

УДК 631.354

**В.П. Чеботарев**

*(РУП «Научно-практический центр  
Национальной академии наук Беларуси  
по механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь)*

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ НЕПОДВИЖНОГО ТОЛСТОГО СЛОЯ ЗЕРНА**

### **Введение**

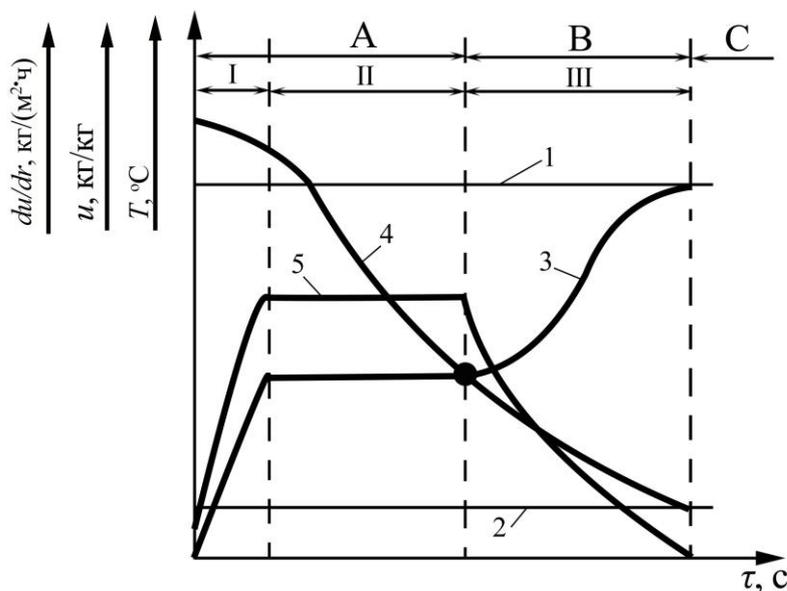
Основным способом обеспечения длительной сохранности зерна является его своевременная сушка до требуемой кондиции [1-3]. Технико-экономическая эффективность процесса сушки может быть обеспечена подбором оптимальных режимов: параметров сушильного агента – температурой, скоростью движения, влагосодержанием, а также продолжительностью времени сушки [4-7].

### **Основная часть**

Существенным условием, определяющим ход процесса сушки, является величина слоя высушиваемого зерна. Если брать соотношение высоты слоя  $H$  к эквивалентному диаметру зерновки  $D$ , то оно может достигать значения 500...600. Известно, что скорость прохождения агента сушки через слой зерна ограничена аэродинамическими условиями и экономической целесообразностью, а, с другой стороны, сам процесс сушки протекает интенсивно. Равновесное влагосодержание агента сушки может наступить на высоте слоя, равной  $H = (15...20)D$ . В результате процесс сушки вышележащих слоев зерна полностью прекратится. В дальнейшем зерновой слой будет высушиваться позонно, причем зона равновесного влагосодержания агента сушки будет перемещаться в направлении его движения к поверхности слоя. Время движения этой зоны зависит от режима сушки, влажности материала и высоты слоя. Поэтому расчет процесса сушки зерна в слое необходимо разделить на два: для элементарного слоя и толстого слоя.

Расчет необходимого времени сушки, обеспечивающего получение материала заданной конечной влажности, а также интенсивности процессов теплообмена, позволяют кинетические закономерности процесса сушки – зависимости изменения среднего влагосодержания и средней температуры материала по времени [3-4]. В теории сушки эти изменения на практике принято исследовать графическим способом в виде совмещенных графиков кривых сушки, скорости сушки, а также температуры материала и агента сушки (рисунок 69). Средняя влажность зерна, его температура и скорость сушки представлены в зависимости от времени протекания процесса. Под скоростью сушки понимается количество влаги, удаляемой в единицу времени с единицы поверхности испаряемого материала. По характеру взаимодействия влаги зерна и агента сушки процесс может разделяться на следующие три стадии: влажного, гигроскопического и равновесного состояний. При стадии влажно-

го состояния процесс сушки зерна идет, в основном, путем испарения влаги с поверхности зерновки. В стадии гигроскопического состояния испарение влаги начинается во внутренних слоях зерновок. При этом могут наблюдаться факты обратного процесса конденсирования и впитывания влаги зерновой массой от агента сушки. Стадия равновесного состояния характеризуется отсутствием изменений количества влаги как в агенте сушки, так и в зерне. Начало этой стадии означает завершение процесса сушки. Таким образом, непосредственно сам процесс сушки происходит в первой и второй стадиях.



А, В, С – стадии соответственно влажного, гигроскопического и равновесного состояния зерна; I, II, III – периоды возрастающей, постоянной и падающей скорости сушки; 1, 2 – температура и влагосодержание агента сушки; 3, 4 – температура и влагосодержание зерна; 5 – скорость сушки

**Рисунок 69 – Стадии и периоды процесса сушки зерна**

Первую стадию можно условно разделить на два периода по величине скорости: сушки возрастающей и постоянной. Первый период характеризуется повышением температуры зерна и относительно небольшим изменением его влажности. В этом периоде происходит прогрев материала, а скорость сушки быстро возрастает до определенного постоянного значения. В этот момент устанавливается постоянная величина

температуры поверхности зерновок. Во втором периоде сушки, при постоянной скорости сушки, устанавливается тепловое равновесие между количеством теплоты, подведенной к поверхности зерновок и расходуемой на превращение воды в пар. При этом поверхность зерновок остается влажной, а влага поступает из внутренних слоев по капиллярам. Вторая стадия процесса сушки полностью соответствует периоду падающей скорости сушки. Этот период характеризуется постоянным повышением температуры зерна и непрерывным падением скорости сушки. При достижении зерном равновесной влажности с агентом сушки ее скорость становится равной нулю, а сам процесс сушки практически прекращается.

Математически описать протекание вышеизложенного процесса можно с помощью приближенных уравнений кинетики сушки, наиболее точно отображающих действительную кривую сушки. Определяющим фактором при

описании изменения скорости сушки является текущая разность влагосодержания от начального  $u_o$  до конечного  $u_k$  равновесных значений, отнесенная к текущему количеству удаленной влаги ( $u_o - u$ ) за период времени  $d\tau$ . Это изменение скорости сушки может быть выражено следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{du}{d\tau} = -K_u \frac{u_o - u_k}{u_o - u}, \quad (1)$$

где  $K_u$  – коэффициент скорости сушки,  $кг/с$ ;

$u$  – текущее влагосодержание зерна,  $кг/кг$ .

После разделения переменных выражение (1) примет вид:

$$\frac{(u_o - u)du}{u_o - u_k} = -K_u d\tau. \quad (2)$$

После интегрирования выражения (2) получено следующее уравнение:

$$\frac{2u_o u - u^2}{2(u_o - u_k)} = -K_u \tau + C. \quad (3)$$

Для определения постоянной интегрирования принимается  $u = u_o$ ,  $\tau = 0$ . И тогда:

$$C = \frac{u_o^2}{2(u_o - u_k)}.$$

Подстановка полученного значения постоянной интегрирования в выражение (3) позволила определить зависимость времени сушки от начального и конечного влагосодержания зерна и параметров процесса сушки:

$$\tau = \frac{(u - u_o)^2}{2K_u(u_o - u_k)}.$$

Текущее влагосодержание на момент времени сушки  $\tau$  будет равно:

$$u = u_n - \sqrt{2K_u(u_n - u_k)\tau}.$$

В то же время величина удаленной за время  $\tau$  влаги будет равна:

$$u_\tau = \sqrt{2K_u(u_n - u_k)\tau},$$

а коэффициент скорости сушки соответственно:

$$K_u = \frac{(u - u_o)^2}{2(u_o - u_k)\tau}.$$

С другой стороны, для более полного рассмотрения процесса сушки необходимо одновременно рассматривать изменение состояния агента сушки в процессе изменения высушиваемого материала [8-9]. Через бесконечно малый слой зерна  $dV$  проходит агент сушки, имеющий влагосодержание  $d_1$ , с массовой скоростью  $M_c$  через бесконечно малое поперечное сечение слоя  $dF$ . Так как агент сушки, пройдя бесконечно малый слой зерна за время  $\tau$ , дополнительно насыщается влагой до  $d_2$ , то скорость сушки будет равна:

$$du = M_c \cdot dd \cdot dF = a_d dS_{\phi} (d_n - d), \quad (4)$$

где  $a_d$  – коэффициент массопередачи в газовой фазе,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг})$ ;

$dS_{\phi}$  – поверхность контакта поперечного сечения слоя зерновок с агентом сушки,  $\text{м}^2/\text{м}^2$ ;

$d_n$  – влагосодержание агента сушки при температуре адиабатного насыщения.

Если обозначить через  $a_{\phi\kappa}$  удельную поверхность фазового контакта на единицу объема слоя зерна, то:

$$dS_{\phi} = a_{\phi\kappa} \cdot dF \cdot dH.$$

Тогда уравнение (4) может быть представлено в следующем виде:

$$M_c \cdot dd \cdot dF = a_d \cdot a_{\phi\kappa} \cdot dF \cdot dH (d_n - d). \quad (5)$$

После сокращения на  $dF$  и разделения переменных выражение (5) примет вид:

$$\frac{dd}{d_n - d} = \frac{a_d \cdot a_{\phi\kappa} \cdot dH}{M_c}. \quad (6)$$

Интегрирование уравнения (6)

$$\int_{d_1}^{d_2} \frac{dd}{d_n - d} = \int_0^H \frac{a_d \cdot a_{\phi\kappa} \cdot dH}{M_c}$$

позволяет получить зависимость изменения влагосодержания и массовой скорости подачи агента сушки от высоты слоя зерна:

$$\ln \frac{d_n - d_1}{d_n - d_2} = \frac{a_d \cdot a_{\phi\kappa} \cdot H}{M_c}.$$

Таким образом, высота слоя зерна, высушиваемая агентом сушки при увеличении его влагосодержания с  $d_1$  до  $d_2$ , будет равна:

$$H = \frac{M_c}{a_d \cdot a_{\phi\kappa}} \ln \frac{d_n - d_1}{d_n - d_2}.$$

С другой стороны, максимально возможная высота высушиваемого слоя зерна может быть определена исходя из пропорции:

$$\frac{H}{H_{max}} = \frac{d_2 - d_1}{d_n - d_1}$$

и будет равна:

$$H_{max} = H \frac{d_n - d_1}{d_2 - d_1}.$$

Исходя из известной общей высоты слоя высушиваемого зерна  $H_{cl}$  может быть определено количество зон сушки:

- минимально возможное при заданном исходном влагосодержании агента сушки  $d_1$ :

$$n_{3c}^{min} = \frac{H_{сл}}{H_{max}} = \frac{H_{сл}}{H \frac{d_n - d_1}{d_2 - d_1}} = \frac{H_c (d_2 - d_1)}{H (d_n - d_1)},$$

• соответствующее влагосодержанию агента сушки, покидающего высушиваемый слой зерна:

$$n_{3c} = \frac{H_{сл}}{H} = \frac{H_{сл}}{\frac{M_c}{a_d \cdot a_{фк}} \ln \frac{d_n - d_1}{d_n - d_2}} = \frac{H_{сл} \cdot a_d \cdot a_{фк}}{M_c \ln \left( \frac{d_n - d_1}{d_n - d_2} \right)}.$$

При сушке зерна удаление влаги происходит в два этапа. В начале протекает процесс внешней диффузии – влага с поверхности материала испаряется в окружающую среду. Затем начинается процесс внутренней диффузии – влага в виде жидкости или пара перемещается внутри зерновок по капиллярам к поверхности. При этом расход теплоты на совершение массообменных процессов сушки зерна может быть представлен в виде уравнения баланса переноса тепла и массы. С одной стороны, агент сушки при перемещении через элементарный объем зерна теряет часть теплоты, равной:

$$q_{ac} = \alpha M_c C_{ac} (t_{ac} - t_3), \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена,  $Bm/(m^2K)$ .

С другой стороны, тепло, полученное зерном, расходуется на испарение влаги, нагрев зерна теплопроводностью, а также на создание движущейся в нем массы влаги за счет градиентов влагосодержания, температуры и давления. В общем виде этот расход тепла может быть представлен следующим образом:

$$q_3 = r \rho_3 R_3 \frac{du}{dt} + \lambda \Delta t + h_u a_m \rho_3 \Delta u + h_t a_m \rho_3 \delta \Delta t + h_p a_m \rho_3 \delta_p \Delta p, \quad (8)$$

где  $r$  – удельная теплоемкость испарения воды,  $кДж/кг$ ;

$\rho_3$  – плотность абсолютно сухой части зерновки,  $кг/м^3$ ;

$R_3$  – отношение объема сухого зерна к его поверхности,  $м^3/м^2$ ;

$\lambda$  – теплопроводность влажного зерна,  $Bm/(m \cdot K)$ ;

$\Delta t$  – градиент температуры;

$h_u$  – энтальпия потока массы, перемещающегося за счет градиента влагосодержания,  $Дж/кг$ ;

$a_m$  – коэффициент теплопроводности;

$\Delta u$  – градиент влагосодержания;

$h_t$  – энтальпия потока массы, перемещающегося за счет градиента температуры,  $Дж/кг$ ;

$\delta$  – коэффициент, учитывающий изменение коэффициента теплопроводности в зависимости от соотношения градиентов влагосодержания и температуры;

$\Delta p$  – градиент давления;

$h_p$  – энтальпия потока массы, перемещающегося за счет градиента давления, Дж/кг;

$\delta_p$  – коэффициент, учитывающий изменение коэффициента потенциалопродности в зависимости от соотношения градиентов влагосодержания и давлений.

Так как при сушке температура зерна обычно не превышает 60°C, то в дальнейших расчетах расход теплоты на нагрев зерна вследствие движущейся в нем массы влаги за счет градиента давления можно не учитывать. Приравнение правых частей уравнений (7) и (8) позволит получить уравнение баланса тепломассопереноса:

$$\alpha M_c C_{ac} (t_{ac} - t_3) = r \rho_3 R_3 \frac{du}{dt} + \lambda \Delta t + h_u a_m \rho_3 \Delta u + h_t a_m \rho_3 \delta \Delta t. \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет определить величину тепла, полученного от агента сушки и направленного непосредственно на испарение влаги, нагрев зерна и передвижение тепловых потоков за счет создающихся градиентов влагосодержания и температуры.

### Выводы

Продолжительность времени сушки зерна определяется, в первую очередь, интенсивностью процесса удаления влаги, требуемым влагосъемом и свойствами зерна. Высота слоя зерна, высушиваемая агентом сушки, зависит от коэффициента массопередачи в газовой среде, величины удельной поверхности фазового контакта слоя зерна, массы прошедшего агента сушки и изменения его влагосодержания. Тепло, переданное агентом сушки зерну, расходуется на испарение влаги и нагрев зерна, создает градиенты влагосодержания и температуры как в слое, так и в отдельных зернах.

### Библиография

1. Карпов, Б.А. Технология послеуборочной обработки и хранения зерна [Текст] / Б.А. Карпов. – М, Агропромиздат, 1987. – 288 с.
2. Гержой, А.П. Зерносушение и зерносушилки [Текст] / А.П. Гержой, В.Ф. Самочетов. – М: Колос, 1982. – 255 с.
3. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки [Текст] / В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов. – М, Колос, 1982. – 239 с.
4. Птицын, С.Д. Зерносушилки [Текст] / С.Д. Птицын. – М, Машиностроение, 1966. – 211 с.
5. Мальтри, В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения. [Текст] / В. Мальтри, Э. Петке, Б. Шнайдер. – М, Машиностроение, 1979. – 526 с.
6. Атаназевич, В.И. Сушка зерна [Текст] / В.И. Атаназевич. – М, Лабиринт, 1997. – 256 с.
7. Резчиков, В.А. Технология зерносушения [Текст] / В.А. Резчиков, О.Н. Налеев, С.В. Савченко. – Алма-Ата: Изд-во Алма-атинского технологического университета, 2000. – 363 с.
8. Малинин, Н.И. Энергосберегающая сушка зерна [Текст] / Н.И. Малинин. – М, Колос, 2004. – 239 с.
9. Olesen T. Grain drying. Thisted: IDEAS, 1987 – 262 p.