

УДК 631:362.7

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

*П.С. Агеев, магистрант 1 года обучения;
С.А. Сутягин, кандидат технических наук, доцент;
Г.В. Карпенко, кандидат технических наук, доцент;
А.А. Павлушин, доктор технических наук, доцент;
В.И. Курдюмов, доктор технических наук, профессор
тел.: 89050359200, andrejavlu@yandex.ru
ФГБОУ ВО Ульяновская ГСХА*

Ключевые слова: тепло-, массообменные процессы, сорбция (десорбция), скорость процессов тепловой обработки зерна.

Рассмотрены основные законы, которым подчиняются технологические процессы теплового воздействия на зерно. Проанализированы особенности расчётов тепловых установок с контактным способом передачи теплоты.

Введение. При разработке установок для тепловой обработки зерна учитывают физические законы и физико-химические соотношения, которым подчиняются технологические процессы теплового воздействия на зерно, а также общие методы проведения исследований разрабатываемых средств механизации и их расчётов. Процессы тепловой обработки зерна являются нестационарными и, в ряде случаев, обратимыми процессами (например, сушка зерна), протекающими в основном с переменной (убывающей) скоростью, и поэтому расчёт кинетики процессов представляет значительные трудности.

Результаты исследований и их обсуждение. Следует отметить, что тепловая обработка зерна - это сложный технологический процесс, поэтому при разработке соответствующих установок основываются на законах, которые можно разбить на три группы.

1. Законы, устанавливающие количественные соотношения – фундаментальные законы сохранения массы и энергии. На основании этих законов составляют материальные и энергетические балансы разраба-

тываемых УТОЗ. Например, для тепловой камеры уравнение материального баланса имеет вид:

$$m_{з1} = m_{з2} + m_{вл}, \quad (2.3)$$

где $m_{з1}$, $m_{з2}$ - масса сырого и высушенного зерна соответственно, кг; $m_{вл}$ - масса испарённой влаги, кг.

Уравнение энергетического баланса тепловой камеры УТОЗ контактного типа можно представить в виде:

$$A_{вх} = A_{ух} = \text{const}, \quad (2.4)$$

где $A_{вх}$, $A_{ух}$ - соответственно энергия, внесённая в тепловую камеру зерном, греющей поверхностью и воздухом, и энергия, уходящая из тепловой камеры, кДж.

Так как

$$A_{ух} = A_{пол} + A_{пот}, \quad (2.5)$$

где $A_{пол}$ - полезно использованная энергия, кДж; $A_{пот}$ - потери энергии, кДж, то в общем виде энергетический коэффициент полезного действия (КПД) установки

$$\eta_{эн} = A_{пол} / (A_{пол} + A_{пот}). \quad (2.6)$$

По существу, полезным расходом теплоты в УТОЗ являются затраты энергии на испарение влаги. Тогда приближённо можно принять, что

$$\eta_{эн} \approx (q + q_{св}) / q_{общ}, \quad (2.7)$$

где q - удельные затраты энергии на испарение, кДж/(кг-влаги); $q_{св}$ - удельные затраты энергии на разрыв связи влаги с материалом, кДж/(кг-влаги); $q_{общ}$ - общий расход энергии, кДж/(кг-влаги).

2. Законы, устанавливающие равновесные соотношения.

Влажность зерна, соответствующая состоянию равновесия, явля-

ется равновесной влажностью ω_p . Равновесное состояние обрабатываемого зерна (прекращение испарения влаги с его зерна) может быть достигнуто путём поглощения водяного пара из окружающего воздуха (сорбции) или же путём испарения влаги из зерна (десорбции) [136, 345].

Равновесная влажность, ω_p высушиваемого зерна зависит от парциального давления пара в воздухе p_p , а, следовательно, и от его относительной влажности φ , так как

$$\varphi = p_n / p_n,$$

где p_n - давление насыщенного пара при данной температуре, Па.

Подобные зависимости для зерна графически можно представить в виде кривых -образной формы: изотермой сорбции при увлажнении зерна и изотермой десорбции при испарении влаги из зерна. Указан-

ные изотермы частично не совпадают (при $\varphi = const$ значение равновесной влажности высушиваемого зерна сорбции меньше, чем значение аналогичного показателя десорбции) - явление сорбционного гистерезиса.

На рисунке 1 представлена изотерма десорбции (кривая равновесной влажности). Каждая точка этой кривой соответствует равновесному состоянию обрабатываемого зерна при определённой влажности воздуха (агента сушки) в тепловой камере УТОЗ. При изменении влажности воздуха равновесие нарушается. Так, например, при относительной влажности воздуха φ_1 высушиваемое зерно имеет равновесную влажность ω_1 .

Если же влажность воздуха увеличится до φ_2 , то равновесное состояние нарушится, влажность обрабатываемого зерна начнет возрастать за счет сорбции влаги из воздуха. Равновесие восстановится лишь при равновесной влажности зерна ω_2 , соответствующей влажности воздуха φ_2 .

Зерно может поглощать влагу путём сорбции из окружающего воздуха лишь до гигроскопической влажности ω_g , под которой понимают равновесную влажность зерна при полном насыщении воздуха ($\varphi = 100\%$). Дальнейшее увлажнение зерна происходит лишь при непосредственном его контакте с влагой.

При понижении влажности агента сушки до φ_3 влажность зерна, подвергаемого тепловому воздействию, уменьшится до ω_3 вследствие десорбции влаги из зерна. Обезвоживание зерна путем десорбции влаги

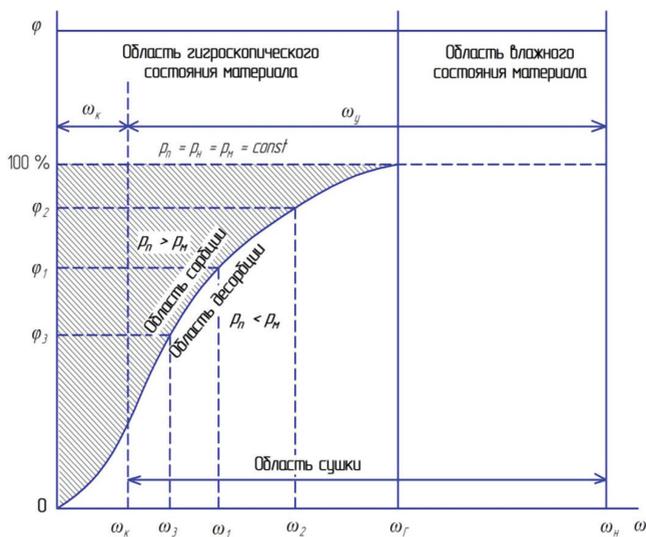


Рисунок 1 – Изотерма десорбции:

φ – относительная влажность воздуха, %; ω_n , ω_r , ω_k – начальная, гигроскопическая и критическая (конечная) влажности высушиваемого зерна соответственно, %; ω_u – удаляемая влага, %; ρ_n и ρ_m – парциальное давление пара в окружающем воздухе и у поверхности зерна соответственно, Па; ρ_n – давление насыщенного пара, Па

происходит до тех пор, пока не удалится вся свободная влага. Критиче-

ская влажность зерна ω_k (конечное значение равновесной влажности) соответствует наличию в зерне лишь связанной влаги, которую нельзя удалить путём десорбции. В основном это химически связанная влага.

Кривая равновесной влажности (изотерма десорбции) разделяет площадь графика на две части: верхнюю, расположенную между кри-

вой, осью ординат и прямой $\varphi = 100\%$ – область сорбции; и нижнюю,

ограниченную кривой, осью абсцисс и прямыми $\omega = \omega_r$ и $\omega = \omega_k$ – область десорбции.

Характерна на этом графике гигроскопическая точка ($\omega = \omega_{\Gamma}$, $\varphi = 100\%$); слева от неё располагается область гигроскопического, справа - область влажного состояния обрабатываемого зерна.

Область от $\omega_{\text{н}}$ до $\omega_{\text{к}}$ (ниже изотермы десорбции) является областью сушки. Так как при тепловом воздействии на зерно при определённых режимных параметрах (скорость подаваемого воздуха, температура греющей поверхности, экспозиция теплового воздействия и т.д.) можно удалить не всю влагу, а только довести влажность обрабатываемого зерна до равновесной $\omega_{\text{р}}$. При этом максимальное количество удаляемой влаги можно определить из выражения:

$$\omega_{\text{у}}^{\text{max}} = \omega_{\text{н}} - \omega_{\text{к}}$$

При проведении практических исследований процесса теплового воздействия на зерно широко используют следующие соотношения парциальных давлений пара над поверхностью обрабатываемого зерна p_3 и в окружающем воздухе $p_{\text{н}}$:
если $p_3 > p_{\text{н}}$, протекает процесс десорбции (удаление влаги из зерна); движущая сила процесса $p_3 - p_{\text{н}}$;
при $p_3 < p_{\text{н}}$ протекает процесс сорбции (поглощение влаги зерном);
при $p_3 = p_{\text{н}}$ наступает динамическое равновесие – процесс влагообмена прекращается.

Знание указанных соотношений необходимо для оценки гигроскопических свойств и теплофизических характеристик обрабатываемого зерна, что важно для выбора оптимальных режимов теплового воздействия, а также условий последующего хранения зерна.

В связи с тем, что влага в зерне находится в различных формах связи с его сухим скелетом (приложение В), аналитическое получение общего уравнения изотерм затруднительно. Поэтому в инженерной практике для расчёта равновесной влажности используют эмпирические формулы, полученные путём обработки опытных данных.

Для расчёта удельных затрат энергии на разрыв связи влаги с обрабатываемым зерном ($q_{\text{св}}$) применяют термодинамические методы, используя при этом зависимость между равновесной влажностью зернового материала и влажностью воздуха.

Наибольшее практическое применение имеет метод академика П.А. Ребиндера, который определил энергию связи $q_{св}$ или работу отрыва единицы массы влаги от обрабатываемого зерна A , кДж, как уменьшение свободной энергии – ΔA , кДж, при температуре t , °С, так как в результате связывания влаги с зерновым материалом снижается давление пара над его поверхностью, и свободная энергия соответственно снижается:

$$q_{св} = A = -\Delta A = R t \ln(p_n/p_u) = -R t \ln A_{в}, \quad (2.8)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·°С); p_n – давление насыщенного пара свободной влаги, Па; p_u – парциальное давление равновесного пара над зерновым материалом с влагосодержанием u , Па; $A_{в}$ – активность влаги, $A_{в} = p_n/p_u$.

Чем прочнее влага связана с зерновым материалом, тем меньше p_u , и наоборот, для свободной влаги $p_u = p_n$, $A_{в} = 1$, $q_{св} = 0$. В процессе теплового воздействия (сушки) на зерно по мере уменьшения его влагосодержания энергия связи увеличивается, так как повышается доля влаги, более прочно связанной с зерном (влага микрокапилляров и адсорбционно связанная влага).

3. Законы, определяющие скорость процессов тепловой обработки - их кинетику. К этой группе относят законы нестационарного теплообмена и тепловлагопереноса. Например, такой вид теплового воздействия на зерно как его сушка, после первой критической влажности протекает с убывающей скоростью: чем ближе текущая влажность зернового материала к равновесной, тем меньше скорость процесса теплового воздействия. Поэтому в расчёте УТОЗ учёт кинетики процесса теплового воздействия имеет решающее значение.

В конце процесса тепловой обработки зерна обычно удаляется влага, прочно связанная с его сухим скелетом, что обуславливает не только уменьшение скорости тепловой обработки, но и требует подвода дополнительной энергии, которая затрачивается на преодоление энергии связи.

В общем виде уравнение внешнего влагообмена при тепловом воздействии на зерно может быть представлено следующим образом:

$$i_m = a_{mp}(p_m - p_n) B_{\text{норм}}/B, \quad (2.9)$$

или

$$i_m = a_{mi}\rho_0(u_n - u_p), \quad (2.10)$$

где i_m - интенсивность испарения влаги, кг/(м²·ч); a_{mp} , a_{mi} - коэффициенты внешнего влагообмена, отнесенные к разности парциальных давлений пара, или к разности влагосодержаний соответственно, Вт/(м²·°С); $B_{\text{норм}}$, B - нормальное барометрическое давление и фактическое общее давление в сушильной камере соответственно, Па; ρ_0 - плотность

абсолютно сухого зернового материала, кг/м³; u_n , u_p - соответственно влагосодержание на поверхности зерна и равновесное, кг влаги/(кг сух. вещества).

Следует учесть, что в связи со сложной зависимостью коэффициентов влагообмена от текущей влажности обрабатываемого зернового материала, а также из-за интенсивного углубления поверхности (зоны) испарения внутрь зерна во второй период сушки эти коэффициенты изменяются, и поэтому использование формул (2.7), (2.8) в инженерных расчётах УТОЗов ограничено. Лучшее приближение к реальности даёт расчёт кинетики процесса теплового воздействия по зонам, при этом влагокоэффициенты считают постоянными только в пределах определённой зоны [346].

Вышеуказанные условия относят к первому классу прямых способов расчёта.

Заключение. В практических расчётах тепловых установок с контактным способом передачи теплоты важное значение имеет второй класс, к которому относят обратные задачи расчёта. В этом случае при ограничивающих условиях (обусловленных технологическими требованиями, такими как максимально допустимая температура нагрева, поверхностный градиент влажности и т. п.) определяют параметры оптимального режима процесса тепловой обработки зерна, обеспечивающие наибольшую эффективность процесса в соответствии с принятым критерием оптимизации.

Библиографический список

1. Курдюмов В.И., Карпенко Г.В., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа. Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. Ульяновск, 2013. - 290 с.

2. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А, Прошкин Е.Н.. Сравнительный анализ установок для сушки зерна. - Материалы VI Международной научно-практической конференции «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения». / Ульяновск, ГСХА им. П.А. Столыпина, 2015. – С. 179...181.
3. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Теоретические аспекты распределения теплоты в установке контактного типа при сушке зерна. «Инновации в сельском хозяйстве». / Москва: ФГБНУ ВИЭСХ, № 2. 2015 г. – С. 159...161.
4. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Повышение качества сушки зерна в установке контактного типа. «Инновации в сельском хозяйстве». / Москва: ФГБНУ ВИЭСХ, № 3. 2015 г. – С. 79...81.
5. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Обеззараживание зерна в установке контактного типа. Материалы 66-й международной научно-практической конференции «Аграрная наука как основа продовольственной безопасности региона». Издательство: Рязанский ГАТУ им. П.А. Костычева. Рязань: 2015 г. – С. 181...183.

HEORETICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF DEVICES FOR HEAT TREATMENT OF GRAIN

Ageev P.S., Sutyagin S.A., Karpenko G.V., Pavlushin A.A., Kurdyumov V.I.

Keywords: heat and mass transfer processes, sorption (desorption), the speed of the processes of heat treatment of grain.

The basic laws that govern the processes of thermal effects on the grain. The features of calculations of thermal plants with a contact method of heat transfer.