

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ ЗЕРНА

В.П. Чеботарев,

зав. каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

В статье изложен расчет параметров процесса сушки неподвижного толстого слоя зерна.

Ключевые слова: агент сушки, равновесное влагосодержание, скорость сушки, диффузия влаги, зона сушки.

The article describes the calculation of the parameters of the drying process of a fixed thick layer of grain.

Keywords: drying agent, equilibrium moisture content, drying speed, moisture diffusion, drying zone.

Введение

Основным способом обеспечения длительной сохранности зерна является его своевременная сушка до требуемых кондиций [1-3]. Технично-экономическая эффективность процесса сушки может быть обеспечена подбором оптимальных режимов – параметров сушильного агента: температуры, скорости движения, влагосодержания, а также продолжительности сушки [4-7]. В то же время существенным условием, определяющим ход процесса сушки, является величина слоя высушиваемого зерна.

Основная часть

При проведении сушки неподвижного слоя зерна соотношение высоты слоя H к эквивалентному диаметру зерновки D может достигать значения 500...600. В то же время известно, что скорость прохождения агента сушки через слой зерна ограничена аэродинамическими условиями и экономической целесообразностью. С другой стороны, это позволяет регулировать интенсивность протекания процесса сушки. В результате равновесное влагосодержание агента сушки может наступить на высоте слоя, равной $H=(15...20) D$. Вследствие этого процесс сушки вышележащих слоев зерна полностью прекратится. В дальнейшем зерновой слой будет высушиваться по зонам, 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.

Как известно, расчет необходимого времени сушки, обеспечивающего получение материала заданной конечной влажности, может производиться по кинетическим зависимостям процесса сушки. Эти зависимости устанавливают закономерности изменения среднего влагосодержания и средней температу-

ры материала от времени сушки [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 (рис. 1). При этом 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 влажного состояния процесс сушки зерна идет в основном путем испарения влаги с поверхности зерновки. В стадии гигроскопического состояния испарение влаги начинается во внутренних слоях зерновки. При этом может наблюдаться и обратный процесс – 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.

При этом 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 также устанавливается постоянная величина температуры поверхности зерновки. Во втором периоде сушки, при постоянной скорости сушки, устанавливается тепловое равновесие между количеством теплоты, подведенной к поверхности зерновки и расходуемой на превращение воды в пар. При этом поверхность зерновки остается влажной,

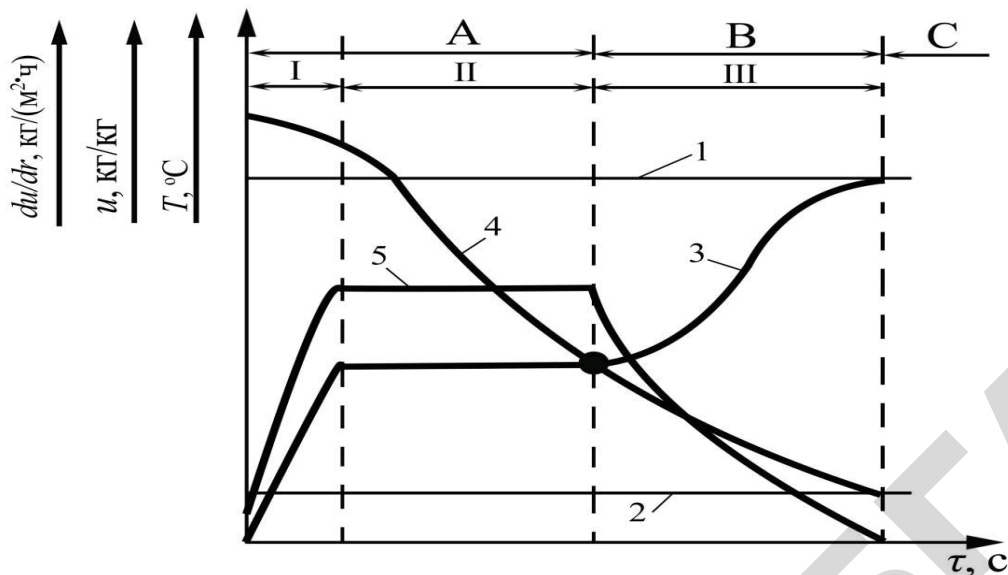


Рис. 1. Стадии и периоды процесса сушки зерна: А, В и С – стадии, соответственно, влажного, гигроскопического и равновесного состояния зерна; I, II, и III – периоды возрастающей, постоянной и падающей скорости сушки; 1 и 2 – температура и влагосодержание агента сушки; 3 и 4 – температура и влагосодержание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

а влага поступает из внутренних слоев по капиллярам. Вторая стадия процесса сушки полностью соответствует периоду падающей скорости сушки.

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

$$C = \frac{u_o^2}{2(u_o - u_k)}. \quad (4)$$

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

$$\tau = \frac{(u - u_o)^2}{2K_u (u_o - u_k)}. \quad (5)$$

Текущее влагосодержание на момент времени сушки τ будет равно:

$$u = u_n - \sqrt{2K_u (u_n - u_k) \tau}. \quad (6)$$

В то же время величина удаленной за время τ влаги будет равна:

$$u_\tau = \sqrt{2K_u (u_n - u_k) \tau}, \quad (7)$$

а коэффициент скорости сушки соответственно:

$$K_u = \frac{(u - u_o)^2}{2(u_o - u_k) \tau}. \quad (8)$$

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

$$du = M_c \cdot dd \cdot dF = a_d dS_{\phi} (d_n - d), \quad (9)$$

где a_d – коэффициент массопередачи в газовой фазе, кг/(м²·с·кг);

dS_{ϕ} – поверхность контакта поперечного сечения слоя зерновок с агентом сушки, м²/м²;

d_n – влагосодержание агента сушки при температуре адиабатного насыщения, кг/кг.

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 (9) может быть представлено в следующем виде:

$$M_c \cdot dd \cdot dF = a_d \cdot a_{\phi\kappa} \cdot dF \cdot dH (d_n - d). \quad (10)$$

После сокращения на dF и разделения переменных, выражение (10) примет вид:

$$\frac{dd}{d_n - d} = \frac{a_d \cdot a_{\phi\kappa} \cdot dH}{M_c}. \quad (11)$$

Интегрирование уравнения (11)

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

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:

$$H = \frac{M_c}{a_d \cdot a_{\phi\kappa}} \ln \frac{d_n - d_1}{d_n - d_2}. \quad (12)$$

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

$$\frac{H}{H_{max}} = \frac{d_2 - d_1}{d_n - d_1}, \quad (13)$$

и будет равна:

$$H_{max} = H \frac{d_n - d_1}{d_2 - d_1}. \quad (14)$$

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

– минимально возможное, при заданном исходном влагосодержании агента сушки d_1

$$n_{3c}^{min} = \frac{H_{сл}}{H_{max}} = \frac{H_{сл}}{H} \frac{d_n - d_1}{d_2 - d_1} = \frac{H_c (d_2 - d_1)}{H (d_n - d_1)}; \quad (15)$$

– соответствующее влагосодержанию агента сушки, покидающего высушиваемый слой зерна:

$$n_{3c} = \frac{H_{сл}}{H} = \frac{H_{сл}}{\frac{M_c}{a_d \cdot a_{\phi\kappa}} \ln \frac{d_n - d_1}{d_n - d_2}} = \frac{H_{сл} \cdot a_d \cdot a_{\phi\kappa}}{M_c \ln \left(\frac{d_n - d_1}{d_n - d_2} \right)}. \quad (16)$$

Таким образом, достигаемая высота зоны сушки неподвижного слоя зерна определяется массовой скоростью подачи агента сушки, его влагосодержанием, коэффициентом массопередачи в газовой среде и величиной поверхности фазового контакта слоя зерна и агента сушки.

Заключение

На основании проведенных теоретических расчетов установлены зависимости, позволяющие определить для заданных условий сушки высоту образующейся зоны сушки и количество зон в толстом неподвижном слое зерна. Исходя из начальных размеров неподвижного слоя зерна и образующейся зоны сушки, могут определяться время и основные параметры состояния высушиваемого зерна и агента сушки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 04.10.2017