

УДК 664.724

UDC 664.724

05.00.00. Технические науки

Technical sciences

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛАХ****PHENOMENOLOGICAL APPROACH TO THE DESCRIPTION OF TRANSPORT PROCESSES IN LOOSIBLE MATERIALS**

Доценко Сергей Павлович  
д.х.н., доцент  
РИНЦ SPIN-код: 1263-8551  
*Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия*

Dotsenko Sergei Pavlovich  
Doctor of Chemical Science, Associate Professor  
RSCI SPIN-code: 1263-8551  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Математическое описание потенциалов массопереноса гигроскопичных материалов возможно на основе аналитических выражений, описывающих изотермы сорбции и десорбции. Из-за сложного характера взаимодействия коллоидных капиллярно-пористых материалов с влагой, определяемого действием кроме сил сорбции (физическая сорбция, абсорбция, хемосорбция), сил капиллярной конденсации и осмотических, которые для разных материалов специфичны и количественно разные, до настоящего времени отсутствует единая универсальная зависимость для аналитического описания изотерм сорбции и десорбции. Соответственно существует большое разнообразие аналитических выражений для описания изотерм сорбции и десорбции. Существует много различных методов аналитического описания сорбционных свойств коллоидных капиллярно-пористых материалов. Все известные методы можно разбить на две группы – к первой следует отнести аналитические выражения, выведенные теоретически на основе различных гипотез и предпосылок, ко второй – чисто эмпирические на основе расширения или изменения форм моделей первой группы. Большое количество уравнений изотерм равновесия являются математически эквивалентными. Таким образом, метод определения потенциала переноса основанный на положении, позволяет взять в основу расчета экспериментальные данные по гигроскопическим свойствам определенных материалов и использовать феноменологический подход для инженерного расчета сложных технических устройств

A mathematical description of the potentials of mass-transfer of hygroscopic materials is possible on the basis of analytical expressions describing sorption and desorption isotherms. Because of the complex nature of the interaction of colloidal capillary-porous materials with moisture, determined by the action other than sorption forces (physical sorption, absorption, chemisorption), capillary condensation forces and osmotic forces, which for different materials are specific and quantitatively different, to date There is no single universal dependence for the analytical description of isotherms of sorption and desorption. Accordingly, there is a wide variety of analytical expressions for the description of isotherms of sorption and desorption. There are many different methods of analytical description of the sorption properties of colloidal capillary-porous materials. All known methods can be divided into two groups: the first should include analytical expressions derived theoretically on the basis of various hypotheses and assumptions, while the second - purely empirical based on the expansion or change in the forms of models of the first group. A large number of equations of equilibrium isotherms are mathematically equivalent. Thus, the method of determining the transport potential based on position allows us to take as a basis for calculation the experimental data on the hygroscopic properties of certain materials and to use the phenomenological approach for the engineering calculation of complex technical devices

Ключевые слова: ПОТЕНЦИАЛ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ, ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Keywords: POTENTIAL OF MOISTURE TRANSMISSION, HYGROSCOPIC PROPERTIES

Doi: 10.21515/1990-4665-129-076

Сушка сыпучих материалов базируется на граничных условиях равновесной термодинамики [1] и кинетики основанной на термодинамики необратимых процессов [2]. Использование термодинамических методов

анализа влагопереноса основано на использовании понятия потенциала [3]. Под этим понимают функцию состояния системы, которая при равновесии равна во всех точках системы и градиент которой определяет направление и скорость переноса соответствующей субстанции [4]. Если провести аналогию с теплопередачей [5], где давно и успешно применяются термодинамические методы анализа, то потенциалом переноса в теплопередаче является температура, а теплосодержанию аналогично понятие массосодержания [6]. Термодинамический метод исследования процессов переноса тепла и массы вещества основывается на всеобщих законах природы - законе сохранения и превращения энергии и законе сохранения массы вещества. В термодинамическом методе [7] особенно важно установление понятия потенциала переноса, который в общем случае равен частной производной от соответственно выбранной характеристической функции [8] по обобщенной координате

$$\Theta = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial K} \right)_{i,l,m_j} \quad (1)$$

где индексы  $i, l, m_j$  показывают условия взаимодействия системы с окружающей средой;  $i$  – параметр, фиксируемый в случае теплопереноса в закрытой системе;  $i, l$  – в случае теплопереноса в открытой системе;  $i, l, m_j$  – в случае массопереноса в открытой системе. Обычно в зависимости от условий взаимодействия системы с окружающей средой [9] в качестве характеристических функций (1) выбирают - внутреннюю энергию ( $U$ ), энтальпию ( $H$ ), свободную энергию ( $F$ ) и изобарно-изотермический потенциал ( $Z$ ). Для влаги, поглощенной капиллярно-пористым теплом, химический потенциал можно представить в виде

$$\mu = \mu_0 + \mu_i \quad (2)$$

В случае поглощенной влаги, связанной адсорбционными силами, величина  $\mu_1$  тождественна (2) адсорбционному потенциалу Поляни, взятому с обратным знаком

$$\mu_i = -\varepsilon = \mu_0 + R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_u}{P_s}\right) \quad (3)$$

которая, как указывается в работе [10], действительна (3) при допущении, что для пара в газовой фазе справедливы законы идеального газа, а жидкость в адсорбированном слое несжимаема. В уравнении (3)  $\mu_0$  - та часть химического потенциала, которая зависит только от потенциала переноса от стандартного уровня, при котором потенциал переноса равен нулю. В гигроскопической области за этот стандартный уровень принимают величину химического потенциала массы вещества при относительной влажности [11]. Тогда перенос вещества к низшему химическому потенциалу рассчитывается аналогично переносу при отрицательных температурах шкалы Цельсия. Уравнение (3) справедливо для всех основных форм связи влаги с материалом: адсорбционной, осмотической и капиллярной [12]. Для определения потенциала массопереноса установлено, что равновесное удельное влагосодержание тела не зависит от того, находится или нет, оно в соприкосновении с другим телом, если известны его гигроскопические свойства. Таким образом, по данным изотерм сорбции и десорбции влажных материалов в гигроскопической области можно определить значение экспериментального потенциала переноса массы вещества [13]. Показано, что через единый градиент потенциала переноса  $\nabla\mu$  можно описать перенос пара и жидкости в гигроскопической области. Плотность потока влаги, если пренебречь термодиффузией пара и растворенного вещества в жидкости, можно представить соотношением:

$$\vec{j} = -\lambda_m \nabla\mu \quad (4)$$

где:  $\lambda_m$  - коэффициент массопроводности, который является коэффициентом пропорциональности между плотностью потока влаги (4) и градиентом потенциала  $\nabla\mu$  (по аналогии с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , для

которого  $\lambda = \frac{j_q}{\nabla T}$ ). Градиент потенциала  $\nabla\mu$  может быть выражен [14] через градиент  $\nabla u$  и  $\nabla T$ :

$$\nabla\mu = \left(\frac{\partial\mu}{\partial u}\right)_T \nabla u + \left(\frac{\partial\mu}{\partial T}\right)_u \nabla T \quad (5)$$

Тогда уравнение (5) можно записать:

$$\vec{j}_m = -\lambda_m \left(\frac{\partial\mu}{\partial u}\right)_T \nabla u - \lambda_m \left(\frac{\partial\mu}{\partial T}\right)_u \nabla T = -a_m \gamma \nabla u - a_m \gamma \delta \nabla T \quad (6)$$

где коэффициенты уравнения (6)  $a_m$  и  $\delta$  соответственно равны:

$$a_m = \frac{\lambda_m}{\gamma \left(\frac{\partial U}{\partial \mu}\right)_T} \quad \delta = \left(\frac{\partial U}{\partial \mu}\right)_T \left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_U \quad (7)$$

Удельная изотермическая массоемкость (7) определяется по соотношению

$C_m = \left(\frac{\partial u}{\partial \mu}\right)_T$ , соответственно коэффициент  $a_m$  является аналогом коэффициента температуропроводности  $a$ :

$$a_m = \frac{\lambda_m}{C_m \gamma}; \quad a = \frac{\lambda}{C_p \gamma} \quad (8)$$

Поэтому в (8) коэффициент  $a_m$  называют коэффициентом потенциалопроводности массопереноса, так как коэффициент температуропроводности можно назвать коэффициентом потенциалопроводности теплопере-

носа. Темпероградиентный коэффициент равен произведению удельной массосъемкости на температурный коэффициент потенциала массопереноса:

$$\delta = C_m \left( \frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_i \quad (9)$$

Таким образом из (9) следует, что при решении задач тепло- и массопереноса необходимыми являются коэффициенты массопереноса. Для случая постоянных коэффициентов массопереноса развита аналитическая теория тепло - и массопереноса [15]. При переменных коэффициентах массопереноса возникают серьезные математические трудности в решении задач переноса тепла и вещества. Для некоторых частных случаев изменения коэффициентов переноса по определенным законам удалось получить решение [16]. В общем случае возможен выход с помощью использования численного интегрирования конкретных задач, чему благоприятствует широкое развитие вычислительной техники [17]. Математическое описание потенциалов массопереноса гигроскопичных материалов возможно на основе аналитических выражений, описывающих изотермы сорбции и десорбции. Из-за сложного характера взаимодействия коллоидных капиллярно-пористых материалов с влагой, определяемого действием кроме сил сорбции (физическая сорбция, абсорбция, хемосорбция), сил капиллярной конденсации и осмотических [18], которые для разных материалов специфичны и количественно разные, до настоящего времени отсутствует единая универсальная зависимость для аналитического описания изотерм сорбции и десорбции. Соответственно существует большое разнообразие аналитических выражений для описания изотерм сорбции и десорбции [19]. Существует много различных методов аналитического описания сорбционных свойств коллоидных капиллярно-пористых материалов. Все известные методы можно разбить на две группы – к первой следует отнести аналитические выражения, выведенные теоретически на основе раз-

личных гипотез и предпосылок, ко второй – чисто эмпирические на основе расширения или изменения форм моделей первой группы. Большое количество уравнений изотерм равновесия являются математически эквивалентными [20].

Таким образом, метод определения потенциала переноса основанный на положении  $|\mu| = E$ , позволяет взять в основу расчета экспериментальные данные по гигроскопическим свойствам определенных материалов и использовать феноменологический подход для инженерного расчета сложных технических устройств [21].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Подгорный С.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Определение параметров математической модели равновесных свойств зерна в гигроскопической области нелинейной оптимизацией // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2010. № 5-6. С. 84.
2. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Математическое моделирование процессов сушки и кондиционирования зерна. Потенциалы массопереноса.: монография. — Saarbrücken: Изд-во LAP LAMBERT, 2012. 136 с. ISBN: 978-3-659-24821-4.
3. Косачев В.С., Кошевой Е.П., Михневич А.Н., Миронов Н.А. Зависимости для описания теплообмена в слое // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. № 2-3. С. 82-83.
4. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Зверев С.В. Статистическая оценка кластерной модели гигроскопичности зерна // Хранение и переработка сельхозсырья. 2011. № 6. С. 11-14.
5. Схаляхов А.А., Верещагин А.Г., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Разработка модели конденсации парогазовых смесей с полимерными полволоконными мембранами // Новые технологии. 2009. № 1. С. 39-43.
6. Кошевой Е.П., Косачев В.С., Блягоз Х.Р., Схаляхов А.А. Теоретический анализ экстракции в массообменнике с пористой перегородкой // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2001. № 5-6. С. 66-68.
7. Схаляхов А.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Математическое моделирование процесса разделения жидких смесей в мембранном модуле с различной организацией потоков // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 2-3. С. 71-74.
8. Подгорный С.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П., Схаляхов А.А. Влажностно-температурные кинетические зависимости при сушке // Новые технологии. 2014. № 1. С. 43-47.
9. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Схаляхов А.А. Постановка задачи описания переноса тепла, массы и давления при сушке // Новые технологии. 2014. № 3. С. 20-27.

10. Схаляхов А.А., Верещагин А.Г., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Конденсатор для парогазовых смесей с полимерными полуволоконными мембранами. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 2-3. С. 68-70.

11. Меретуков З.А., Заславец А.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Методы решения дифференциальных уравнений гидродинамики // Новые технологии. 2012. № 1. С. 36-41.

12. Схаляхов А.А., Верещагин А.Г., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Теплообмен в теплообменниках с полимерными полуволоконными мембранами // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 2-3. С. 79-81.

13. Подгорный С.А., Меретуков З.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Метод конечных элементов в решении задач теплопроводности. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 2 (56). С. 10-15.

14. Схаляхов А.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П., Никонов Е.О. Определение проницаемости полуволоконных и трубчатых мембран. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 2-3. С. 96-98.

15. Blyagoz Kh.R., Skhalyakhov A.A., Zaslavets A.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Modeling of membrane process of nano- and miniemulsies formation // Новые технологии. 2011. № 2. С. 15-17.

16. Меретуков З.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Решение дифференциального уравнения отжима // Новые технологии. 2011. № 4. С. 54-57.

17. Меретуков З.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Решение задачи нелинейной напоропроводности при отжиме // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2011. № 5-6 (323-324). С. 62-64.

18. Схаляхов А.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Вязкость компонентов реакционной смеси при производстве биодизельного топлива из растительных масел. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 1. С. 113-115.

19. Косачев В.С. Повышение эффективности рафинации масел в мыльно-щелочной среде на основе изучения физико-химических особенностей процесса // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Краснодарский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт. Краснодар, 1985

20. Заславец А.А., Схаляхов А.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Кошевая С.Е. Гидравлика реверсивного течения внутри мембраны контактора // Новые технологии. 2013. № 2. С. 91-94.

21. Кошевой Е.П., Косачев В.С., Верещагин А.Г., Гукасян А.В., Схаляхов А.А. Конденсатор // патент на полезную модель RUS 61401 27.11.2006

## References

1. Podgornyj S.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Opredelenie parametrov matematicheskoj modeli ravnovesnyh svojstv zerna v gigroskopicheskoj oblasti nelinejnoj optimizacii // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2010. № 5-6. S. 84.

2. Podgornyj S.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Matematicheskoe modelirovanie processov sushki i kondicionirovanija zerna. Potencialy massoperenosa.: monogra-fija. — Saarbrücken: Izd-vo LAP LAMBERT, 2012. 136 s. ISBN: 978-3-659-24821-4.

3. Kosachev V.S., Koshevoj E.P., Mihnevich A.N., Mironov N.A. Zavisimosti dlja opisanija teploobmena v sloe // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2008. № 2-3. S. 82-83.

4. Podgornyj S.A., Koshevoj E.P., Kosachev B.C., Zverev S.V. Statisticheskaja ocenka klasternoj modeli gigroskopichnosti zerna // Hranenie i pererabotka sel'hoz-syr'ja. 2011. № 6. S. 11-14.

5. Shaljahov A.A., Vereshhagin A.G., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Razrabotka modeli kondensacii parogazovyh smesej s polimernymi polovolokonnymi membranami // Novye tehnologii. 2009. № 1. S. 39-43.

6. Koshevoj E.P., Kosachev B.C., Bljagoz H.R., Shaljahov A.A. Teoreticheskij analiz jekstrakcii v massoobmennike s poristoj peregorodkoj // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2001. № 5-6. S. 66-68.

7. Shaljahov A.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Matematicheskoe modelirovanie processa razdelenija zhidkih smesej v membrannom module s razlichnoj organizaciej potokov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2009. № 2-3. S. 71-74.

8. Podgornyj S.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P., Shaljahov A.A. Vlazhnostno-temperaturnye kineticheskie zavisimosti pri sushke // Novye tehnologii. 2014. № 1. S. 43-47.

9. Podgornyj S.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Shaljahov A.A. Postanovka zadachi opisaniya perenosa tepla, massy i davlenija pri sushke // Novye tehnologii. 2014. № 3. S. 20-27.

10. Shaljahov A.A., Vereshhagin A.G., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Kondensator dlja parogazovyh smesej s polimernymi polovolokonnymi membranami. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2009. № 2-3. S. 68-70.

11. Meretukov Z.A., Zaslavec A.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Metody reshenija differencial'nyh uravnenij gidrodinamiki // Novye tehnologii. 2012. № 1. S. 36-41.

12. Shaljahov A.A., Vereshhagin A.G., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Teploobmen v te-ploobmennikah s polimernymi polovolokonnymi membranami // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2009. № 2-3. S. 79-81.

13. Podgornyj S.A., Meretukov Z.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Metod konechnykh jelementov v reshenii zadach teploprovodnosti. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tehnologij. 2013. № 2 (56). S. 10-15.

14. Shaljahov A.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P., Nikonov E.O. Opredelenie pronicaemosti polovolokonnyh i trubchatykh membran. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2009. № 2-3. S. 96-98.

15. Blyagoz Kh.R., Skhalyakhov A.A., Zaslavets A.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Modeling of membrane process of nano- and miniemulsions formation // Novye tehnologii. 2011. № 2. S. 15-17.

16. Meretukov Z.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Reshenie differencial'nogo uravnenija otzhima // Novye tehnologii. 2011. № 4. S. 54-57.

17. Meretukov Z.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Reshenie zadachi nelinejnoj naporoprovodnosti pri otzhime // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2011. № 5-6 (323-324). S. 62-64.

18. Shaljahov A.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Vjazkost' komponentov reakcionnoj smesi pri proizvodstve biodizel'nogo topliva iz rastitel'nyh masel. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2009. № 1. S. 113-115.

19. Kosachev V.S. Povyshenie jeffektivnosti rafinacii masel v myl'no-shhelochnoj srede na osnove izuchenija fiziko-himicheskikh osobennostej processa // avto-referat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk / Krasnodarskij ordena Trudovogo Krasnogo Znameni politehnicheskij institut. Krasnodar, 1985

20. Zaslavec A.A., Shaljahov A.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Koshevaja S.E. Gidravlika reversivnogo techenija vnutri membrany kontaktora // Novye tehnologii. 2013. № 2. S. 91-94.

21. Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Vereshhagin A.G., Gukasjan A.V., Shaljahov A.A.  
Kondensator // patent na poleznuju model' RUS 61401 27.11.2006