

МРНТИ 65.29.29  
УДК 664.7/8

<https://doi.org/10.48184/2304-568X-2022-3-192-201>

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ АКТИВНОМ ВЕНТИЛИРОВАНИИ ЗЕРНА

<sup>1</sup>А.Н. ОСТРИКОВ, <sup>2</sup>Б.К. НУРАХМЕТОВ, <sup>2</sup>А.Д. АСКАРОВ, <sup>2</sup>Е.Б. МЕДВЕДКОВ

<sup>1</sup>«Воронежский государственный университет инженерных технологий», 394036, Россия, Воронеж, проспект Революции, 19, e-mail: ostrikov27@yandex.ru.

<sup>2</sup>«Алматинский технологический университет», Казахстан, 050012, г.Алматы, ул.Толе Би, 100  
Электронная почта автора-корреспондента: ardak\_198282@mail.ru\*

*Предметом исследования является процесс активного вентилирования зерна пшеницы при переменном теплоподводе. Цель работы – математическое описание характера потоков вещества и энергии в процессе активного вентилирования зерна пшеницы. Благодаря выбранной оригинальной конструкции узла отвода отработанного теплоносителя, выполненного в виде сетчатой спиралевидной трубы, позволило добиться оптимизации гидродинамической обстановки в слое высушиваемого зерна. Разработанная математическая модель, как математическое описание, состоит из уравнений материального, теплового балансов, уравнений гидродинамики в установившемся и неустойчивом состоянии. Данная математическая модель представляет собой основу для создания материальной модели процесса и проведению эксперимента с последующей обработкой данных. В результате можно получить критериальные уравнения процессов, позволяющие сравнительно просто рассчитать процессы при различных технологических режимах.*

**Ключевые слова:** зерно, активное вентилирование, математическое моделирование, энергозатраты, переменный теплоподвод, установка.

## АСТЫҚТЫ БЕЛСЕНДІ ЖЕЛДЕТУ КЕЗІНДЕГІ ЖҮРЕТІН ПРОЦЕСТЕРДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАСЫ

<sup>1</sup>А.Н. ОСТРИКОВ, <sup>2</sup>Б.К. НУРАХМЕТОВ, <sup>2</sup>А.Д. АСКАРОВ, <sup>2</sup>Е.Б. МЕДВЕДКОВ

<sup>1</sup>«Воронеж мемлекеттік инженерлік технологиялар университеті», 394036, Ресей, Воронеж қаласы, Революция даңғылы, 19, e-mail: ostrikov27@yandex.ru.

<sup>2</sup>«Алматы технологиялық университеті», Казахстан, 050012, г.Алматы, ул.Толе Би, 100  
Автор-корреспонденттің электрондық поштасы: ardak\_198282@mail.ru\*

*Зерттеу тақырыбы ауыспалы жылу беру кезінде бидай дәнін белсенді желдету процесі болып табылады. Жұмыстың мақсаты - бидай дәнін белсенді желдету процесінде зат пен энергия ағындарының сипатын математикалық сипаттау. Торлы спираль тәрізді құбыр түрінде жасалған құрылғының көмегімен пайдаланылған ауа ағынын алып кетуге негізделіп таңдалған құрылымының арқасында кептірілген астық қабатындағы гидродинамикалық жағдайды оңтайландыруға мүмкіндік береді. Әзірленген математикалық модель, математикалық сипаттама ретінде, материалдық теңдеулерден, жылу баланстарынан, тұрақты және тұрақсыз күйдегі гидродинамика теңдеулерінен тұрады. Бұл математикалық модель процесінің материалдық моделін құруға және деректерді оңдеумен эксперимент жүргізуге негіз болып табылады. Нәтижесінде әртүрлі технологиялық режимдердегі процестерді салыстырмалы түрде оңай есептеуге мүмкіндік беретін процестердің критериалды теңдеулерін алуға болады.*

**Негізгі сөздер:** астық, белсенді желдету, математикалық модельдеу, энергия шығыны, ауыспалы жылу беру, қондырғы.

## MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESSES OCCURRING DURING ACTIVE GRAIN VENTILATION

<sup>1</sup>A.N. OSTRIKOV, <sup>2</sup>B.K. NURAKHMETOV, <sup>2</sup>A.D. ASKAROV, <sup>2</sup>E.B. MEDVEDKOV

<sup>1</sup>«Voronezh State University of Engineering Technologies», 394036, Russia, Voronezh, Revolution Avenue, 19, e-mail: ostrikov27@yandex.ru.

<sup>2</sup>«Almaty Technological University», Kazakhstan, 050012, Almaty, Tole Bi str., 100  
Corresponding author e-mail: ardak\_198282@mail.ru\*

*The subject of the study is the process of active ventilation of wheat grain with variable heat supply. The purpose of the work is a mathematical description of the nature of the flows of matter and energy in the process of active ventilation of wheat grain. Thanks to the selected original design of the exhaust coolant outlet unit, made in the form of a mesh spiral tube, it was possible to optimize the hydrodynamic situation in the layer of dried grain. The developed mathematical model, as a mathematical description, consists of equations of material, thermal balances, equations of hydrodynamics in steady and unsteady states. This mathematical model is the basis for creating a material model of the process and conducting an experiment with subsequent data processing. As a result, it is possible to obtain criteria equations of processes that make it relatively easy to calculate processes under various technological modes.*

**Keywords:** grain, active ventilation, mathematical modeling, energy consumption, variable heat supply, installation.

### *Введение*

Высокая начальная влажность свежеубранного зерна, его загрязненность патогенной микрофлорой, вредителями и различные примеси, в нем содержащиеся, ухудшают его качество при дальнейшем хранении [1]. Применение активного вентилирования позволяет во многом снизить эти негативные эффекты. Однако, процессы сушки на токах и элеваторах характеризуются значительными энергозатратами. Поэтому используемые технологии сушки зерна в послеуборочный период нельзя признать научно обоснованными и соответствующими кинетическим закономерностям процесса [2].

Эксплуатируемые в настоящее время установки для активного вентилирования зерна не учитывают все сложности процесса и не позволяют соблюдать рациональные режимы обработки, что отражается на качестве зерна. Поэтому важное значение приобретает задача по разработке научно обоснованных режимов активного вентилирования зерна и его аппаратного оформления.

### *Материалы и методы исследований*

Целью исследования является разработка математической модели процесса активного вентилирования для определения рациональных режимов сушки при активном вентилировании для снижения удельных энергозатрат.

Поставленная цель достигается в равномерном распределении воздушного потока в межзерновое пространство в емкости (силосе,

бункере). Испаряемая из зерна влага, соприкасаясь с верхними слоями насыпи, имеющими сравнительно низкую температуру, отдает им свое тепло и конденсируется. Это снижает технологическую эффективность процесса.

Для предотвращения вышеуказанного явления нами было предложена установка [6] для активного вентилирования зерна. На рисунке 1 изображена принципиальная схема установки для активного вентилирования и сушки зерна, расположенной в цилиндрической емкости; в разрезе А–А – показано отверстие в нижнем поршне: в разрезе в-в – вид трубы спирали в поперечном сечении.

Установка (рис. 1) работает следующим образом. После включения вентиляторов 11 и 6 при активном вентилировании, к тому же калорифера 10, для нагрева воздуха при сушке продукта активным вентилированием, воздушный поток (атмосферный при активном вентилировании и нагретый при сушке продукта) по магистральному воздухопроводу 16 подается в емкость 1, далее равномерно распределяется в межзерновое пространство, благодаря принятой конструкции воздухоподводящего цилиндра 3 с сетчатой поверхностью.

Воздух, пронизывая межзерновое пространство, насыщает и охлаждает массу, затем направляется по радиусу емкости. Испарившаяся влага вместе с воздухом при сушке сыпучих зернистых продуктов отсасывается через спираль 2 с помощью всасывающего вентилятора 6, который соединен со спиралью

2. Поперечное сечение трубы спирали показано на разрезе (В-В). Влажный воздух попадает в отводящий канал всасывающей спирали 2, далее через магистральный трубопровод при помощи всасывающего вентилятора 6 направляется в конденсатор 5 и выбрасывается в атмосферу. Система аспирации состоит из всасывающего вентилятора 6 и конденсатора 5. Внутри вертикального канала предусмотрены два поршня 7 и 8. Расстояние между поршнями 7 и 8 можно регулировать с помощью штока 13.

Поршень 7 предназначен для предотвращения расхода воздуха при неполной загрузке силоса и лебедка 11 и трос для поднятия и опускания двух поршней 7 и 8. Поршень 8 имеет четыре отверстия для подвода воздушного потока в пространство между поршнями 7 и 8. Верхний конец 14 телескопической трубы 15 жестко соединен поршнем 7, а нижний конец телескопической трубы 12 соединен с магистральной трубой для подвода воздушного потока.

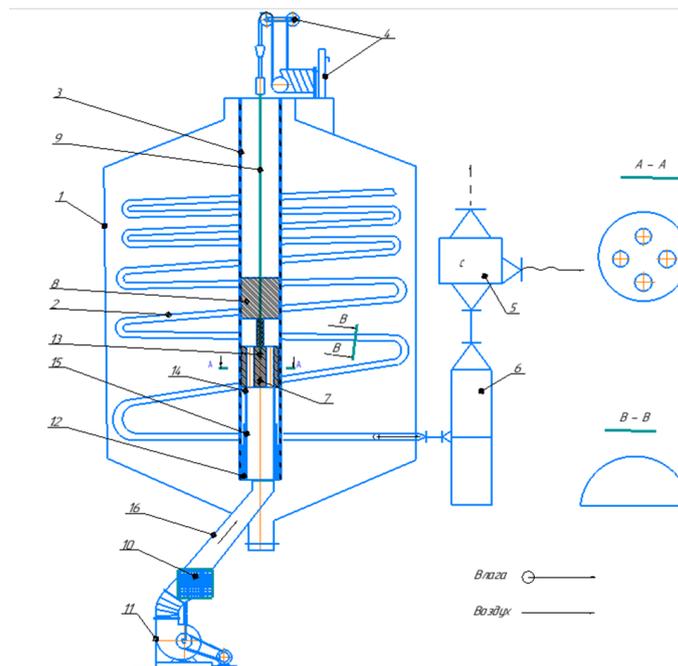


Рисунок 1 – Принципиальная схема предлагаемой установки

Нагнетательный вентилятор создаёт движение нагретого воздушного потока в трубе, которое описывается уравнениями Эйлера, справедливыми для жидкой и газовой среды (при степени сжатия  $n < 1,2$ ).

В сжатом виде данные уравнения движения потока *реальной* газовой среды можно представить в виде системы:

$$\begin{cases} X - P_x + I_x + N_x = 0 \\ Y - P_y + I_y + N_y = 0 \\ Z - P_z + I_z + N_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$P_x ; P_y ; P_z$  - единичные координатные силы давления; ( $H/кг$ )

$I_x ; I_y ; I_z$  - единичные координатные силы инерции; ( $H/кг$ )

$N_x ; N_y ; N_z$  - единичные координатные силы трения; ( $H/кг$ )

$X ; Y ; Z$  - единичные координатные массовые силы; ( $H/кг$ ).

Воздушный поток проходит через вертикальную перфорированную трубу, затем через зерновой слой, засыпанный в кольцеобразном сечении камеры. Вследствии тепломассо-

обмена происходит сушка материала (зерна пшеницы) и далее увлажненный воздух удаляется через спиралеобразную трубу, соеди-

нённую с всасывающим вентилятором. Имеет место периодический процесс сушки.

Основные физические факторы: давление сопротивления слоя зернистого материала ( $\Delta p_c$ , Па) и тепломассообмен при сушке, то есть количество удаляемой влаги ( $W$ , кг), скорость процесса сушки ( $u_c$ ), изменение температуры в зоне сушки ( $\Delta t$ , °C) и требуемое время процесса ( $\tau$ , с).

Математическая модель сушки зернистого материала, как детерминированного процесса, должна быть представлена в виде дифференциальных уравнений в частных производных. Данная модель является моделью с распределёнными параметрами, так как основные переменные изменяются во времени и пространстве. Математическая модель, как математическое описание, состоит из уравнений материального, теплового балансов, уравнений

гидродинамики в установившемся и неуставившемся состояниях.

Математическая модель представляет собой основу для создания материальной модели процесса и проведению эксперимента с последующей обработкой данных. В результате получают критериальные уравнения процессов, позволяющие сравнительно просто рассчитать процессы при различных технологических режимах.

Составим систему уравнений математической модели сушки, применив в качестве базиса:

1. Уравнение неразрывности потока.
2. Уравнение диффузии в движущейся среде.
3. Уравнение движения вязкой среды (потока воздуха) при ламинарном движении через неподвижный слой частиц зерна:

$$\left. \begin{aligned} & \rho \cdot \left( \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) = 0 \\ & D \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = w_x \frac{\partial C}{\partial x} + w_y \frac{\partial C}{\partial y} + w_z \frac{\partial C}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} & \rho \cdot \left( \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 w_x \\ & \rho \cdot \left( \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 w_y \\ & \rho \cdot \left( \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w_z \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При следующих граничных условиях:

$$-D \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} = \beta \cdot (C_f - C_0)$$

Для тепломассообмена в качестве математической модели используем дифференциальное уравнение влагопереноса А.В.

Лыкова и уравнение кинетики влагосодержания, как результат решения [3, 4].

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 T + a_m \frac{k_p}{\rho_0} \nabla^2 P \\ & \text{при граничных условиях} \\ & -a_m \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{nos} = a_{mu} (u_{nos} - u_p) \\ & -\frac{dW^c}{d\tau} = k(W^c - W_p^c) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где:  $k$  – коэффициент сушки,  $c^{-1}$ ;  
 $a_{mi}$  – коэффициент внешнего массо-обмена,  $m/c$ ;  
 $a_m$  – коэффициент внутренней диффузии влаги,  $m^2/c$ ;  
 $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{нов}$  – градиент влагосодержания на поверхности,  $кг/кг$ ;  
 $u_{нов}$  – влагосодержание поверхности материала,  $кг/кг$ ;  
 $\delta$  – коэффициент термодиффузии,  $кг/(кг \cdot ^\circ C)$ ,  
 $k_p$  – коэффициент молярного переноса

пара,  $m^2/c$ ;  
 $\rho_o$  – плотность сухого вещества,  $кг/m^3$ .  
 Уравнение (5) справедливо при условии постоянства коэффициентов влагопереноса. В действительности коэффициенты переноса изменяются во времени с изменением влагосодержания материала, поэтому характер зависимости скорости сушки от влажности во втором периоде будет нелинейным.  
 Для определения коэффициента сушки для зерна пшеницы применим преобразования В.И.Жидко [1,3]

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{k_k \varphi(W_0^c) \frac{F}{G_{сyx}}}{1 - \alpha \theta_n}; \\ \alpha = \frac{k_2 - 1}{k_2 \cdot \Delta \Theta}; \\ k = A(1 - \varphi)^2 (B + v^p) \left(\frac{T}{100}\right)^m \end{array} \right. \quad (6)$$

где:  $\Theta_n$  – начальная температура материала,  $^\circ C$ ;  
 $\alpha$  – коэффициент, учитывающий изменение продолжительности сушки с изменением начальной температуры семян на  $1^\circ C$ ;  
 $k_2$  – коэффициент, равный соотношению средних скоростей сушки предварительно нагретых и ненагретых семян, просушенных при одинаковых условиях;  
 $\Delta \Theta$  – разность начальных температур семян,  $^\circ C$ ;  
 $k_k$  – постоянный коэффициент, характеризующий среднюю скорость сушки данной культуры по отношению к пшенице;  
 $\varphi(W_0^c)$  – функциональная зависимость продолжительности сушки от начальной влажности исследуемого материала (эта

функция определяется экспериментально);  
 $F/G_{сyx}$  – удельная поверхность испарения, численно равная отношению поверхности семян к массе сухого вещества навески семян;  
 $W_0^c$  – начальная влажность семян, %.  
 Для сушки зерна в широком диапазоне изменения параметров сушильного агента была получена эмпирическая зависимость коэффициента сушки от режима сушки:  
 $A, B, p, m$  – постоянные величины, определяемые опытным путем;  
 $v, T$  – соответственно скорость движения и температура теплоносителя.  
 В качестве математической модели для описания кривой сушки можно использовать уравнения соответственно Т. Томпсона и Б. С. Сажина [5]

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau = A \ln \frac{W^c - W_p^c}{W_0^c - W_p^c} + B \left( \ln \frac{W^c - W_p^c}{W_0^c - W_p^c} \right)^2; \\ \tau = \frac{G}{k(U_n - B)} \ln \left[ \frac{(U_n - U)(A - B)}{(U_n - A)(U - B)} \right], \end{array} \right. \quad (7)$$

где:  $G$  – масса высушиваемого материала, кг/м<sup>2</sup>;  
 $k$  – константа скорости сушки;  
 $A$  и  $B$  – соответственно начальное и конечное равновесное влагосодержание.

Процесс массоотдачи для периодического процесса при неустановившемся режиме описывается уравнением вида:

$$dM = \beta \cdot (C_f - C_0) dF d\tau \quad (8)$$

где:  $dM$  – элементарная масса влаги, перешедшая из зерна в воздушный поток;  
 $dF$  – элементарная площадь контакта между зерном и воздушным потоком;

$d\tau$  – элементарное время контакта при массообмене.

Для установившегося периодического процесса в экспериментальной установке уравнение массоотдачи примет вид:

$$M = \beta \cdot (C_f - C_0) F \tau \quad (9)$$

где:  $\rho$  – средняя плотность воздушного потока, кг/м<sup>3</sup>;  
 $w_x$ ;  $w_y$ ;  $w_z$  – проекции средней скорости по координатам, м/с;  
 $C$  – массовая концентрация влаги в системе влажный материал – сушильный агент, кг/кг;  
 $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  
 $P$  – давление в системе, Па;  
 $\nabla^2$  – квадрат градиента скорости, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  
 $\mu$  – динамический коэффициент вязкости воздушного потока, м<sup>2</sup>/с;

$C_f$  – массовая концентрация влаги в системе на границе системы влажный материал – сушильный агент, кг/кг;

$C_0$  – массовая концентрация влаги в ядре сушильного агента, кг/кг;

$\beta$  – коэффициент массоотдачи от влажного продукта к воздушному потоку, м/с.

Согласно кинетики процесса сушки капиллярно-пористых тел, протекающих в два периода, массовую скорость в кг/м<sup>2</sup>·ч для каждого периода 1 и 2 соответственно ( $U_1$  и  $U_2$ ) представим в виде уравнений (кинетическая модель сушки):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = \frac{dW}{d\tau} \\ U_2 = -\frac{dW}{d\tau} = K(W - W_p) \end{array} \right. \quad (10)$$

где:  $W$  – влажность материала, % мас.  
 $W_p$  – равновесная влажность, % мас.  
 $K$  – коэффициент сушки, характеризующий интенсивность процесса влагообмена.

### **Результаты и их обсуждение**

Дифференциальные уравнения массоотдачи и конвективного теплообмена имеют очевидную общность, из чего следует, что основные критерии подобия диффузионных процессов должны иметь одинаковый вид с критериями

подобия тепловых процессов. Для практического моделирования и обработки экспериментальных исследований система дифференциальных уравнений в частных производных, как математическая модель, должна быть представлена на основании теоремы Федермана-Бэкингема в общей критериальной форме с учётом массообмена, теплообмена при движении воздушного потока через зернистый слой:

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu_D = f(Re, Fr, Eu, Ho) \\ Nu = f(Re, Fr, Eu, Ho) \\ Eu = f(Re, Fr, Ho) \end{array} \right. \quad (11)$$

где:  $Nu_D$  - диффузионный критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность обмена вещества на границе раздела фаз.

$Pe_D$  - диффузионный критерий Пекле, характеризующий интенсивность обмена вещества в движущейся среде.

$Re$  - критерий Рейнольдса, учитывающий влияние сил внутреннего трения в вязкой жидкости.

$Eu$  - критерий Эйлера, учитывающий соотношение сил активного давления к давлению сопротивления в потоке.

$Fr$  - критерий Фруда, учитывающий соотношение сил тяжести и инерции в потоке.

$Ho$  - критерий гомохронности, учитывающий в общем случае неустановившееся состояние движения потока воздуха.

$Nu$  - критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность обмена теплом на границе раздела фаз.

$Pe$  - критерий Пекле, характеризующий интенсивность обмена теплом в движущейся среде.

Применительно к данному установившемуся периодическому процессу массообмена - конвективной сушке зерна - критериальная функциональная зависимость (5) упрощается. Выпадают критерий гомохронности  $Ho$ , критерий Фруда  $Fr$ , критерий Пекле  $Pe$ . Имеем:

$$Nu_D = f(Re, Pr_D) \quad (12)$$

$$Nu_D = \frac{\beta \cdot \ell}{D} \quad (13)$$

где:  $\ell$  - определяющий линейный размер, в данном случае, высота слоя зерна в камере;  
 $\beta$  - коэффициент массоотдачи от влажного продукта к воздушному потоку, м/с.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} \quad (14)$$

где:  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от зерна к потоку воздуха, Вт/м<sup>2</sup>·град;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м·град.

Для расчёта коэффициента теплоотдачи

$\alpha$  согласно рекомендациям М. Э. Аэрова, О. М. Тодеса и Д. А. Наринского [5] целесообразно использовать критериальное уравнение Нуссельта вида:

$$Nu_s = 0,395 \cdot Re^{0,64} \cdot Pr^{0,33} \quad (15)$$

$$Re = \frac{w \cdot \ell \cdot \rho}{\mu} \quad (16)$$

где:  $w$  - средняя скорость движения воздушного потока через слой зерна, м/с;

$$Pr_D = \frac{Pe_D}{Re} = \frac{\nu}{D} \quad (17)$$

где:  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости воздушной среды, м<sup>2</sup>/с.

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2} \quad (18)$$

где:  $\Delta p$  - избыточное давление в воздушном потоке, создаваемое нагнетательной вентиляционной установкой, Па.

На основании второй теоремы подобия в явном виде функциональная зависимость (19) имеет форму критериальных уравнений, что

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu_D = A \cdot Re^m \cdot Pr_D^n \\ Nu = B \cdot Re^x \cdot Pr^y \\ Eu = K \cdot Re^a \end{array} \right. \quad (19)$$

В результате математической обработки проведенных экспериментов [7] и инженерных расчётов определим конкретные числовые значения показателей степени  $m$ ,  $n$  и коэффициента  $A$  для  $Nu_D$  и  $x$ ,  $y$  для  $Nu$ , а также  $a$  и  $K$  для  $Eu$ .

Движение потока газа (воздуха) через неподвижный слой частиц (зерно) характеризуется нестационарным состоянием процесса теплообмена. Это объясняется тем, что концентрация вещества (влаги) внутри частиц в каждой точке слоя и концентрация влаги в воздухе, выходящего из слоя, непрерывно изменяются.

Выбираем из таблицы типовых гидродинамических моделей массообменных процессов соответствующую модель (с учётом адекватности предложенной модели на основе сравнения экспериментальной кривой отклика на возмущение с расчётной кривой, полученной на математической модели).

Принимаем однопараметрическую диффузионную модель (табл. 1). Основным параметром данной модели является коэффициент продольной диффузии  $D_L$ . Этот коэффициент по форме и размерности аналогичен коэффициенту молекулярной диффузии. При  $D_L \rightarrow \infty$  модель приближается к модели идеального

является математической моделью процесса сушки неподвижного зернистого слоя с учётом одновременного тепло- и массообмена в условиях принудительной конвекции, а также движения воздушного потока в установке:

Экспериментально доказано, что при одном и том же значении критерия  $Re$  толщина условного температурного слоя изменяется в зависимости от интенсивности испарения. Поэтому для сушки и охлаждения зерна, как теплообменного комплексного процесса имеет значение термодинамическое состояние влажного газа (воздушного потока).

С этой целью введём температурный критерий  $K_t$  аккумулярующей способности воздуха, как парогазовой смеси, поглощать пар. Температура среды (воздуха)  $T_c$  и температура насыщения  $T_n$  принимаются по абсолютной шкале, чтобы избежать отрицательных значений  $K_t$ .

$$K_t = \frac{T_n - T_c}{T_c} \quad (20)$$

перемешивания. При  $D_L \rightarrow 0$  модель приближается к модели идеального вытеснения. Таким образом, однопараметрическая диффузионная модель находится между вышеуказанными крайними идеальными моделями.

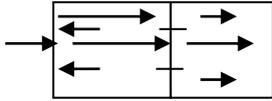
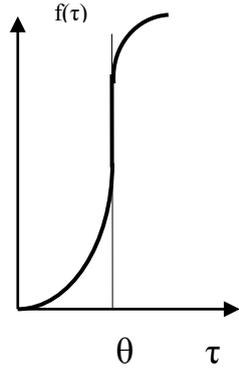
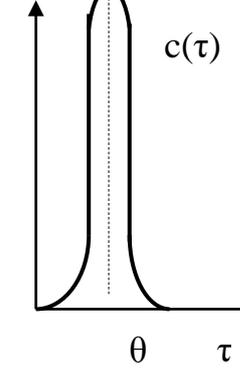
При составлении данной модели принимаем следующие допущения:

1. Изменение концентрации вещества (водяной пар) и энергии является непрерывной функцией координаты.
2. Концентрация вещества и энергии в данном сечении постоянны.

3.Объёмная скорость потока и коэффициент продольного перемешивания не из-

меняются по длине и сечению потока.

Таблица 1. Гидродинамическая модель диффузионного процесса (сушки)

Наименование модели	Схема потоков	Математическое описание	Характер отклика	
			Ступенчатое возмущение	Импульсное возмущение
Однопараметрическая диффузионная модель		$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -w \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$		

**Заключение, выводы**

Разработанная математическая модель охватывает и описывает все гидродинамические и тепломассообменные процессы, протекающие в предложенной нами установке для активного вентилирования зерна при любой интенсивности данных процессов. Математическая модель процесса активного вентилирования представляет собой функциональную зависимость между параметрами в установившемся (статике) и параметрами в неустановившемся (динамике) состояниях. Модель наиболее полно отражает характер потоков вещества и энергии при достаточно простом математическом описании. Предлагаемая математическая модель процесса активного вентилирования зерна отображает физический смысл протекающих процессов и может быть использована при анализе работы действующих установок для активного вентилирования зерна, а также на стадии их проектирования.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Д. А. Бритиков, Энергосбережение в процессах сушки зерновых культур с использованием теплонасосных технологий [Текст] : монография / Д. А. Бритиков, А. А. Шевцов; Воронеж. гос. технол. акад.– Воронеж : ВГТА, 2011. – 375 с.
2. В.Ф. Сорочинский, Догедин А.Л. Контроль процесса сушки зерна по параметрам обработавшего агента сушки // Хлебопродукты. – 2018. – № 3. – С.49-53.
3. С. А. Шевцов, Техника и технология

сушки пищевого растительного сырья [Текст] / С. А. Шевцов, А.Н. Остриков. – Воронеж : ВГУИТ, 2014. – 289 с.

4. Ostrikov A., Ospanov A., Shevtsov A., Vasilenko V., Timurbekova A. An empirical-mathematical modelling approach to explore the drying kinetics of cereals under variable heat supply using the stitched method // ACTA AGRICULTURAE SCANDINAVICA, SECTION B — SOIL & PLANT SCIENCE. – 2021. – P. 1-10.
5. Volkhonov M., Jabbarov I., Soldatov V., Smirnov I. Development of the method of exposure control of grain drying in high-temperature dryers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2013. – 3/3 (93). – P. 22-29.
6. Патент на полезную модель №5369. Республика Казахстан. Способ активного вентилирования или сушки сыпучих продуктов в емкостях и установка для его осуществления /Аскарар А.Д., Аскарар А.А., Насруллин Г.Ш.; Заявитель Аскарар Ардак Дахарбекович. – заявка 2019/1050.2, дата подачи заявки 29.11.2019; дата публикации 11.09.2020.
7. Askarov A., Tlevlessova Dinara., Ostrikov A., Shambulov Ye., Kairbaeva A. // Investigation of the processes of drying grain masses with active ventilation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1/11(115) 2022. – P. 6 – 14.

**REFERENCES**

1. Britikov, D. A. Energy saving in the processes of drying grain crops using heat pump technologies [Text]: monograph / D. A. Britikov, A. A. Shevtsov; Voronezh. state technol. acad. - Voronezh: VGTA, 2011. - 375 p.

2. Sorochinsky, V.F., Dogadin A.L. Control of the grain drying process according to the parameters of the spent drying agent // *Khleboprodukt*. - 2018. - No. 3. - P. 49-53.

3. Shevtsov, S.A. Technique and technology of drying food plant raw materials [Text] / S.A. Shevtsov, A.N. Ostrikov. - Voronezh: VGUIT, 2014. - 289 p.

4. Ostrikov A., Ospanov A., Shevtsov A., Vasilenko V., Timurbekova A. An empirical-mathematical modeling approach to explore the drying kinetics of cereals under variable heat supply using the stitched method // *ACTA AGRICULTURAE SCANDINAVICA, SECTION B - SOIL & PLANT SCIENCE*. - 2021. - R. 1-10.

5. Volkonov M., Jabbarov I., Soldatov V., Smirnov I. Development of the method of exposure control of grain drying in high-temperature dryers //

*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. - 2013. - 3/3 (93). - R. 22-29.

6. Patent for utility model No. 5369. The Republic of Kazakhstan. The method of active ventilation or drying of bulk products in containers and installation for its implementation / Askarov A.D., Askarova A.A., Nasrullin G.Sh.; Applicant Askarov Ardak Dakharbekovich. – application 2019/1050.2, application date 11/29/2019; publication date 11.09.2020.

7. Askarov A., Tlevlessova Dinara., Ostrikov A., Shambulov Ye., Kair-baeva A. // Investigation of the processes of drying grain masses with active ventilation // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 1/11(115) 2022. - P. 6 - 14.

УДК 664.8.047  
МРНТИ 65.09.03

<https://doi.org/10.48184/2304-568X-2022-3-201-207>

## ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СУБЛИМИРОВАННЫХ ЯГОД ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ КАШ БЫСТРОГО ПРИГОТОВЛЕНИЯ

<sup>1</sup>М. МҰРАТХАН\*, <sup>2</sup>Б.К. БУЛАШЕВ, <sup>2</sup>Г.Х. ОСПАНКУЛОВА, <sup>3</sup>Д.Б. ТОЙМБАЕВА,  
<sup>3</sup>С.Г. КАМАНОВА, <sup>2</sup>Л.А. МУРАТ, <sup>2</sup>Е.Е. ЕРМЕКОВ, <sup>2</sup>С.А. САДУАХАСОВА

(<sup>1</sup>Семипалатинский государственный университет имени Шакарима, Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А)

(<sup>2</sup>НАО «Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина», Казахстан, 010011 г. Нур-Султан, пр. Женис 62)

(<sup>3</sup> Northwest A&F University, Yangling, Xianyang, Shaanxi Province, P.R. China)

Электронная почта автора корреспондента: marat-muratkhan@mail.ru\*

*Зерновые культуры - хороший источник углеводов и белков, являются важными источниками витаминов группы В и витамина Е, поэтому эти культуры широко используются для производства каш быстрого приготовления, в основном, в виде экструдированных продуктов. Для обогащения зерновых каш витаминами, антиоксидантами, клетчаткой и фитохимическими веществами зачастую используются фрукты или овощи. В статье представлены результаты исследований химического состава сублимированных ягод (голубика, клубника, малина, смородина и облепиха). В результате исследований минерального состава установлено, что количество минеральных соединений во всех образцах находилось в пределах допустимой концентрации. Наивысшее содержание цинка, магния, железа и селена наблюдается в ягоде облепихи (2,12 мг/кг, 198,71 мг/100г, 13,55 мг/кг и 5,08 мг/100г соответственно). Концентрация меди в смородине составляет 408,93 мг/кг, что значительно превышает показатели других ягод. Содержание кальция находится почти на одном уровне во всех пробах за исключением смородины и облепихи, у которых эти показатели ниже. Содержание йода отсутствует у клубники и голубики. Установлено, что высокими показателями витамина А и Е среди сублимированных ягод обладает облепиха (796,01 мг/г и 17,09 мг/г соответственно). Наибольшее содержание витаминов В3 и В5 обнаружено у смородины (1,591 мг/г, 0,308 мг/г). Высокой антиоксидантной активностью в сравнении с другими ягодами обладает клубника (3,94 мг/г). Также у клубники наибольшее суммарное содержание углеводов (28,56 %). Данные продукты перспективны в качестве составляющих каш быстрого приготовления, так как сублимация позволяет сохранить в ягодах питательные вещества и полезные свойства.*

**Ключевые слова:** концентрат каш, ягодное сырье, витамины, антиоксидантная активность, минеральные вещества, углеводы.