

УДК 532.546

Анализ закономерностей процессов сушки зерна и модель описания межзернового контактного теплообмена

Акельев В. Д., Байлук Н. Д., Занкевич В. А.

Белорусский национальный технический университет

В большинстве случаев сушка зерна производится конвективным методом с помощью сушильного агента (нагретого газа, воздуха). Совокупность параметров внешнего воздействия на зерно в процессе сушки характеризует режим сушки. Режим сушки зависит от многих параметров, но основными являются: температура сушильного агента ($t_{c.a.}$, °C), его влажность ($\varphi_{c.a.}$, %), скорость его потока через зерновой слой ($v_{c.a.}$, м/с).

Эти параметры влияют не только на длительность сушки, но и на качество высушенного зерна. Поэтому необходимо найти оптимальный режим сушки, чтобы при минимальной длительности процесса и наименьшем расходе теплоты получались наилучшие технологические свойства зерна.

Нахождение полей влагосодержания $u(x, y, z, \tau)$ и температуры $t(x, y, z, \tau)$ в зерновом слое связано с решением системы нелинейных дифференциальных уравнений массо- и теплопереноса при соответствующих граничных условиях, отображающих способ и режим сушки [1...3]. Точное решение данных уравнений затруднительно из-за сложности строения зерна. Зерновые культуры относятся к капиллярным коллоидно-пористым телам и процесс тепло- и массопереноса в поверхностном слое, эндосперме и зародыше зерновки различен [2, 3, 5], а уравнения не учитывают эффекты нестационарности и влияния поверхностных явлений [4].

Представляется целесообразным рассматривать весь процесс сушки зерна, происходящий при переменном режиме, как совокупность процессов, происходящих при постоянном режиме, когда температура воздуха, влажность и скорость движения его остаются постоянными в течение каждого этапа всего процесса сушки зерна. Эти этапы можно установить на основании анализа закономерностей переноса влаги и теплоты [1]. Перенос влаги происходит под действием перепада влагосодержания (изо-термическая диффузия), перепада температуры (термическая диффузия) и перепада общего давления (конвективная диффу-

зия). Градиенты влагосодержания и температуры при соответствующем построении режима сушки могут иметь одинаковое направление или противоположное. В первом случае они усиливают движение влаги, а во втором случае один градиент тормозит действие другого [1...3]. Закономерности протекания процесса сушки зерна характеризуются зависимостями $W_3^c = f(\tau)$, $N = f(W_3^c)$, $t_3 = f(W_3^c)$ (W_3^c – влажность зерна, τ – время, N – скорость сушки, t_3 – температура зерна).

Экспресс-метод экспериментального определения данных зависимостей разработан авторами.

Анализ закономерностей процесса сушки зерна показывает, что для получения наилучших технологических свойств зерна необходимо определить область допустимых и недопустимых режимов сушки. Эти области определяются для каждого этапа или стадии сушки. В теории сушки влажных материалов определены два периода сушки. Вначале скорость сушки увеличивается до какого-то предела, потом она постоянна на протяжении всего периода. Поэтому этот период называют периодом постоянной скорости сушки. Затем, на протяжении второго периода, скорость сушки снижается. Поэтому его называют периодом убывающей скорости сушки. В течение этих периодов зерно проходит определенные стадии сушки, которые условно можно определить как стадии прогрева, подсушки, досушивания. Таким образом, получаем не один допустимый режим сушки, а несколько режимов – для каждого этапа свой допустимый режим.

К рассмотрению предлагается способ сушки зерна в многозонной сушилке с ведением процесса сушки по этапам.

Соответственно, для каждого этапа определены предельно допустимые параметры состояния зерна, на основании которых рассчитываются предельно допустимые параметры воздуха и определяется режим сушки. Предельно допустимые параметры семенного зерна, например, пшеницы представлены в [2]. Эти параметры указывают на то, что максимальная температура воздуха (сушильного агента) может быть не более 95...100°C (при $\Delta t = \max$).

Разработана модель для характеристики процессов тепло- и влагообмена в период отлежки зерна. В качестве материалов

модели взяты изотропные пористые тела в форме шара диаметром d , имеющие разную температуру и влажность и находящиеся в контакте друг с другом. В модели рассматривается слой зерна толщиной H . В модели с учетом хаотического характера зерновой структуры использован подход Куни и Каганера, в котором учитывается влияние числа контактов N_k на одну частицу. В [6] показано, что распределение флуктуаций N_k в насыпном слое подчиняется закону Гаусса, а зависимость N_k от пористости ε описывается соотношением

$$N_k = 19 - 28 \cdot \varepsilon. \quad (1)$$

Для определения теплопереноса за счет контактов вводится контактная теплопроводность λ_k , которая зависит от геометрии зерновки, взаимного расположения, числа и площади контактов, пористости (скважистости), модулей упругости, давления на зерновку.

Установлена связь λ_k с эффективной скоростью распространения продольной ультразвуковой волны по зерновкам v_e .

$$\lambda_k = A \cdot (1 - \varepsilon)^a \cdot p^b \cdot (v_e^2 \cdot \rho_z)^d, \quad (2)$$

где ε – пористость;

A, b, c, d – постоянные величины;

p – давление на поверхность контакта;

ρ_z – плотность зерновки;

v_e – эффективная скорость распространения продольной ультразвуковой волны по зерновкам.

Определены значения λ_k для гороха ($d \approx 5$ мм) $\lambda_k = 0,18$ Вт/(м·К), пшеницы $\lambda_k = 0,12$ Вт/(м·К).

Приведена оценка вкладов в тепловой поток между зерновками в зерновом слое гороха $H = 20d$, $\varepsilon = 0,4$ при условии, что зерновки распределены хаотично, половина зерновок имеет температуру 20°C и влажность $W_1^c = 10\%$, вторая – 70°C и $W_2^c = 20\%$. Считаем, что отношение теплопроводности зерновки λ_z и воздуха λ_a $\lambda_z/\lambda_a = 1$, а отношение температуропроводности $a_z/a_a = 100$. Соотношения тепловых потоков через каркас зерновки, воздушную прослойку и за счет теплового излучения равны $0,41 : 0,5 : 0,09$. По величинам тепловых потоков можно оценить коэффициенты теплоотдачи от зерновок с температу-

рой t_1 к зерновкам с температурой t_2 . Усредняя потоки определяем установившуюся температуру зернового слоя $t_c = 42^\circ\text{C}$.

В модели не рассматривается теплообмен при активном вентилировании, но скорость и время прогрева зернового слоя зависит от скорости и температуры сушильного агента, толщины зернового слоя [1, 2, 5]. Контактный тепло- и массоперенос широко используется в комбинированных технологических процессах сушки зерна [2]. В расчетах процессов в период отлежки следует иметь в виду, что процесс выравнивания по температуре происходит значительно быстрее, чем по влагосодержанию. Это связано с тем, что коэффициент диффузии влаги в зерновых культурах является сложной функцией влагосодержания и температуры. Выбор способа расчета коэффициентов диффузии влаги зависит от толщины зернового слоя [1, 3, 5].

Принятые допущения о поэтапной сушке зерна с постоянным режимом ведения процесса на каждом этапе, анализ закономерностей изменения параметров, характеризующих режим сушки, а также данные предельно допустимой температуры нагрева семенного зерна пшеницы указывают на целесообразности изготовления сушилки в виде модулей, в которых будет обеспечен постоянный режим обработки зерна воздухом, а подогрев его до $t_{c.a.} = 95\dots 100^\circ\text{C}$ обеспечит экономию топливно-энергетических ресурсов по сравнению с подогревом до $t_{c.a.} = 600\dots 700^\circ\text{C}$ в устройствах, в которых происходит сгорание натурального топлива.

Литература

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М., 1968.
2. Жидко, В. И. Зерносушение и зерносушилки / В. И. Жидко, В. А. Резчиков, В. С. Уколов. – М., 1982.
3. Пабис, С. Тепло- и массоперенос / С. Пабис. – т. 6, ч.2. – Киев, 1968.
4. Гринчик, Н. Н. Инженерно-физический журнал / Н. Н. Гринчик [и др.]. – т.76, № 6, 2003.
5. Гинзбург, А. С. Влага в зерне / А. С. Гинзбург. – Мн.: Ураджай, 1975.
6. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. – М.: Химия, 1979.