberman. – M. – L.: GNTI legkoj promyshlennosti, 1949. – 460 s.

10. Nesterenko, A. V. Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventiljarii i kondicionirovanija vozduha / A. V. Nesterenko. – M.: Vyssh. shk., 1971. – 460 s.

11. Makarov, E. Inzhenernye raschjoty v Mathcad 15: Uchebnyj kurs / E. Makarov. – SPb.: Piter, 2011. – 400 s.

12. Solodov, A. P. Jelektronnyj kurs teploobmena // Otkrytoe obrazovanie. 2013. № 1 (96). S. 8 – 16.

13. Solodov, A.P. Jelektronnyj kurs. Teplomassoobmen v jenergeticheskikh ustanovkah. – URL: [http://tw.t.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook\\_2009/index.htm](http://tw.t.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/index.htm) (data obrashhenija: 25.11.2021). – Tekst : jelektronnyj.

14. Sergeev, M. A. Obosnovanie parametrov i rezhimov infrakrasnoj sushki vysokovlazhnogo sel'skohozjajstvennogo syr'ja s vysokoj koncentraciej fenol'nyh veshhestv : special'nost' 05.20.01 Tehnologii i sredstva mehanizacii sel'skogo hozjajstva : dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk / Sergeev Mihail Aleksandrovich. - Rostov-na-Donu, 2022. - 188 s.

15. Ginzburg, A. S. Teplofizicheskie harakteristiki pishhevyh produktov / A. S. Ginzburg, M. A. Gromov, G. A. Krasovskaja. – M.: Pishhevaja promyshlennost', 1980. – 288 s.

16. Ginzburg, A. S. Tehnologija sushki pishhevyh produktov / A. S. Ginzburg. – M.: Pishhevaja promyshlennost', 1976. – 250 s.

17. Egorov, G. A. Vlijanie tepla i vlagi na processy pererabotki i hranenija zerna / G. A. Egorov. – M: Kolos, 1973. – 264 s.

18. Zavalij, A. A. Razrabotka i teplovoe modelirovanie ustrojstv infrakrasnoj sushki termolabil'nyh materialov / A. A. Zavalij, Ju. F. Snezhkin. – Simferopol': IT «Arial», 2016. – 263 s.

19. Rudobashta, S. P. Jeksperimental'noe issledovanie processa konvektivnoj sushki narezannyh jablok [Tekst] / S. P. Rudobashta, V. M. Dmitriev // Materialy I Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Importozameshhajushhie tehnologii i oborudovanie dlja glubokoj kompleksnoj pererabotki sel'skohozjajstvennogo syr'ja». – Tambov. – 2019. – С. 276–281.