

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДИНАМИКИ СУШКИ ЗЕРНА ПРИ КОНТАКТНОМ СПОСОБЕ ТЕПЛОПОДВОДА

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Павлушин Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Карпенко Галина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина»

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, дом 1; тел.: 89050359200;

e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.

Ключевые слова: температурное поле, динамика контактной сушки, теплопроводность, зона испарения, критерий фазового превращения.

Рассмотрен механизм распределения температуры в зерновом слое при контактно-м способе теплоподвода. Раскрыта сущность критерия фазового превращения, основного критерия, характеризующего влияние внутреннего парообразования и переноса пара на интенсивность сушки и механизм переноса. Выявлены зависимости, позволяющие определить температурное поле в сухой и влажной областях слоя зерна и закон движения границы раздела этих областей.

Введение

Основой теории теплового воздействия на зерно при контактно-м способе подвода теплоты служат закономерности передачи теплоты от греющей поверхности к обрабатываемому зерну, обоснование переноса теплоты и влаги в зерновке, а также особенности удаления влаги с поверхности зерна.

Температура нагрева поверхности зерна t_3 находящегося в контакте с греющей поверхностью установки для тепловой обработки зерна, в первый период процесса теплового воздействия постоянна во времени и легко определима. При этом в зерновом слое происходит парообразование и перенос пара через обрабатываемый зерновой слой к его поверхности [1].

Для оценки влияния внутреннего парообразования и переноса пара на интенсивность сушки и механизм переноса используют модифицированный критерий фазового превращения

$$\varepsilon = \frac{j_n}{j}, \quad (1)$$

где j_i - внутренняя интенсивность парообразования, кДж/кг; j - средняя интенсивность сушки, кДж/кг, $j = j_n + j_0$ (j_0 - интенсивность испарения на открытой поверхности зерна и вблизи неё, кДж/кг).

Этот критерий применительно к первому периоду сушки может быть определён следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{q_n}{q} \quad (2)$$

или

$$\varepsilon = 1 - \frac{\lambda dt/dx}{rj}, \quad (3)$$

где q_n - плотность потока теплоты, переносимой паром, Вт/м²; q - плотность потока теплоты, Вт/м²; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); dt/dx - приращение температуры по толщине обрабатываемого зернового слоя; r - удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Критерий ε в течение первого перио-

да остаётся постоянным. Указанный критерий является основным при изучении процесса сушки зерна при контактном способе передачи теплоты. Он определяет, с одной стороны, долю потока пара \dot{J}_n , образовавшегося в контактном слое или внутри зерновки (во второй период), в общем потоке пара \dot{J} , покидающем высушиваемое зерно; с другой стороны, он оценивает долю теплоты, переносимой паром, образовавшимся в контактном слое и внутри зерновки, в общем потоке теплоты, полученном от греющей поверхности зерносушилки.

Следовательно, исследование динамики сушки зерна при контактном способе подвода теплоты позволяет выяснить физическую сущность явлений, которым подчиняется этот процесс.

Объекты и методы исследований

Весь процесс контактной сушки делят на первый период, а также 1-ю и 2-ю части второго периода, границей между которыми являются критические влагосодержания.

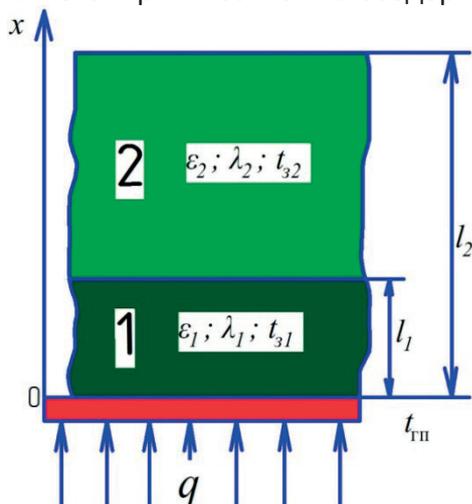


Рис. 1 – К формулировке задачи стационарной теплопроводности для единичного слоя зерна:

ϵ_1, ϵ_2 – критерии фазового превращения в 1 и 2 областях высушиваемого зерна соответственно; λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности высушиваемого зернового слоя в областях 1 и 2 соответственно, Вт/(м·°С); t_{31}, t_{32} – температура зернового слоя в 1 и 2 областях соответственно, °С

Для всех периодов процесса характерно наличие градиентов температуры внутри зерна [2].

В первом периоде контактной сушки зерновой слой, толщиной l_2 (рис. 1) находится в непосредственном соприкосновении ($x = 0$) с греющей поверхностью установки [3-9], имеющей температуру $t_{гр}$.

При этом в обрабатываемом зерне в плоскости $x = 0$ устанавливается постоянная температура $t_{гр}$. От греющей поверхности вследствие теплопроводности зерну передается теплота, плотность потока которой неизменна и равна q . В области высушиваемого зерна 1 толщиной l_1 действуют непрерывно и равномерно распределённые стоки теплоты. Количество теплоты, расходуемой на испарение влаги в области 1, определяют по общему потоку теплоты q и критерию фазового превращения ϵ .

В области 2, отличающейся от области 1 теплофизическими характеристиками, стоки теплоты отсутствуют.

На открытой поверхности $x = l_2$ происходит испарение и удаление с поверхности в окружающую среду как пара, образовавшегося на этой поверхности, так и пара, образовавшегося в контактном слое 1 и транспортируемого через зерно. Плотность потока теплоты через произвольную поверхность зерна складывается из плотностей потоков теплоты, переносимого теплопроводностью, паром и жидкостью.

Во втором периоде контактной сушки (рис. 2) перенос образовавшегося пара через поверхность $x = 0$ невозможен.

На поверхности $x = l_1$ происходят испарение и унос в окружающую паровоздушную среду как пара, образовавшегося на этой поверхности, так и пара, образовавшегося внутри зерна и транспортируемого через него. Плотность потока теплоты через произвольную поверхность зерна складывается из плотностей потоков теплоты, переносимого скелетом зерновки, паром и жидкостью.

Начальным (при времени $\tau = 0$) распределением температур по толщине зерна для второго периода сушки является аналитиче-

ское решение сопряжённой задачи теплопроводности для первого периода сушки с неподвижной границей. Следовательно, известна температура $t_{гн}$ в плоскости $x = 0$.

При этом, в связи с небольшим изменением теплофизических свойств тонкого слоя зернового материала в пределах каждой из частей второго периода величины a_1 и λ можно считать постоянными.

Будем полагать, что внутреннее испарение происходит лишь на движущейся границе, положение которой определяется функцией $\xi(\tau)$. При этом количество теплоты, расходуемой на испарение на границе областей, может быть определено по общему потоку теплоты, подводимой при сушке, и модифицированному критерию фазового превращения ε , который различен в 1-й и 2-й частях второго периода.

Результаты исследований

Для первого периода сушки (рисунок 1) поставленная стационарная сопряжённая задача теплопроводности математически может быть сформулирована следующим образом [10]:

$$a_1 \frac{d^2 t_{31}}{dx^2} - \frac{q_v}{\rho_1 c_1} \text{ при } 0 \leq x \leq l_1; \quad (4)$$

$$a_2 \frac{d^2 t_{32}}{dx^2} = 0 \text{ при } l_1 \leq x \leq l_2. \quad (5)$$

где a_1, a_2 - соответственно коэффициенты температуропроводности высушиваемого зерна в областях 1 и 2, m^2/c ; c_1 - удельная теплоёмкость зерна, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ_1 - удельная теплота фазового перехода в 1 области, $Dж/кг$.

Удельную производительность внутренних источников теплоты можно определить следующим образом:

$$q_v = \left| \frac{q\varepsilon}{l_1} \right|, \quad (6)$$

где q - плотность потока теплоты, $Вт/м^2$.

В результате решения системы(4) - (5) распределения температуры в областях 1 и 2 примут вид:

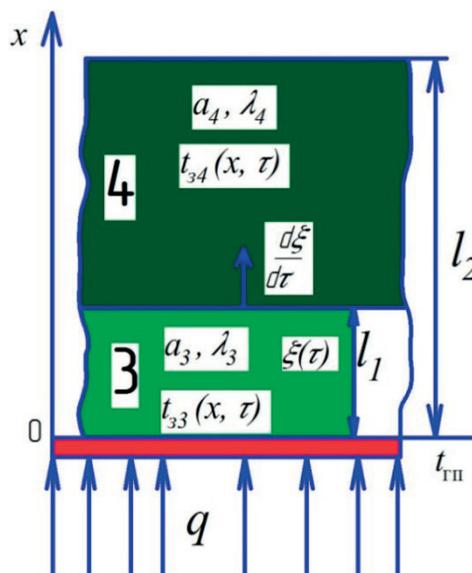


Рис. 2 – К формулировке задачи нестационарной теплопроводности с подвижной границей:

λ_3, λ_4 - коэффициенты теплопроводности высушиваемого зернового слоя в областях 1 и 2 соответственно, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; t_{33}, t_{34} - температура зернового слоя в 3 и 4 областях соответственно, $^\circ C$; ξ - глубина зоны испарения, $м$; a_3, a_4 - соответственно коэффициенты температуропроводности высушиваемого зерна в областях 3 и 4, $м^2/с$

$$t_{31} = t_{гн} + \frac{q\varepsilon}{\lambda_4 l_1} \frac{x^2}{2} - \frac{q(1+\varepsilon)}{\lambda_4} x, \quad (7)$$

$$t_{32} = t_{гн} - \frac{q l_1 (2+\varepsilon)}{2\lambda_1} - \frac{q(1+\varepsilon)}{\lambda_1} (x-l_1). \quad (8)$$

Как показывают приведённые зависимости, в области 1 слоя зерна, близкого к размерам единичного слоя, распределение температуры носит параболический характер, в области 2 - линейный.

Перепад температуры в слое зернового материала, контактирующем с греющей поверхностью, может быть определён из соотношения:

$$\Delta t = t_{гн} - t_{кc} = \frac{q(2+\varepsilon)}{2\lambda_1} l_1. \quad (9)$$

где $t_{кc}$ - температура в контактном

слое (температура на границе 1 и 2 областей).

$$t_{kc} = t_{zn} - \frac{q(2 + \varepsilon)}{2\lambda_1} l_1. \quad (10)$$

Определив t_{kc} , можно вычислить температуру t_{rn} в плоскости $x = 0$ по формуле:

$$t_{zn} = t_{kc} + \frac{q(2 + \varepsilon)}{2\lambda_1} l_1. \quad (11)$$

Температура нагрева зерна на расстоянии от греющей поверхности $x = l_2$ (температура на границе зернового слоя) может быть вычислена из выражения:

$$t_{zc} = t_{zn} - \frac{ql_1(2 + \varepsilon)}{2\lambda_1} - \frac{q(1 + \varepsilon)}{\lambda_2} (l_2 - l_1). \quad (12)$$

Знание величины даёт возможность оценить потери теплоты зерном и проанализировать зависимость J от t_{zc} .

Согласно (9) перепад температуры в слое зерна:

$$\Delta t = t_{zn} - t_{zc} = \frac{ql_1(2 + \varepsilon)}{2\lambda_1} + \frac{q(1 + \varepsilon)}{\lambda_2} (l_2 - l_1). \quad (13)$$

Как видно из (13), перепад температуры в слое зерна зависит от величин q , ε и λ . Чем больше величина ε , т. е. чем больше внутреннее парообразование (определяемое главным образом толщиной слоя l_2 и температурой t_{zn}), тем больше перепад температуры.

Величина

$$\Delta t_0 = \frac{q\varepsilon}{2\lambda_1} l_1 \quad (14)$$

обуславливает перепад температуры, вызванный лишь внутренним парообразованием в контактном слое зерна. Этот перепад температуры при постоянных q и ε будет тем выше, чем меньше коэффициент теплопроводности зерна λ_1 .

Математическая формулировка задачи сводится к следующему:

сухая область зернового слоя

$$\frac{dt_3}{d\tau} = a_3 \frac{d^2 t_3}{dx^2} \text{ при } \tau > 0, 0 \leq x \leq \varepsilon(\tau) \quad (15)$$

влажная область зернового слоя

$$\frac{dt_4}{d\tau} = a_4 \frac{d^2 t_4}{dx^2} \text{ при } \tau > 0, \varepsilon(\tau) \leq x \leq l. \quad (16)$$

Начальные условия:

$$t_\varepsilon(x, 0) = t_4(x, 0) = f_1(x); 0 \leq x \leq l. \quad (17)$$

Граничные условия:

1) на внешних неподвижных границах ($x = 0, x = l$)

$$-\lambda_3 \frac{dt_3(0, \tau)}{dx} = q(\tau) \text{ при } q(\tau) \neq 0; \quad (18)$$

$$-\lambda_4 \frac{dt_4(l, \tau)}{dx} - (1 - \varepsilon) \text{ при } q(\tau) = 0; \quad (19)$$

при этом $q(\tau)$ - любая непрерывная функция времени;

2) на подвижной границе $x = \varepsilon(\tau)$ раздела сухой и влажной областей высушиваемого зерна условиями сопряжения будут:

$$t_3(\varepsilon, \tau) = t_4(\varepsilon, \tau) = t_{zn} f(\tau), \quad (20)$$

где $f(\tau)$ - произвольная непрерывная функция времени, которая при $\tau = 0$ равна 1, т. е. в начальный момент времени температура на границе областей равна t_{rn} , а равенство потоков теплоты с учётом потока теплоты фазового превращения и изменения энтальпии высохшего слоя позволяет считать, что

$$-\lambda_3 \frac{dt_3(\varepsilon, \tau)}{dx} + \lambda_4 \frac{dt_4(\varepsilon, \tau)}{dx} = \varepsilon r m(\tau) - \Delta i, \quad (21)$$

где $m(\tau)$ - непрерывная функция времени [12].

Уравнение (21) представляет собой видоизменённое уравнение теплового баланса. Введённая на границе областей теплота совместно с изменением энтальпии Δi в результате фазового перехода (она «подпитывает» поток теплоты) затрачивается на испарение влаги на подвижной границе.

При этом энтальпия может быть определена из выражения

$$\Delta i = c_3 \rho_3 t_3(\varepsilon, \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} - c_4 \rho_4 t_4(\varepsilon, \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} =$$

$$= [c_3 \rho_3 t_3(\varepsilon, \tau) - c_4 \rho_4 t_4(\varepsilon, \tau)] \frac{d\varepsilon}{d\tau}. \quad (22)$$

Подставив (22) в (21), получим:

$$-\lambda_3 \frac{dt_3(\varepsilon, \tau)}{dx} + \lambda_4 \frac{dt_4(\varepsilon, \tau)}{dx} = \varepsilon rm(\tau) + [c_3 \rho_3 t_3(\varepsilon, \tau) - c_4 \rho_4 t_4(\varepsilon, \tau)] \frac{d\varepsilon}{d\tau}. \quad (23)$$

Следует отметить, что потери теплоты, обусловленные теплообменом зерна с окружающей средой, невелики, поэтому в условии (18) они не учтены. Определим температурное поле в сухой и влажной областях слоя зерна и закон движения границы раздела.

Численная реализация зависимостей, характеризующих распределение температурных полей при контактном способе передачи теплоты для второго периода (рисунок 2) показала, что распределение температур t_3 и t_4 по оси x можно считать с достаточной степенью точности линейным. Исходя из этого, примем:

$$t_3(x, \tau) = C_1(\tau) + C_2(\tau)x; \quad (24)$$

$$t_4(x, \tau) = C_3(\tau) + C_4(\tau)x, \quad (25)$$

где C_1, C_2, C_3 и C_4 – константы.

Тогда дифференциальные уравнения (15) и (16) можно привести к виду:

$$a_3 = \frac{d^2 t_3}{dx^2} = 0; \quad (26)$$

$$a_4 = \frac{d^2 t_4}{dx^2} = 0. \quad (27)$$

Окончательные выражения для распределения температуры в сухой и влажной областях слоя зерна получим в следующем виде:

$$t_3(x, \tau) = t_{zn} f(\tau) - \frac{1}{\lambda_3} q(\tau) [x - \xi], \quad (28)$$

$$t_4(x, \tau) = t_{zn} f(\tau) - \frac{1 - \varepsilon}{\lambda_4} q(\tau) [x - \xi]. \quad (29)$$

Из (29) следует, что при $\tau = 0$, чему соответствует $\xi(0) = 0$,

$$t_4(x, 0) = f_1(0) = t_{zn} - \frac{1 - \varepsilon}{\lambda_4} q(0)x.$$

Таким образом, начальное условие должно являться линейной функцией x .

Найдя из (28) и (29) выражения $\frac{dt_3(\xi, \tau)}{dx}$, $\frac{dt_4(\xi, \tau)}{dx}$, $t_3(\xi, \tau)$, $t_4(\xi, \tau)$, после преобразований получим [13]:

$$\varepsilon q(\tau) - \varepsilon rm(\tau) = t_{zn} f(\tau) [c_4 \rho_4 - c_3 \rho_3] \frac{d\xi}{d\tau}. \quad (30)$$

После интегрирования дифференциального уравнения (30) получим:

$$\xi = \int \frac{\varepsilon q(\tau) - \varepsilon rm(\tau)}{t_{zn} f(\tau) [c_4 \rho_4 - c_3 \rho_3]} d\tau + C. \quad (31)$$

Постоянную интегрирования C можно найти, используя условие, согласно которому при $\tau = 0$; $\xi = 0$.

Полученные решения (28), (29) и (30) могут быть использованы для анализа и расчёта процесса контактной сушки. При этом функцию

$$m(\tau) = -g \frac{du}{d\tau} = g k u_{кр} \exp(-k\tau), \quad (32)$$

где g – теплообменный параметр; k

– коэффициент сушки; $u_{кр}$ – критическое значение влагосодержания, кг/(кг сух. вещества), определяют по скорости сушки.

Обработка результатов распределения полей температуры при контактной сушке зерна показала, что температура на границе раздела сухой и влажной областей изменяется во времени по экспоненциальной зависимости.

Подставив функцию (30) в (31), выполнив интегрирование и определив произвольную постоянную, найдём частное решение уравнения (32):

$$\xi = \frac{1}{t_{zn} [c_4 \rho_4 - c_3 \rho_3]} \left\{ \frac{\varepsilon q}{v - n} [1 - \exp[-(v - n)\tau]] - \frac{B}{k - n} [1 - \exp[(k - n)\tau]] \right\}, \quad (33)$$

где $B = \varepsilon r g k u_{кр}$; ν – коэффициент, характеризующий скорость распространения теплового потока, n – коэффициент, характеризующий толщину зернового слоя.

Полученное уравнение (33) выражает закон углубления зоны испарения при контактной сушке и является исходным для определения ξ . Зная зависимость ξ от τ , можно использовать уравнение (33) для нахождения значения критерия фазового преобразования ε .

Выводы

Полученные аналитическим путём выражения, характеризующие динамику контактной сушки тонкого слоя зернового материала, позволяют провести анализ этого процесса и сравнить результаты расчётов с данными, полученными экспериментальным путём.

Приведённые зависимости можно использовать для расчёта температурного поля внутри тонкого слоя зернового материала в процессе контактной сушки в первый и второй периоды сушки, а также для расчёта других показателей процесса теплового воздействия на зерно.

Библиографический список

1. Курдюмов В.И. Теоретические и экспериментальные аспекты контактного способа передачи теплоты при сушке зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2011. - № 3. - С. 106-110.
2. Курдюмов В.И. Обоснование тепловых параметров установки для сушки зерна контактного типа / В.И. Курдюмов, Карпенко Г.В., Павлушин А.А., Карпенко М.А. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научное обеспечение устойчивого функционирования и развития АПК». - 2009. С. 84-87.
3. Пат. 59226 Российская Федерация, МПК F26B17/20. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 19.04.2006;

опубл. 10.12.2006 г. Бюл. № 34.

4. Пат. 2323580 Российская Федерация, МПК A23B9/08. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 28.03.2006; опубл. 10.05.2008 г. Бюл. № 13.

5. Пат. 2428642 Российская Федерация, МПК F26B11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 14.04.2010; опубл. 10.09.2011 г. Бюл. № 25.

6. Пат. 2371650 Российская Федерация, МПК F26B11/14. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.Н. Зозуля; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 18.02.2008; опубл. 27.10.2009 г. Бюл. № 30.

7. Пат.2428642Российская Федерация, МПК F26B 11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 14.04.2010; опубл. 10.09.2011 г. Бюл. № 25.

8. Пат. 96639Российская Федерация, F26B 3/00. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.А. Постников; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл.24.02.2010; опубл. 10.08.2010 г. Бюл. № 22.

9. Пат.119862Российская Федерация, F26B 11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл.11.01.2012; опубл. 27.08.2012 г. Бюл. № 24.

10. Курдюмов В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа // В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин: монография. – Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.

11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.

12. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.

13. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. - М.: Гостехиздат, 1954. – 296 с.