

РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ КАПЛИ ЖИДКОСТИ НА ПОДЛОЖКЕ

А.Н. Пахомов, Б.Ш.Д. Аль Саиди, Е.А. Ильин

*Кафедра «Технологические процессы и аппараты»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; panpost@yandex.ru*

Ключевые слова и фразы: влагосодержание; испарение; капля; критериальные уравнения; сушка; тепломассообмен.

Аннотация: Приведены основные уравнения, полученные в результате исследования процесса сушки отдельных капель на твердых горизонтальных подложках, необходимые для расчета кинетики процесса сушки. Показаны некоторые результаты расчета кинетики сушки капли, высыхающей на твердой подложке.

Для расчета кинетики сушки капли жидкости на твердой подложке использован метод разбивки процесса сушки на зоны, инженерно-физическая аппроксимация границ зон и необходимых тепломассообменных характеристик и аналитические решения задач тепло- и массопереноса в пределах каждой зоны при интервальном подходе, развиваемом в школе профессора В.И. Коновалова [1–12].

Особенность метода состоит в решении задачи тепло- и массопереноса с применением эффективных коэффициентов переноса и характеристик [13–16]. Наличие взаимосвязанности тепло- и массопереноса учитывается использованием температурно-влажностных зависимостей [17, 18].

В основе расчета кинетики сушки лежит классическая система уравнений тепло- и массопереноса А.В. Лыкова [19–22]

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2} + \delta_t \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Для линейных задач система (1)–(2) (или аналогичная система для нелинейных задач) применяется в так называемых «эквивалентных» постановках, соответствующих конкретным условиям. При этом учитывается реальный (или предполагаемый) механизм переноса и соответствующие физико-химические явления, наблюдаемые в процессе сушки и находящие свое отражение на кинетических кривых сушки, полученных экспериментально в исследуемых условиях.

Сток тепла на поверхностное испарение в *первом периоде* включаем в эквивалентные граничные условия (ГУ):

$$\lambda_3 \frac{\partial T(l, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_3 [T_{c.3} - T(l, \tau)], \quad (3)$$

где

$$\alpha_3 = \alpha_{3\phi} \left(1 + \frac{\beta_{\text{исп}} r b_n}{\alpha_{3\phi}} \right); \quad (4)$$

$$T_{с.э} = \frac{T_c + \frac{q_{изл}}{\alpha_{эф}} - \Psi \frac{\beta_{исп} r a_n}{\alpha_{эф}}}{1 + \frac{\beta_{исп} r a_n}{\alpha_{эф}}}, \quad (5)$$

$$Nu_{сух} = 1,8 Re^{0,5} Pr^{0,333};$$

$$Nu_{\alpha_{исп}} = 12,0 Re^{0,33} Pr^{0,333};$$

$$Nu_{\beta_{исп}} = 4,95 Re^{0,37} Sc^{0,333},$$

где $T_{с.э}$ – температура среды эквивалентная, °С; $\alpha_{эф}$ учитывает вклад теплоподвода конвекцией и излучением; $\alpha_{исп}$, $\beta_{исп}$ считаются по критериальным уравнениям; Ψ – коэффициент, учитывающий уменьшение интенсивности испарения с поверхности капли при формировании пленки [23, 24].

Определяющий размер

$$d = 4(F_{кан} - F_{обр}) / (\Pi_{кан} + \Pi_{обр}),$$

где $F_{кан}$, $F_{обр}$ – поперечные сечения канала и образца сушилки соответственно, м; $\Pi_{кан}$, $\Pi_{обр}$ – периметры канала и образца сушилки соответственно, м. Определяющая температура – среднеарифметическая температура погранслоя.

Концентрация насыщенного пара у поверхности определяется выражением

$$C_{нас}(T) = a_n + b_n T, \quad (6)$$

где a_n , b_n – коэффициенты аппроксимации уравнения для концентрации насыщенного пара у поверхности. Причем $C_{нас} = C_{нас}(P_{нас}(T(l, \tau)))$, где $P_{нас}(T)$ рассчитывается по уравнению Антуана.

Для простой инженерной оценки значения Ψ принимаем по формуле

$$\Psi = \begin{cases} 1 & \text{при } U \leq U_{п}; \\ 0,8 & \text{при } U_{п} < U \leq U_{кр}. \end{cases} \quad (7)$$

Во *втором периоде* сток тепла на объемное испарение войдет в эквивалентную теплоемкость

$$c_{эф} = c_{г} + c_{ж} \bar{u} - r \frac{d\bar{u}}{dT} b_{г}, \quad (8)$$

где $c_{г}$, $c_{ж}$ – теплоемкости материала и жидкости соответственно, Дж/(кг·К);

$b_{г} = \frac{d\bar{T}}{d\bar{u}}$ – наклон температурно-влажностной кривой.

Граничные условия массопереноса для первого периода – это ГУ-3 поверхностного испарения

$$D_3 \frac{\partial C(l, \tau)}{\partial x} = \beta_{исп} [C(T(l, \tau)) - C_0], \quad (9)$$

а для второго периода обычные условные ГУ-3, отнесенные к перепаду фактических и квазиравновесных концентраций влаги на поверхности материала

$$D_3 \frac{\partial C(l, \tau)}{\partial x} = \beta^* [C(l, \tau) - C_{кв}^*(T(l, \tau))]. \quad (10)$$

В результате система уравнений (1)–(2) и ГУ-3 к ним сводятся к единообразной форме, для которой получены аналитические решения в двухслойной (n -слойной) по геометрии и в интервальной по времени постановке.

При этом объемная концентрация влаги C , кг вл./м³ вл. мат. в уравнениях диффузии, включающих $D_э$, м²/с, пересчитывается в удобные для расчетов сушки относительные влагосодержания \bar{u} , кг вл./кг абс. сух. по обычному соотношению

$$\bar{u} = \frac{C(1-\Pi)}{\rho_{ск}}, \quad (11)$$

где Π – фактическая пористость в текущий момент процесса (и в данном сечении материала), то есть доля объема, незанятая «абсолютно» сухим материалом («скелетом»).

Как следует из анализа полученных кинетических кривых сушки капли жидкой послеспиртовой барды, для расчета кинетики сушки в первом периоде можно выделить два критических влагосодержания:

$U_{п}$ – влагосодержание соответствующее точке перегиба $T_{п}$ на термограмме;

$U_{кр}$ – влагосодержание соответствующее окончанию первого периода сушки.

На кривой сушки – это точка резкого уменьшения скорости сушки, а на видеозаписи – окончание формирования пленки на поверхности капли и начало изменения цвета полученной корки.

Таким образом, границы зон необходимо аппроксимировать критическими влагосодержаниями $U_{п}$ и $U_{кр}$ и соотношениями кусочно-линейной или другой температурно-влажностной зависимости.

В нашем случае величина $U_{п} \approx (0,6 \dots 0,7)U_0$, а величина $U_{кр} \approx (0,25 \dots 0,32)U_0$.

Влияние внешнего соотношения внешнего теплообмена и внутреннего теплопереноса в капле можно попытаться учесть критерием Био.

Общий вид зависимости следующий

$$U_{п} = A Bi^n U_0.$$

Полученные данные с достаточной степенью коррелируют с подвижностью исходной жидкости, зависящей от ее концентрации. Поэтому весьма важными являются данные по сушке одних и тех же жидкостей в широком диапазоне концентраций: чистый растворитель, от близких по текучести к чистой жидкости (8–10 % твердой фазы и менее) до практически нетекучих паст (50 % твердой фазы и более).

Явный вид этих зависимостей, найден обработкой экспериментальных данных:

$$U_{п} = 1,6Bi^{0,4} U_0,$$

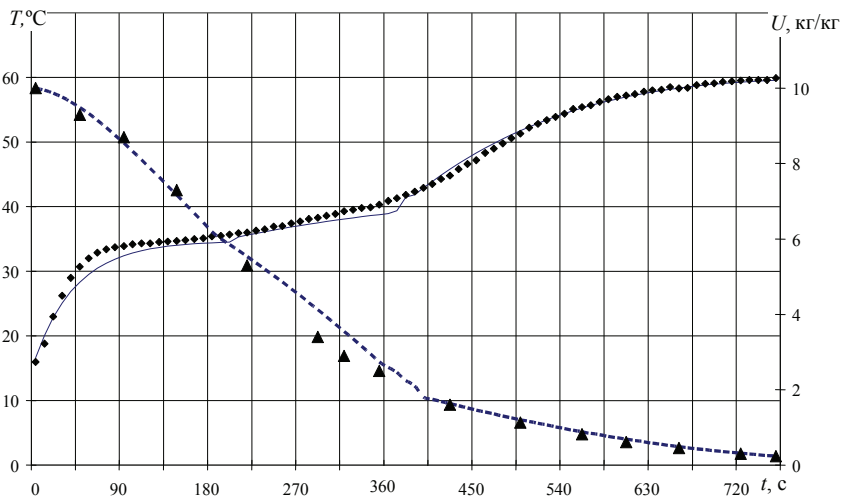
или упрощенно

$$U_{п} = 0,68 U_0. \quad (12)$$

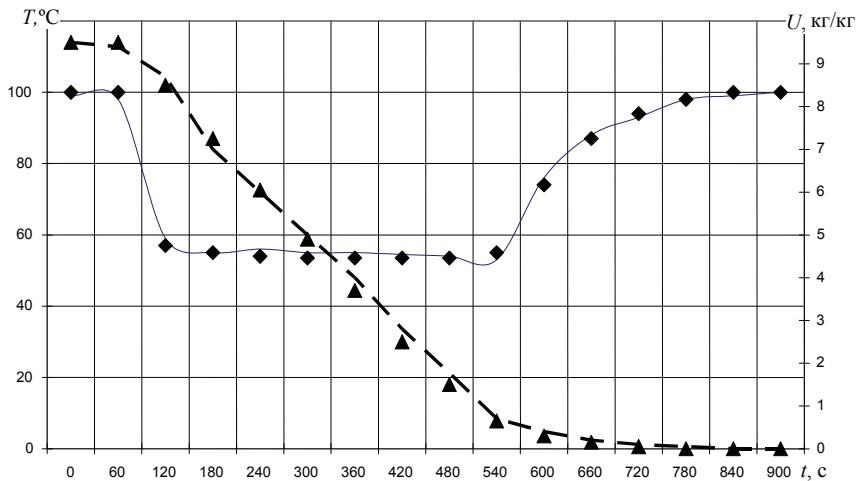
Аппроксимация величины $U_{кр}$ возможна на основе аналогичных соображений

$$U_{кр} = 0,3 U_0. \quad (13)$$

В пределах второго периода аппроксимация температурно-влажностных зависимостей производится с использованием зависимости определенного вида.



a)



б)

**Сравнение расчетных (линии) и экспериментальных данных (точки)
по сушке на фторопластовом диске
(толщина 3 мм; диаметр – 8,5 мм):**

a – жидкая послеспиртовая барда, $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; скорость сушильного агента – 3 м/с;
б – бутилацетат, $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; скорость сушильного агента – 1,5 м/с

В итоге расчет кинетики сушки сводится к использованию аналитических решений задачи теплопроводности/диффузии с введением аппроксимации температурно-влажностной зависимости и тепломассопереносных характеристик по временным интервалам.

Отметим, что в границах каждого временного интервала в первом периоде необходимо рассчитать профиль капли жидкости, площадь поверхности испарения и толщину капли с учетом убыли влаги.

Результаты расчетов кинетики сушки капли жидкой послеспиртовой барды и бутилацетата по описанному методу и сравнение этих результатов с экспериментальными данными представлены на рисунке.

Список литературы

1. Коновалов, В.И. Особенности интенсивной сушки материалов, пропитанных дисперсиями или растворами / В.И. Коновалов, А.Г. Двойнин, Е.Н. Туголуков // Теплообмен – ММФ. Избр. доклады Междунар. форума / Ин-т тепло- и массообмена АН СССР. – Минск, 1989. – Секции 6, 7. – С. 152–165.
2. Коновалов, В.И. Базовые кинетические характеристики массообменных процессов / В.И. Коновалов // Журн. приклад. химии. – 1986. – Т. 59, № 9. – С. 2096–2107.
3. Коновалов, В.И. Расчет кинетики процессов сушки на базе соотношений теплопереноса : метод. указания / В.И. Коновалов. – Тамбов : ТИХМ, 1978. – 32 с.
4. Коновалов, В.И. Теплообмен в системах газ-дисперсная твердая фаза / В.И. Коновалов // Теплообмен-VII. Проблемные доклады VII Всесоюзной конференции по теплообмену / Ин-т тепло- и массообмена АН СССР. – Минск, 1985. – Ч. 2. – С. 128–147.
5. Коновалов, В.И. О возможностях использования циклических тепловых и взаимосвязанных теплодиффузионных процессов в химических и других производствах / В.И. Коновалов, Н.Ц. Гагапова, Е.Н. Туголуков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1995. – Т. 1, № 3–4. – С. 273–288.
6. Коновалов, В.И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / В.И. Коновалов, А.М. Коваль. – М. : Химия, 1989. – 224 с.
7. Коновалов, В.И. О возможностях использования точных, интервальных и приближенных аналитических методов в задачах тепло- и массопереноса в твердых телах / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1995. – Т. 1, № 1–2. – С. 75–90.
8. Коновалов, В.И. К расчету внутреннего тепло- и массопереноса и кинетики сушки и нагрева волокнистых материалов / В.И. Коновалов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 3. – С. 224–236.
9. Коновалов, В.И. К расчету внешнего теплообмена при сушке и нагреве волокнистых материалов / В.И. Коновалов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 1–2. – С. 47–60.
10. Коновалов, В.И. Геометрия, циркуляция и теплообмен при испарении капли на подложке / В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов, Ю.В. Пахомова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 371–387.
11. Сергеева, Е.А. Кинетика испарения растворителей и сушки покрытий на пористых и монолитных материалах : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 16.03.2001 / Сергеева Елена Анатольевна. – Тамбов, 2000. – 210 с.
12. Гагапова, Н.Ц. Кинетика и моделирование процессов сушки растворителей, покрытий, дисперсий, растворов и волокнистых материалов: единый подход : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 : защищена 10.06.2005 : утв. 14.10.2005 / Гагапова Наталья Цибиковна. – Тамбов, 2005. – 554 с.
13. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Физматиздат, 1959. – 700 с.
14. Тутова, Э.Г. Сушка продуктов микробиологического производства / Э.Г. Тутова, П.С. Куц. – М. : Агропромиздат, 1987. – 303 с.
15. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник : пер. с англ. / Х. Уонг. – М. : Атомиздат, 1979. – 216 с.
16. Урьев, Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов / Н.Б. Урьев. – М. : Химия, 1988. – 256 с.
17. Konovalov, V.I. Guest Editorial. Drying R&D Needs: Basic Research in Drying of Capillary-Porous Materials / V.I. Konovalov // Drying Technology – an Intern. Journal. – 2005. – Vol. 23, No. 12. – P. 2307–2311.

18. Konovalov, V.I. Some Generalized and Particular Issues on Modeling of Complex Drying Processes Based on Temperature–Moisture Relationships : in 3 parts / V.I. Konovalov, T. Kudra, N.Z. Gatapova // 17th Intern. Drying Symposium (IDS-2010), Magdeburg, Germany, 3–6 October 2010. – Magdeburg, 2010. – 1. General statements. – Vol. A. – P. 478–485 ; 2. Specific Targets. Thermally–Thin Bodies. – Vol. A. – P. 248–256 ; 3. Specific Targets. Drying with Essential Temperature Kinetics. – Vol. B. – P. 786–794.

19. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.

20. Лыков, А.В. Теплообмен : справочник / А.В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.

21. Лыков, А.В. Сопряженные задачи конвективного теплообмена / А.В. Лыков, А.А. Алексащенко, В.А. Алексащенко. – Минск : Изд-во БГУ им. Ленина, 1971. – 346 с.

22. Лыков, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А.В. Лыков. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.

23. Пахомова, Ю.В. Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю.В. Пахомова, В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70–82.

24. Пахомова, Ю.В. Оценка качества готового продукта при сушке жидких дисперсных веществ / Ю.В. Пахомова, В.И. Коновалов // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2011. – № 2(33). – С. 407–412.

Calculation of Drying Kinetics of a Liquid Droplet on the Substrate

A.N. Pakhomov, B.Sh.D. Al Saedi, E.A. Ilyin

*Department “Processes and Devices”, TSTU;
panpost@yandex.ru*

Key words and phrases: criteria equations; droplet; drying; evaporation; heat and mass transfer; moisture content.

Abstract: The paper describes the basic equations obtained from the study of the drying process of individual droplets of liquid on solid horizontal substrates required to calculate the kinetics of the drying process. Some results of the calculation of drying kinetics of liquid droplets drying on a solid substrate have been discussed.

Berechnung der Kinetik des Trocknens des Tropfens der Flüssigkeit auf der Unterlage

Zusammenfassung: Es werden die für die Kinetik des Prozesses des Trocknens der notwendigen Hauptgleichungen, die infolge der Forschung des Prozesses des Trocknens der abgesonderten Tropfen der flüssigen Materialien auf den festen horizontalen Unterlagen erhalten sind, angeführt. Es werden einige Ergebnisse der Berechnung der Kinetik des Trocknens des Tropfens, die auf der festen Unterlage vertrocknet, angeführt.

Calcul de la cinétique du séchage d'une goutte de liquide sur une couche dorsale

Résumé: Sont citées les essentielles équations reçues à l'issue de l'étude du processus du séchage de certaines gouttes des matériaux liquides dispersés sur les couches dorsales dures nécessaires pour le calcul de la cinétique du processus du séchage. Sont montrés quelques résultats du calcul de la cinétique du séchage d'une goutte séchant sur une couche dorsale dure.

Авторы: *Пахомов Андрей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы и аппараты»; *Аль Сауди Бассам Шариф Денеф* – аспирант кафедры «Технологические процессы и аппараты»; *Ильин Ефим Анатольевич* – магистрант кафедры «Технологические процессы и аппараты», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Дмитриев Вячеслав Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
