

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЗЕРНОВКЕ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

ЗАГОРУЙКО Михаил Геннадьевич, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
МАРИН Роман Александрович, ООО «МПЦ ОКБ по теплогенераторам и сушилкам»

В статье рассмотрен процесс сушки при постановке внутренней задачи, рассмотрены основные уравнения внутреннего теплопереноса потенциалов. Движение теплоты в пограничном слое обуславливалось молекулярной теплопроводностью. Установлено, что скорость процесса сушки зависит от скорости отвода водяных паров от поверхности зерновки. Установлено, что изменение качества посевного материала не зависело от абсолютного съема влаги. Показан первый период сушки, когда температура поверхности зерновки поднимается от температуры адиабатического насыщения воздуха, когда агент сушки у границы поверхности зерновки насыщается водяными парами, а скорость сушки зависит от скорости их отвода от поверхности испарения. В этот момент влага испарялась, пары отводились агентом сушки. В процессе исследований процесс удаления влаги из семян идет быстро, однако мало влияет на их качество. Удаление влаги зерна достигало до 3 % с верхних слоев семян, что не влияло на их качество. Рассмотрено аналитическое выражение для расчетов коэффициента теплоотдачи и скорости агента сушки с учетом допустимого влагосъема, а также плотности потока теплоты. Определена допустимая скорость агента сушки в плотном слое зерна, которая зависит от высоты слоя, удельной поверхности зерна, его температуры и доли теплоты, поступающей на нагрев материала. Для условий сушки, характерных для зерносушилок, скорость сушки не должна превышать 0,6 м/с.

Введение. Сушка зерна определяется протеканием некоторых физических явлений таких как: перенос теплоты и массы. Происходит перенос теплоты внутри материала (теплоперенос), перемещается внутри материала влага (массоперенос), осуществляется теплообмен между поверхностью материала и окружающей средой путем испарения влаги с поверхности материала (массоотдачи).

Выделим технологические задачи сушки, основываясь на том, что это – массообменный процесс с учетом лимитирующей стадии переноса влаги.

Внутренняя задача, состоящая в сушке материала до минимального влагосодержания. Процессы происходят внутри материала, связаны с высоким внутренним препятствием против крайнего слоя при отрыве влаги с общей массы материала.

Процесс удаления влаги с внешней границы материала будет представлять собой внешнюю задачу. В данной стадии сталкиваемся с высоким сопротивлением в крайних слоях и меньшим во внутренних.

Необходимо учитывать влияние внешних и внутренних факторов. Задача является смешанной так как внутридиффузионного препятствие и препятствие пограничного слоя примерно идентичны. При конвективной сушке испариться влага из концевых капилляров, когда исчезнет сплошная пленка влаги с поверхности материала, соответственно возрастет интенсивность сушки так как поверхность испарения увеличена. Далее при падении влажности ниже гигроскопической сушка замедляется. Процессы, связанные с испарением, переходят внутрь материала, что влечет за собой нагрев материала [3, 6, 10].

Цель исследования – рассмотреть вопрос теплопереноса в зерновке при различных режимах сушки. Изучение кинетики сушки при переменных режимах.

Методика исследований. Число Био Bi' (для массообмена) и B_i теплообмена являются количественными факторами [8]. Они характеризуют процесс сушки и будут определять условия. Bi' ($Bi' > 50-60$) (внутренняя задача).

В условиях внутренней задачи перемещение влаги будет определяться твердотельной диффузией (порядка).

При уменьшении числа Bi' ($Bi' < 0,1 - 0,2$) задача сводится к внешней, гидродинамическая обстановка в сушилке разгоняет процесс сушки

Решение внешней задачи $Bi' > 50$ сводится к созданию условий испарения влаги в зерне.

Условие $0,2 < Bi' < 50$ определяет смешанную задачу (интенсивное удаление влаги). Вначале процессы идут в рамках внешней задачи, далее при углублении линии испарения или удалении адсорбционно-связанной влаги из микропор, сушильный процесс происходит исходя из внутренней задачи. При таком условии организуют отлежку, далее досушивают материал до требуемого влагосодержания. Роль внутреннего теплового сопротивления возрастает с увеличением теплообменного Био Bi' и массообменного B_i чисел, а при теплообменном числе B_i стремящемся к нулю, усилится гидродинамические факторы (скорость агента сушки) на теплообмен с поверхностью тела. Поток теплоты уменьшается с углублением линии испарения, а число B_i растет. Скорость сушки замедляется у крупнозернистых материалов с увеличением теплового сопротивления в поверхностном слое.

Результаты исследований. Основываясь на материальном и тепловом балансах с учетом известных свойств материалов в условиях балансовой и внешней задач, можно сказать, что фактическое время сушки и время сушки определяемое кинетической процесса будут идентичными. Задача будет являться балансовой, при условии, что фактическое время сушки материала достаточно для требуемого конечного влагосодержания.

Составим материальный баланс для всех материальных потоков:

G_M – сухой поток, проходящий через сушку, кг/с; W – испаряемая влага, %; G_T – сушильный агент, кг/с.

Для герметичной сушилки справедливы равенства:



$$G_M U_H = G_M U_K + W; \quad (1)$$

$$G_e X_K = G_e X_H + W. \quad (2)$$

где X_H, X_K – начальное и конечное влагосодержание сушильного агента соответственно, %; U_H, U_K , – начальное и конечное влагосодержание материала, соответственно, %.

Приравнивая (1) и (2), получим выражение материального баланса:

$$G_m = (U_H - U_K) = G_e (X_K - X_H). \quad (3)$$

При расчетах сушилок обычно пренебрегают теплотой, затраченной на прогрев материала, принимая $\Theta_H \approx \Theta_K$.

Рассмотрим внешнюю задачу. Испарение определяется переносом влаги и диффузионно-конвективным переносом теплоты и влаги через крайние слои материала. Молекулярная теплопроводность определяет движение тепла в крайних слоях.

Плотность потока теплоты описывается законом Фурье:

$$j_T = -\vec{\lambda}_T \nabla T, \quad (4)$$

где $\vec{\lambda}_T$ – теплопроводность молекулярная, Вт/м·К; ∇T – градиент температуры среды, К/м.

Парогазовая смесь перемешивается благодаря турбулентному потоку, проходящему через влажный материал. На основании этого выражение молекулярного смешивания покажем в виде закона Фурье [5]:

$$\vec{j}_T = -\vec{\lambda}_T \nabla T - \vec{\lambda}_T^* \nabla T = -(\vec{\lambda}_T + \vec{\lambda}_T^*) \nabla T, \quad (5)$$

где $\vec{\lambda}_T^*$ – коэффициент турбулентной теплопроводности Вт/м·К.

Рассмотрим объемы влияния тепло- и влагопроводности при постановке внутренней задачи.

Внутренняя задача рассматривает основные уравнения внутреннего теплопереноса потенциала Π . В общих условиях плотность потока переноса \vec{Q} будет иметь конвективную составляющую $\Pi \vec{U}$ и составляющую \vec{j}_T , исходя из стремления уравновешиванию системы, при котором для различных точек системы потенциал Π одинаков:

$$\vec{Q} = \vec{\Pi}_v + j + \delta \Delta \Theta, \quad (6)$$

где $\Delta \Theta$ – градиент температуры, °С/м; δ – термоградиентный коэффициент.

Согласно третьему закону Ньютона, импульс от стенок пор передается в противоположном направлении движения молекул горячего воздуха из-за кинетической энергии, с учетом направления в сторону температурного градиента тангенциальной составляющей. Весь этот процесс является термодиффузией газа – тепловым скольжением молекул воздуха против движения молекул парогазовой смеси из глубинных слоев.

Результаты некоторых работ показывают преимущество осциллирующего режима сушки, когда материал попеременно нагревают и охлаждают [8]. Увеличить интенсивность процесса, улучшить качество продукта может применение нестационарных режимов сушки.

Моделированием движения теплоты и влаги внутри материала и от его поверхностного слоя можно решить задачу тепло- и массопереноса при осциллирующем режиме сушки. При решении данной задачи с целью упрощения условия вводят непостоянные коэффициенты тепло- и массообмена.

Уравнение диффузии, отражающееразличные виды процессов испарения, имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \lambda_c \nabla^2 C, \quad (7)$$

где C – влага, сконцентрированная внутри тела %; λ_c – коэффициент диффузии (экспериментальный) [3] м²/с; ∇ – оператор градиента, К/м.

Рассмотрим граничное условие третьего рода для решения (7):

$$\lambda_c = \nabla C|_{\text{гп}} = \beta(C_\pi - C_\infty), \quad (8)$$

где $\nabla C|_{\text{гп}}$ – градиент концентрации влаги на поверхности материала, К/м; C_π – влага у поверхности, %; C – влага потока, обтекающего поверхность, %.

В уравнении (8) отражается равенство плотности потоков влаги в центре и у поверхности зерна. Зависимость коэффициентов в уравнениях движения и конвективной теплопроводности от температуры, влагосодержания и других неизвестных величин указывает на нелинейный вид задачи.

При решении данной задачи необходимо учесть межфазовый теплообмен, кинетику фазового превращения, капиллярные явления, а также явление перехода химически связанной жидкости в свободное состояние, что значительно усложняет ее. Существует полуфеноменологическое описание этого процесса. Четкая, строгая теория данного процесса сушки отсутствует, имеются упрощенные модели сушки данного типа, предложенные в работах [1, 3, 4, 6]. Однако такое описание процесса содержит много неизвестных величин, что затрудняет практическое использование предлагаемых моделей сушки в связи с тем, что они имеют громоздкий вид. Но, тем не менее, в ряде случаев многие факторы будут несущественны, что позволит получать результаты, приемлемые для практических целей. Предположим, как и в процессе движения границ фазового раздела, что испарение влаги происходит в небольшой зоне, уходящей по мере сушки внутрь материала с ее разделением на области пара и жидкости. Размер пор, капиллярные силы, отвечающие за перераспределение жидкости, теплота, затрачиваемая на нагрев тела и на испарение, определяет размер зоны испарения.

Размер зоны испарения может оказаться меньше размера высушиваемого тела, поэтому



его можно обозначить зоной испарения незначительной толщины.

Продвижению испарения способствует дисперсия распределения пор по их величине, а также увеличения их среднего размера.

Распределение температур t в сухой области зерновки $\xi(\tau) \leq r \leq R$ описывает уравнение нестационарной теплопроводности [5]:

$$a \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} \right) = \frac{dt}{d\tau}, \quad (9)$$

где a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; r – скрытая теплота испарения влаги, $\text{кДж}/\text{кг}$; с граничными условиями

$$\lambda \frac{dt}{dr} \Big|_{r=R} = \alpha [t_{\text{сп}}(\tau) - t(R, \tau)]; \quad (10)$$

$$t(r) \Big|_{r=\xi} = t f. \quad (11)$$

Здесь f – удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$.

В границах линии испарения выражение баланса теплоты и влаги имеют следующий вид:

$$4 \pi \xi^2 \lambda \frac{dt}{dr} = 4 \pi \xi^2 L U_0 \rho \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (12)$$

где λ – эффективный коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; ξ – некоторая обобщенная криволинейная координата (зависит от формы тела); L – толщина слоя, м ; U_0 – начальное количество тепла, $\text{кДж}/\text{кг}$; ρ – термическое сопротивление, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Данный коэффициент вводят для учета эффекта термодиффузии, а также теплопереноса парами воды и конвективных токов в порах.

Интенсивность сушки будет определяться исходом водяного пара с крайних слоев материала, линия испарения движется внутрь.

Посевные свойства семенного материала за-

висят от отношения $\frac{\Delta W}{W_H}$, здесь ΔW – сьем влаги, %; W_H – начальная влажность зерна, %. Поэтому, определяя предельно допустимое снижение влажности зерна как функцию времени, ее следует выразить не через среднюю скорость сушки, а через некоторую величину влагосъема [7].

Величина ΔW для пшеницы (по данным Н.А. Иванниковой) может быть определена при ($W \geq 23...24\%$) эмпирической формулой:

$$\Delta W = 0,185 \tau + 3,0, \quad (13)$$

где τ – время сушки, мин.

Таким образом, для зерна пшеницы с достаточной для практики точностью можно считать, что предельно-допустимый влагосъем при влажности менее гигроскопической зависит от начальной влажности зерна.

В результате работ, проведенных по опреде-

лению допустимых влагосъемов для гороха и кукурузы, найдено:

$$\Delta W = 0,1 \tau + 2,0. \quad (14)$$

Для безопасной скорости влагосъема зерна необходимо строгое соблюдение температурного режима. Определим оптимальный влагосъем спроектировав модель теплопереноса в материале.

Физическая модель. Начало сушки происходит при температуре поверхности материала поднимается выше температуры адиабатического насыщения. В этот период влага испаряется, пары отводятся агентом сушки.

Для пшеницы можно записать:

$$\frac{dW}{d\tau} \leq 0,185. \quad (15)$$

Математическая модель. На основании того, что интенсивность сушки соизмерима с плотностью потока, подводимого к поверхности материала, можно записать температурный градиент [8]:

$$-\frac{dW}{d\tau} \frac{G_c}{S} = \frac{\alpha (t - \theta_p) S \eta}{G \rho r}, \quad (16)$$

где $d\tau$ – время, ч; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{°C}$; S – площадь поверхности зерна, м^2 ; G – масса сухого вещества зерна, кг ; η – доля теплоты, пошедшая на испарение влаги; dW – влажность зерна, %; t , $\theta_{\text{сп}}$ – температура агента сушки и средняя температура соответственно, °C ; ρ – удельный вес сухого вещества зерна, $\text{кг}/\text{м}^3$; r – теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Предположим обрабатываемый материал имеет сферическую форму, заменим комплекс S/G на удельную поверхность f , $\text{м}^2/\text{кг}$, тогда:

$$\Delta U_0 = \frac{3 \alpha f (t - \theta_{\text{сп}}) \tau \eta}{r}, \quad (17)$$

где $\eta = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{ис}} + Q_{\text{н}}}$ ($Q_{\text{ис}}$ – теплота затраченная на испарение влаги, Вт ; $Q_{\text{н}}$ – теплота на нагрев, Вт).

Учитывая высоту столба H материала, получим:

$$\Delta U = \frac{3 \alpha f (t - \theta_{\text{сп}}) \tau \eta H}{r h_0}, \quad (18)$$

где h_0 – высота крайнего слоя, м ($h_0 = 2...3 d_s$, где d_s – эквивалентный диаметр зерновки, м).

Приравняем (17) и (18) и преобразуем относительно α , получим:

$$\alpha = \frac{0,13 r H}{3 f (t - \theta_{\text{сп}}) \eta h_0}. \quad (19)$$

При осцилляции температура зерна $\theta_{\text{сп}}$ практически максимальна $\theta_{\text{нд}} = \text{const}$, соответственно α' для изменяющейся теплоподдачи:



$$\alpha' = \frac{0,13 r H}{3 f (t - \theta_{\text{пд}}) \eta h_0}. \quad (20)$$

При превышении пикового значения α может быть повреждение зерна. Имея значения α и α' можно определить скорость агента сушки V для постоянной и переменной теплоподдачи.

Число Нуссельта находим из выражения ($Nu = \frac{\alpha d_s}{\lambda}$), $Nu = 0,075 Re$, где Re – число

Рейнольдса, $Re = \frac{V_d d_s}{\nu}$ (V_d – допустимая скорость агента сушки, м/с).

Заключение. Таким образом на основе выше сказанного можно заключить, что системная задача – случай, требующий комплексного решения тепло-и массопереноса. При таком решении необходимо задачу максимально упростить либо свести к решению узкой задачи – внутренней или внешней, после чего можно приступать к математическому описанию процесса сушки.

Кинетика сушки в различных условиях определит необходимое время нагрева и охлаждения, для достижения нужного влагосодержания материала, ее кривую можно получить экспериментальным путем либо описать приближенными методами. Для неустойчивых к тепловому воздействию материалов период сушки определится кинетикой прогрева материала. Для чего необходимо использовать выражение теплопроводности при условии постоянного значения коэффициента температуропроводности и стандартной форме тела.

Приведены выражения для нахождения коэффициента теплоотдачи, скорости агента сушки с учетом пикового значения влагосыема, плотности потока теплоты.

Толщина слоя обрабатываемого материала, температура, доля теплоты, поступающей на нагрев материала, влияет на пиковую скорость агента сушки.

В характерных зерносушилках оптимальное значение скорости сушки 0,6 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анатазович В.И.* Сушка пищевых продуктов: справочное пособие. – М.: ДеЛи, 2000. – С. 15–17.
2. *Загоруйко М.Г., Павлов С.А.* Исследование кинетики досушки зерна на складе // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 12. – С. 87–89.
3. *Загоруйко М.Г., Павлов С.А.* Вентиляция насыпи нагретого зерна кукурузы // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 9. – С. 74–77.
4. Лабораторное исследование возможности проникновения бензпирена в зерно пшеницы при использовании разных способов сушки продуктами стораения / П.П. Дикун[и др.] // Вопросы питания. – 1976. – № 2. – С. 54–58.
5. *Лыков А.В.* Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.
6. Поточная технология сушки зерна кукурузы / В.Н. Пермяков [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2010. – № 1. – С. 16–17.
7. *Птицын С.Д.* Зерносушилки. – М.: Машгиз, 1962. – 180 с.
8. *Сажин Б.С.* Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
9. *Семейкин В.А., Дорохов А.С.* Экономическая эффективность входного контроля качества сельскохозяйственной техники // Вестник ФГБОУ «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2009. – № 7 (38). – С. 15–17.
10. *Sadjad Abasi, Saeid Minaei.* Effect of Drying Temperature on Mechanical Properties of Dried Corn Journal: Drying Technology. Vol. 32, Iss. 7, May 2014, p. 774–780.

Загоруйко Михаил Геннадьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Россия.

109428, г. Москва, 1-й институтский пр-д, 5.

Тел.: (499) 171-43-49.

Марин Роман Александрович, ООО «МПЦ ОКБ по теплогенераторам и сушилкам». Россия.

241047, г. Брянск, ул. 2-я Мичурина, 2 А.

Тел.: (4832) 26-10-90.

Ключевые слова: пшеница; сушка; режим; испарение; температура; теплоперенос; коэффициент диффузии.

HEAT AND MASS TRANSFER IN THE GRAIN UNDER VARIABLE CONDITIONS

Zagoruiko Mikhail Gennadievich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Federal State Scientific Agroengineering Center VIM. Russia.

Marin Roman Aleksandrovich, LLC "MPC OKB for Heat Generators and Dryers". Russia.

Keywords: wheat; drying; mode; evaporation; temperature; heat transfer; diffusion coefficient.

The article describes the drying process in the formulation of the internal problem, the main equations of internal heat and mass transfer of potentials are considered. The process of removing moisture from the surface of the grain, which is determined by the transfer of moisture and the diffusion-convective transfer of heat and moisture through the boundary layer, is studied. The movement of heat in the boundary layer was determined by the molecular thermal conductivity. It is established that the speed of the drying process depends on the rate of removal of water vapor from the surface of the grain. It was found that the change in the quality of the seed material did not depend on the absolute removal of moisture. The first drying period is shown, when the

temperature of the grain surface rises from the temperature of the adiabatic air saturation, when the drying agent at the boundary of the grain surface is saturated with water vapor, and the drying speed depends on the speed of their removal from the evaporation surface. At this point, the moisture evaporated, the vapors were removed by the drying agent. At the initial moment, the movement of the evaporation line did not occur, but then it was fixed inside the grain. In the course of research, the process of removing moisture from the seeds is fast, but it has little effect on their quality. The removal of grain moisture reached up to 3 % from the upper layers of the seeds, which did not affect their quality. An analytical expression is considered for calculating the heat transfer coefficient and the drying agent velocity, taking into account the allowed moisture content, as well as the heat flux density. The permissible speed of the drying agent in a dense layer of grain is determined, which depends on the height of the layer, the specific surface of the grain, its temperature and the proportion of heat supplied to heat the material. For drying conditions typical for grain dryers, the drying speed should not exceed 0.6 m/s.

