

Научная статья
УДК 631.243.3
doi: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-130-135

Исследование динамических процессов тепло- и массопереноса сушки активным вентилированием

Артур Мухамедович Сохроков

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030, ya.kantik-2013@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0873-7715>

Аннотация. Широко используемые в сельскохозяйственном производстве установки активного вентилирования применяются для временной консервации семян, прошедших первичную очистку, путем охлаждения наружным воздухом (при перегрузке сушилок), подсушки семян (особенно культур, требующих мягких режимов сушки), вентилировании семян при длительном хранении, предпосевного обогрева. Автоматизацию бункеров активного вентилирования рассчитывают на ведение процесса сушки при автоматизированном управлении. Атмосферный воздух, используемый в качестве сушильного агента, подогретый электрокалорифером и нагнетаемый вентилятором, подается в центральную трубу и продувает семена в радиальном направлении. Схема управления в режиме сушки обеспечивает регулирование относительной влажности входящего воздуха при влажности зерна 15-22%. Влажность наружного воздуха не должна превышать 65%. Если влажность воздуха более 65%, автоматически включается электрокалорифер. Когда относительная влажность воздуха становится ниже 65%, электрокалорифер отключается. При работе в режиме сушки зерна контролируется и управляется процессом регулирования сушильного агента (теплоносителя), температуры и влажности зерновой массы. В статье рассматривается оригинальное обоснование одной из методик представления дифференциальных уравнений, характеризующих динамику процессов тепло- и массопереноса при сушке в бункерах активного вентилирования, в виде передаточных функций.

Ключевые слова: активное вентилирование, сушка, теплопередача, массоперенос, зерновой слой, влажность, температура, передаточная функция, автоматизация

Для цитирования. Сохроков А. М. Исследование динамических процессов тепло- и массопереноса сушки активным вентилированием // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2022. № 4(38). С. 130–135. doi: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-130-135

Original article

Study of the dynamic processes of heat and mass transfer of drying by active ventilation

Artur M. Sokhrokov

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik,
Russia, 360030, ya.kantik-2013@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0873-7715>

Abstract. Active ventilation units, widely used in agricultural production, are used for temporary preservation of seeds that have undergone primary cleaning by cooling with outside air (when dryers are overloaded), drying seeds (especially crops that require mild drying modes), ventilating seeds during long-term storage, and pre-sowing heating. Automation of active ventilation bunkers is designed to conduct the drying process with automated control.

Atmospheric air used as a drying agent, heated by an electric heater and forced by a fan, is fed into the central pipe and blows the seeds in the radial direction. The control circuit in the drying mode provides regulation of the relative humidity of the incoming air at a grain moisture content of 15-22%. Humidity of the outside air should not exceed 65%. If the air humidity is more than 65%, the electric heater automatically turns on. When the relative humidity drops below 65%, the electric heater switches off. When operating in the grain drying mode, the process is controlled and managed by the regulation of the drying agent (heat carrier) and the regulation of the temperature and humidity of the grain mass. The article considers a technique for representing differential equations that characterize the dynamics of heat and mass transfer processes during drying in active ventilation bunkers in the form of transfer functions.

Keywords: active ventilation, drying, heat transfer, mass transfer, grain layer, humidity, temperature, transfer function, automation

For citation. Sokhrokov A.M. Study of the dynamic processes of heat and mass transfer of drying by active ventilation. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2022;4(38):130–135. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-130-135

Введение. Зерновая масса, располагаемая в бункере активного вентилирования при сушке, представляет собой плотный слой. Для исследования динамики процессов тепло- и массопереноса в таком слое составляется математическая модель, имитирующая процесс сушки при активном вентилировании [1]. В этой связи можно использовать характеристические дифференциальные уравнения модели элементарного слоя зерна. Эти уравнения математически описывают изменение основных параметров для систем управления работой установки.

Цель исследования. Определение закономерностей изменения параметров тепло- и массопереноса сушки активным вентилированием и разработка методики представления их в передаточных функциях для возможности дальнейшего усовершенствования автоматического регулирования скоростным и температурным режимами установки.

Материалы, методы и объекты исследования. Исследования по определению дифференциальных уравнений, характеризующих динамику теплопередачи в зерновых слоях и изменения влагопоглощающей способности сушильного агента, в процессе сушки активным вентилированием, проводились составлением имитационного математического моделирования и лабораторной установки. Для представления полученных характеристических уравнений в виде передаточных функций использовался метод преобразования Лапласа.

Результаты исследования. Представим уравнения, характеризующие динамику процесса теплопередачи в элементарном слое передаточными функциями для плотной зерновой массы.

Приведем уравнение, отражающее тепло- и влагообмен в зерновой массе, продуваемой подогретым атмосферным воздухом [2, 3]:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -K(W - W_p),$$

где:

K – коэффициент, характеризующий процесс теплопередачи, 1/ч;

W – влажность обрабатываемого зерна, %;

W_p – равновесная влажность зерна, %;

τ – время, ч.

Заменим в этом выражении дифференциал $\frac{\partial}{\partial \tau}$ на оператор p , и запишем в представленной форме:

$$W(p) = W_p \frac{K}{p + K}. \quad (1)$$

На рисунке 1 представлена модель единичной зерновки, находящейся в плотном слое. Температуру подаваемого подогретого атмосферного воздуха обозначим T_0 , а значение влагосодержания – D_0 . Используя рисунок, зададимся начальными и допустимыми граничными условиями и представим выражения в системе с частными производными.

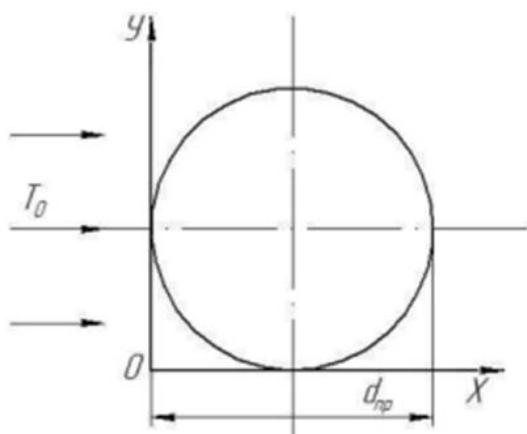


Рисунок 1. Модель единичной зерновки
Figure 1. Single grain model

Вентилируемый плотный слой зерновой массы равный, как известно, $l = 1, 2$ м, условно можно представить состоящим из 222 элементарных слоёв [2]. Укажем, что объединение этих слоёв в группы не повлияет на выполнение расчётов с точным приближением.

Начальными величинами, входящими в выражения моделируемого плотного слоя при обработке в вентилируемых бункерах, являются параметры поступающих в них воздуха (температура T_H , относительная влажность F_H) и зерновой массы (начальная влажность W_H , температура θ_H) [1, 4].

Выходными параметрами, характеризующими тепло- и влагообмен в конце сушки, являются температура $T_{ВЫХ}$ и влажность $F_{ВЫХ}$ воздуха на выходе из зерновой массы.

Из приведенного следует, что выходным параметрам $T_{ВЫХ}$, $F_{ВЫХ}$, W , θ_3 соответствуют по пять влияющих на них канала – T_H , F_H , W_H , θ_H , $V_{ВХ}$ – скорость воздуха на входе в слой зерновой массы. T_0 , F_0 , W_0 , θ_0 , V_0 – параметры воздуха и зерновой массы, для которых находим передаточные функции.

Преобразовав дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса, получим параметры влажности W и температуры θ_3 элементарного слоя зерновой массы, которые в дальнейших расчетах будут учитываться как входные.

Скорость поступающего подогретого воздуха $V_{ВХ}$ на входе может быть различной на отдельных слоях зерновой массы, поэтому параметры $T_{ВЫХ}$ и $F_{ВЫХ}$ будут входными также для последующих расчётов элементарных слоёв, располагающихся по направлению поступления воздуха [5, 6].

Принятая модель точно описывает процесс тепло- и массопереноса в плотном слое зерновой массы по последовательной методике определения передаточных функций:

$$\frac{V\tau}{l} = 50 \cdot 10^{-5} \left(\frac{r'(W_H - W_K)}{c_3(T_H - \theta_H)} \right)^{0,95} \times \left(\frac{T_a - T_m}{273 + T_H} \right)^{-1,9} \left(\frac{Vd_{np}}{g} \right)^{0,31} \left(\frac{d_{np}}{l} \right)^{-0,07}, \quad (2)$$

где:

l – толщина слоя зерновой массы;

r' – значение скрытой теплоты парообразования;

W_H – влажность зерна на входе;

W_K – влажность зерна на выходе;

c_3 – удельная теплоемкость зерна;

T_a – температура поступающего воздуха;

T_m – значение температуры воздуха, полученной в результате измерения по мокрому термометру;

d_{np} – диаметр элементарной зерновки;

g – значение вязкости воздуха (кинематическая).

Однако в связи с нестационарностью значений передаточных коэффициентов и необходимостью определения передаточных функций по всем каналам воздействия, становится сложной практическая реализация выражения (2). Так, из представленного выражения для определения коэффициентов передаточной функции видно, что в него входят изменяющиеся в процессе обработки переменные по времени τ значения температур мокрых и сухих термометров (T_m и T_H соответственно).

В следующих представленных выражениях, отражающих законы:

- сохранения энергии при сушке

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial \tau} + 3600 \frac{\partial T}{\partial x} = \\ & = -\frac{\gamma_3 c_3}{\gamma_6 c_6 \varepsilon} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\gamma_3 r'}{\gamma_6 c_6 \varepsilon \cdot 100} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau}; \end{aligned} \quad (3)$$

- тепло- и массопереноса в зерновом слое, продуваемом подогретым воздухом

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + 3600 \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\alpha_q s_v}{\gamma_6 c_6 \varepsilon} \cdot (T - \theta), \quad (4)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -K(W - W_p); \quad (5)$$

- сохранения вещества

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -\frac{\varepsilon \gamma_6}{10^3 \gamma_3} \cdot \left(\frac{\partial D}{\partial \tau} + 3600V \cdot \frac{\partial D}{\partial x} \right), \quad (6)$$

содержатся частные производные.

Используем метод Лапласа [7] при решении рассмотренных выражений (3), (4), (5) и (6). Преобразование осуществляется в соответствии с правилом: если $T = T(x, \tau)$ и выполняется по переменной τ ($\tau \geq 0$), то используя следующее обозначение $L[T(x, \tau)] \equiv T(x, \tau) \int_0^\infty e^{-p\tau} T(x, \tau) d\tau$, установив следующие равенства для интегрирования рассматриваемых уравнений по частям:

$$L\left[\frac{\partial T}{\partial \tau}\right] = pT(x, p) - T(x, 0),$$

$$L\left[\frac{\partial T}{\partial x}\right] = \frac{\partial T}{\partial x}(x, p),$$

где:

$T(x, 0)$ – значение температуры в начале сушки.

При преобразовании выражения (3) по переменной τ должна быть получена зависимость температуры подогретого воздуха на выходе из элементарного слоя зерновой массы от начальной температуры на входе, изменения влажности и температуры слоя зерновой массы [8].

С учётом того, что уравнение рассматривается относительно температуры T , то за исходное значение принимается температура на входе в зерновой слой T_0 . Рассмотрим уравнение в операторной форме:

$$\begin{aligned} & pT(x, p) - T(x, 0) + 3600V \frac{\partial T}{\partial x} = \\ & = -A_1 p\theta(x, p) - A_2 pW(x, p), \end{aligned} \quad (7)$$

где:

$$A_1 = \frac{\gamma_3 c_3}{\gamma_6 c_6 \varepsilon}; \quad A_2 = \frac{\gamma_3 r'}{100 \cdot \gamma_6 c_6 \varepsilon}.$$

Заменим в выражении (7) координату x на элементарный диаметр зерновки d_{np} :

$$\begin{aligned} & 3600V \frac{\partial T}{\partial d_{np}} = -A_1 p\theta(d_{np}, p) - \\ & - A_2 pW(d_{np}, p) - pT(d_{np}, p) + T(d_{np}, 0). \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда запишем функцию с одной переменной T :

$$3600V \frac{dT}{dd_{np}} = pT(d_{np}, p) + T(d_{np}, 0). \quad (9)$$

Обозначим граничные условия $T(0, 0) = T_0$, и решим выражение относительно d_{np} :

$$T(p) = \frac{T_0(p) - e^{-p\tau_1} T_0(p) + pT_0(p) e^{-p\tau_1}}{p}, \quad (10)$$

где:

$$\tau_1 = \frac{d_{np}}{3600V} \quad \text{— время запаздывания су-$$

шильного агента со скоростью V в элементарном слое зерновой массы.

Проставим в выражение (10) значения температуры и влажности и преобразуем его в операторную форму, отражающую относительное изменение температуры сушильного агента по всем влияющим каналам:

$$\begin{aligned} & T(p) = T_0(p) \frac{1}{p} (1 + pe^{-p\tau_1} - e^{-p\tau_1}) - \\ & - A_1 \theta(p) p - A_2 W(p) p. \end{aligned} \quad (11)$$

Для получения уравнения зависимости в форме $T = f(\theta, W, T_0)$ производим обратное преобразование по Лапласу выражения (11) [6]. Упрощая эту процедуру, изобразим выражение (11) в виде схемы передаточных функций, представленной на рисунке 2, согласно [9].

На функциональной схеме (рис. 2) представлены следующие передаточные функции: $\frac{1}{p}$ – интегрирующее звено; P – дифференцирующее звено; $e^{-p\tau_1}$ – звено запаздывания; A_1, A_2 – усилительные звенья. Из схемы следует, что от скорости изменения температуры и влажности элементарных зерновок зависит температура сушильного агента на выходе из рассматриваемого слоя.

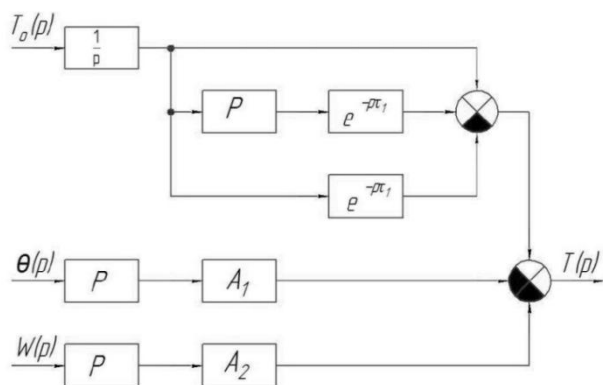


Рисунок 2. Функциональная схема, отражающая уравнение (3) в виде передаточных функций
Figure 2. Functional diagram reflecting equation (3) in the form of transfer functions

Аналогично произведем перестановки для оставшихся выражений (4) и (6). Получим систему уравнений и передаточных функций для расчёта тепло- и массопереноса в плотном слое зерновой массы:

$$T(p) = T_0(p) \frac{1 + pe^{-p\tau_1} - e^{-p\tau_1}}{p} - A_1\theta(p)p - A_2W(p)p;$$

$$\theta(p) = T(p) \frac{1}{A_4} -$$

$$-T_0(p) \frac{(1 - A_4) \cdot (1 - e^{-p\tau_1}) + pe^{-p\tau_1}}{pA_4};$$

$$D(p) = D_0(p) \frac{1 + pe^{-p\tau_1} - e^{-p\tau_1}}{p} - \frac{1}{A_3}W(p)p,$$

$$W(p) = W_p \frac{K}{p + K},$$

$$W_p = \left[\frac{\ln(1 - F)}{5,47 \cdot 10^{-6} (T + 273)} \right]^{0,435},$$

$$K = 7,1 \cdot 10^{-2} e^{0,05T},$$

$$F = \frac{745D}{(622 + D)e^{(0,622 + \frac{7,5T}{238 + T})}}.$$

Выводы. Результаты исследования процесса сушки зерна на установке активного вентилирования при изменяющихся параметрах скорости и температуры сушильного агента показывают, что для эффективного его управления требуется совершенствование математических моделей тепло- и массопереноса в зерновых слоях. Применение преобразования Лапласа позволяет упростить решение уравнений тепло- и массопереноса, представив их в форме передаточных функций и разработать модель автоматизированной технологической линии с оптимальными параметрами сушки.

Список литературы

1. Васильев А. Н., Северинов О. В. Математическая модель тепло- и влагообмена в элементарном слое при сушке зерна активным вентилированием // АгроЭкоИнфо. 2014. № 3(16). Ст. 3. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2014/3/st_13.doc
2. Васильев А. Н., Будников Д. А., Грачева Н. Н., Северинов О. В. Совершенствование технологии сушки зерна в плотном слое с использованием электротехнологий, АСУ и моделирования процесса. Москва: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2016. 176 с.
3. Муханов Н. В., Марченко С. А., Барабанов Д. В., Рябинин В. В., Абалихин А. М. Уравнение движения зернового слоя в активной зоне рециркуляционной зерносушилки бункерного типа // Аграрный вестник Верхневолжья. 2017. № 4(21). С. 88–96.

4. Бодров В. И., Бодров М. В. Тепломассообмен в биологически активных системах (теория сушки и хранения): учебное пособие. Н. Новгород: ННГАСУ, 2013. 145 с.
5. Пилаева О. В. Повышение эффективности воздухораспределительных систем бункеров активного вентилирования зерна: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Красноярск, 2009. 126 с.
6. Грачева Н. Н., Васильев А. Н., Будников Д. А. Критериальное уравнение сушки зерна активным вентилированием электроактивированным воздухом // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2011. № 73. С. 168–186. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/35.pdf>.
7. Александров И. А. Операционное исчисление и его применения: учебное пособие. Томск: Издательство Томского университета, 2013. 144 с.
8. Кечкин И. А. Активное вентилирование зерна в металлических силосах. В.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 65 с.
9. Гуляев Г. А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна. Москва: Агропромиздат, 1990. 240 с.

References

1. Vasil'ev A.N., Severinov O.V. Mathematical model of heat and moisture exchange in the elementary layer during grain drying by active ventilation. *AgroEkoInfo*. 2014;3(16):3. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2014/3/st_13.doc. (In Russ.)
2. Vasil'yev A.N., Budnikov D.A., Gracheva N.N., Severinov O.V. *Sovershenstvovaniye tekhnologii sushki zerna v plotnom sloye s ispol'zovaniyem elektrotekhnologiy, avtomatizirovannyye sistemy upravleniya i modelirovaniya protsessa* [Improving the technology of grain drying in a dense layer using electrical technologies, automated control systems and process modeling]. Moscow: FGBNU FNATS VIM, 2016. 176 p. (In Russ.)
3. Mukhanov N.V., Marchenko S.A., Barabanov D.V., Ryabinin V.V., Abalikhin A.M. The equation of grain layer motion in the active zone of recirculating hopper type dryer. *Agrarian journal of Upper Volga region*. 2017;4(21):88–96. (In Russ.)
4. Bodrov V.I., Bodrov M.V. *Teplomassoobmen v biologicheski aktivnykh sistemakh (teoriya sushki i khraneniya)* [Heat and mass transfer in biologically active systems (theory of drying and storage)]: *uchebnoe posobie*. Nizhny Novgorod: NNGASU, 2013. 145 p. (In Russ.)
5. Pilyayeva O.V. *Povysheniye effektivnosti vozdukhoraspredelitel'nykh sistem bunkerov aktivnogo ventilirovaniya zerna* [Improving the efficiency of air distribution systems of bunkers for active ventilation of grain]: *diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01*. Krasnoyarsk, 2009. 126 p. (In Russ.)
6. Grachyova N.N., Vasil'yev A.N., Budnikov D.A. The criterion equation of grain drying by the active aeration with electro activation air. *Polithematic online scientific journal of Kuban state agrarian university*. 2011;73:168–186. <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/35.pdf>. (In Russ.)
7. Aleksandrov I.A. *Operatsionnoye ischisleniye i yego primeneniya* [Operational calculus and its applications]: *uchebnoe posobie*. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 2013. 144 p. (In Russ.)
8. Kechkin I.A. *Aktivnoye ventilirovaniye zerna v metallicheskih silosakh* [Active ventilation of grain in metal silos]. V.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 65 p. (In Russ.)
9. Gulyaev G.A. *Avtomatizatsiya protsessov posleuborochnoy obrabotki i khraneniya zerna* [Automation of post-harvest processing and storage of grain]. Moscow: Agropromizdat, 1990. 240 p. (In Russ.)

Сведения об авторе

Сохроков Артур Мухамедович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 8252-5332, Author ID: 441609

Information about the author

Artur M. Sokhrokov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 8252-5332, Author ID: 441609

Статья поступила в редакцию 11.11.2022;
одобрена после рецензирования 29.11.2022;
принята к публикации 05.12.2022.

The article was submitted 11.11.2022;
approved after reviewing 29.11.2022;
accepted for publication 05.12.2022.