

УДК 631.362

УРАВНЕНИЯ КИНЕТИКИ ВЛАГООБМЕНА ПРИ СУШКЕ

*В.Н. Игонин, кандидат технических наук, доцент,
тел. 8(8422) 55-95-95, igonin@chaoslab.ru,
М.В. Сотников, кандидат технических наук, доцент,
тел. 8(8422) 55-95-95, sotnikovmaksim@mail.ru
ФГБОУ ВО Ульяновская ГСХА*

Ключевые слова: сушка зерна, периоды сушки, кривая сушки, убывающая скорость сушки, кинетика сушки.

В работе дано систематическое изложение теоретических основ кинетики сушки на современных представлениях теории теплообмена, сведениях о формах связи влаги с влажными материалами. Приводятся новые методы расчета различных периодов сушки.

Введение. Сушка зерна - это типичный нестационарный процесс, скорость которого лимитируется внутренним переносом влаги. В большинстве случаев сушка зерна протекает с убывающей скоростью испарения. Процессы испарения влаги и нагрева зерна, будучи взаимосвязанными, протекают с разной скоростью. Зерно, как правило, быстро нагревается и медленно отдает влагу. В связи с этим продолжительность сушки и возможное снижение влажности зерна ограничиваются достижением предельно допустимой температуры зерна. Все это требует применения кинетических методов расчета зерносушилок, увязанных с действительной скоростью нагрева и сушки зерна.

Результаты исследований и их обсуждение. На кривых сушки и скорости контактной сушки выделяются период нагрева, 1 - ый период - период постоянной скорости и 2 - ой период - период убывающей скорости сушки. В период нагрева происходит повышение температуры зерна, испарение влаги с поверхности зерна в окружающую среду и одновременно перемещением влаги из внутренних слоев отдельных зерновок к их поверхности. К концу периода нагрева температура зерна достигает температуры испаряющейся жидкости (температуры «смоченного» термометра), а скорость сушки - максимального значения.

В период постоянной скорости сушки, вся подводимая теплота расходуется на испарение влаги, следовательно, зерно не нагревается. Температура его поверхности в течение этого периода остается постоянной и равна температуре «смоченного» термометра. К концу данного

периода количество влаги, подводимой из внутренних слоев, недостаточно для поддержания определенной концентрации влаги на поверхности зерна. Этот момент соответствует точкам перегиба кривых сушки, которые получили название «первые критические точки».

В период убывающей скорости сушки, из-за несоответствия между количеством влаги, поступающей из внутренних слоев, и тем количеством, которое необходимо для поддержания прежней интенсивности испарения происходит снижение скорости сушки, а температура зерна увеличивается вследствие смещения зоны испарения в глубь отдельных зерновок. Данный период делится второй критической точкой на два участка. Условно можно считать, что слева - от начальной влажности зерна происходит удаление физико-механически связанной и осмотически поглощенной влагой; справа - до достижения равновесной влажности - удаление адсорбционно-связанной влаги.

Таким образом, в процессе сушки можно выделить критические влагосодержания $M_{кр1}$ и $M_{кр2}$, которые соответствуют влагосодержаниям в первой и во второй критических точках сушки.

Уравнение кривой сушки в первый период имеет вид

$$M = M_i - Y_{\tau} \text{ г/кг} \quad (1)$$

где M и M_i - текущее и начальное влагосодержания, г/кг; Y - скорость сушки в первый период, г/кг·мин; τ - текущее время, мин.

В уравнении (1) влагосодержание может изменяться в пределах $M_i \geq M \geq M_{кр1}$.

Второй период сушки начинается при всех режимах с $M_{кр1}$ и времени τ_1 , равного длительности первого периода сушки. Это время можно принять за начало отсчета времени второго периода. Кривая сушки во второй период, построенная в полулогарифмических координатах $\lg(M - M_p)$, является либо прямой, либо ломаной линией, состоящей из двух (редко трех) прямых, что свидетельствует о существовании во втором периоде двух (или трех) частей. Эти прямые пересекаются в точках, соответствующих критическим влагосодержаниям $M_{кр1}$ и $M_{кр2}$, которые легко определяются из кривой сушки.

Уравнение прямой для первой части второго периода

$$\lg(M - M_p) = \lg(M_{кр1} - M_p) - R_1 \tau, \quad (2)$$

где M_p - равновесное влагосодержание зерна, г/кг; R_1 - коэффициент сушки в первой части второго периода, г/кг·мин.

В этом случае влагосодержание M меняется в пределах $M_{кр1} \geq M \geq M_k$ и время τ отсчитывается от начала 1-й части второго периода.

Уравнение прямой для второй части второго периода

$$\lg (M - M_p) = \lg (M_{кр2} - M_p) - R_2 \tau, \quad (3)$$

где R_2 - коэффициент сушки во второй части второго периода, г/кг · мин.

В этом случае влагосодержание меняется в пределах $M_{кр2} \geq M \geq M_k$ и время τ отсчитывается от начала 2-й части второго периода.

Величина M_E определяет конечное влагосодержание сушеного материала. Таким образом, кривая сушки во второй период представляется

$$(M - M_p) = (M_{кр1} - M_p) \exp(-2,3 R_1 \tau), \quad (4)$$

$$(M - M_p) = (M_{кр2} - M_p) \exp(-2,3 R_2 \tau), \quad (5)$$

Влияние режима на коэффициенты R_1 и R_2 может быть отражено величиной Y - максимальной скоростью сушки материала при данном режиме в первый период сушки. Это возможно потому, что Y является обобщенной величиной, в которой отражено влияние всех параметров, воздействующих на скорость сушки данного материала, и, что очень существенно, это влияние, как было доказано выше, распространяется на весь второй период сушки.

На основе вышеизложенного, можно предположить, что

$$R_1 = \chi_1 Y, \text{ г/кг} \cdot \text{мин} \quad (6)$$

$$R_2 = \chi_2 Y, \text{ г/кг} \cdot \text{мин} \quad (7)$$

где χ_1, χ_2 - относительные коэффициенты сушки, в двух частях второго периода, определяемые формой связи влаги с материалом, его структурой, плотностью и методом сушки, но не зависящие от режима.

После подстановки (6) и (7) в уравнения (4) и (5) получим

$$(M - M_p) = (M_{кр1} - M_p) \exp(-2,3 \chi_1 Y \tau), \quad (8)$$

$$(M - M_p) = (M_{кр2} - M_p) \exp(-2,3 \chi_2 Y \tau), \quad (9)$$

Выражения (1), (8) и (9) представляют собой уравнения, описывающие кинетику сушки по периодам. При $M_p = 0$ уравнение кинетики контактной сушки для двух частей второго периода запишутся в виде

$$M = M_{кр1} \exp(-2,3 \chi_1 Y \tau), \quad (10)$$

$$M = M_{кр2} \exp(-2,3 \chi_2 Y \tau), \quad (11)$$

В (10) и (11) $M_{кр1}$ и $M_{кр2}$, χ_1 и χ_2 величины постоянные, не зависящие от режима, поэтому текущее влагосодержание M является функцией Y и τ . Согласно (1) M в первый период также представляет собой функцию Y и τ .

Заключение. Введение обобщенного времени $Y\tau$ может стать базой для создания теории моделирования процессов сушки. Оперирование обобщенным временем сушки придает исследованию процесса сушки обобщенный характер. Следовательно, при изучении процесса сушки с использованием $Y\tau$ анализируется не единичный частный слу-

чай, а множество различных случаев сушки, объединенных некоторой общностью параметров процесса.

Библиографический список

1. Артемьев В.Г. Оптимальные режимы работы зерносушилки со спирально-винтовым рабочим органом / В.Г. Артемьев, В.Н. Игонин, М.В. Сотников // Механика жидких и сыпучих материалов в спирально-винтовых устройствах Артемьев В.Г. Сборник научных трудов, посвященный 75 –летию доктора технических наук, профессора Артемьева Владимира Григорьевича. Ульяновск: УГСХА, 2013. С. 78-82.
2. Н.И. Малин “Энергосберегающая сушка зерна” М. “КолосС” 2004, 240 с.
3. А.П. Журавлёв “Теория и практика рециркуляционной сушки зерна” Самара “Парус” 2001, 254 с.
4. Сотников М.В. Установка для сушки зерна в тонком слое / М.В. Сотников // Молодежь и наука XXI века. Материалы Международной научно-практической конференции. Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия; Ульяновск: УГСХА, 2006. С. 214-217.
5. Сотников М.В. Результаты испытаний пружинной зерносушилки / М.В. Сотников, В.Н. Игонин // Современное развитие АПК: региональный опыт, проблемы, перспективы. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ульяновск: УГСХА, 2005. С. 231-233.
6. Сотников М.В. Об использовании спирально-винтовых рабочих органов при сушке сыпучих материалов / М.В. Сотников, В.Н. Игонин // Молодые ученые в XXI веке. Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Ижевская государственная сельскохозяйственная академия. 2005. С. 245-248.
7. Игонин В.Н. Исследование влияния основных факторов процесса сушки зерна в спирально-винтовой зерносушилке на влагосъем / В.Н. Игонин, М.В. Сотников// Молодежь и наука XXI века. материалы II Открытой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Ульяновск: УГСХА, 2007. С. 156-158.
8. Игонин В.Н. Определение коэффициента осевого отставания и коэффициента заполнения сушильной камеры мобильной зерносушилки / В.Н. Игонин, М.В. Сотников// Актуальные проблемы агропромышленного комплекса материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ульяновск: УГСХА, 2008. С. 57-60.
9. Игонин В.Н. Математическая модель процесса сушки зерна в тонком слое применительно к спирально-винтовым зерносушилкам / В.Н. Игонин, М.В. Сотников // Молодежь и наука XXI века материалы II-й Открытой Всерос-

сийской научно-практической конференции молодых ученых. Ульяновск: УГСХА, 2007. С. 162-164.

10. Пат. 2297582 Российская Федерация, МПК F26B 11/14 Устройство для сушки зерна / В.Н. Игонин, М.В. Сотников; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А.Столыпина». - № 2005120253/06, заявл.29.06.2005; опубл. 20.04.2007, Бюл. № 11 .- 4 с.: ил.

A KINETICS EQUATION FOR MOISTURE EXCHANGE IN DRYING

Igonin V.N., Sotnikov M.V.

Keywords: *corn drying, drying times, the drying curve, a decreasing rate of drying, drying kinetics.*

This paper gives a systematic exposition of the theoretical bases of the drying kinetics on the current understanding of the theory of heat and mass transfer, information about the form of moisture due to wet materials. Presents the new methods of calculating the different periods of drying.