





Термодинамика неизотермической диффузии при экстрагировании из люпина подсырной сывороткой

Юлиан И. Шишацкий¹Александр С. Белозерцев¹Алексей М. Барбашин¹Сергей А. Никель¹alex_bel77@mail.rualeksej-barbashin@ya.rusergei.nickel@yandex.ru 0000-0002-7391-0254 0000-0003-0995-3396 0000-0001-9043-9452¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Во многих случаях экстрагированию сопутствуют тепловые явления. Нами установлена возможность интенсификации процесса за счет использования нагретой подсырной сыворотки. Люпин различной геометрической формы (сфера, цилиндр, пластина) загружался в экстрактор, заполненный подсырной сывороткой. Вследствие разности температур твердого тела и жидкости возникал температурный градиент. По мере прогрева тела градиент температуры уменьшался, а затем исчезал. Температурный градиент будет сохраняться, если в аппарате непрерывного действия, например, организован ступенчатый температурный режим. Однако такой режим должен быть технологически и энергетически обоснован. Таким образом, при экстрагировании имеет место период температурной нестационарности. Возникновение этого периода отмечается в ряде работ. Записано выражение для прироста энтропии в единицу времени. С учетом изменения энтропии записано уравнение Гиббса. Основой уравнений является второй закон термодинамики, а сами уравнения – основой для выбора потоков и термодинамических сил. Из приведенных уравнений заключается, что произведение скорости на абсолютную температуру равно сумме произведений потоков на соответствующие термодинамические движущие силы. Записаны уравнения переноса энергии (теплоты) и массы вещества. Обе термодинамические силы вносят вклад в образование потока теплоты и потока массы вещества. Поток массы вещества зависит не только от градиента потенциала (диффузия), но и от градиента температур (термодиффузия). Поток теплоты определяется как градиентом температуры, так и градиентом химического потенциала (диффузия). Дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса Лыкова переписаны с учетом процесса экстрагирования. С численными значениями коэффициентов D_T и a_c связана оценка влияния эффектов наложения (термодиффузия и диффузионная теплопроводность). Эффектом наложения можно пренебречь, поскольку сравнительно малы градиенты температур и концентраций, возникающих в люпине. Отмечается, что возможность упрощения дифференциальных уравнений связана с малыми значениями критерия Лыкова. Из этого следует, что концентрационное поле более инерционно, чем температурное, а в период температурной нестационарности составляет малую часть от всего периода экстрагирования.

Ключевые слова: люпин, подсырная сыворотка, потоки теплоты, потоки массы, термодинамические силы

Thermodynamics of non-isothermal diffusion at the extraction from cheese whey by Lupin

Yulian I. Shishackij¹Aleksandr S. Belozercev¹Alexey M. Barbashin¹Sergey A. Nikel¹alex_bel77@mail.rualeksej-barbashin@ya.rusergei.nickel@yandex.ru 0000-0002-7391-0254 0000-0003-0995-3396 0000-0001-9043-9452¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. In many cases, extraction is accompanied by thermal phenomena. We have established the possibility of intensifying the process through the use of heated cheese whey. Lupine has a geometric shape (sphere, cylinder, plate) loaded into an extractor filled with cheese whey. Due to the temperature difference between the solid and the liquid, temperature gradients are observed. As the body warms up, the temperature gradient decreases and then disappears. For example, an organized step temperature mode. However, such a regime should be technologically and energetically justified. Thus, during extraction there is a periodic non-stationarity. The emergence of this period is noted in the main works. The expression for the increase in entropy per unit time is written. Given the changes in entropy, the Gibbs equation is written. The basics of equations are the second laws of thermodynamics. As a result, the results obtained as a result of thermodynamic driving forces were obtained. The equations of energy (heat) and mass transfer of substances are written. Thermodynamic forces contribute to the formation of heat flux and mass flow of substances. The consumption of a substance depends not only on the gradient (diffusion), but also on the temperature gradient (thermal diffusion). Air temperature is defined as a temperature gradient. The differential equations of heat and mass transfer of Lykov were rewritten taking into account the extraction process. The numerical values of the coefficients D_T and a_c they relate to the assessment of the effect of superposition effects (thermal diffusion and diffusion thermal conductivity). The overlay effect can be neglected, since the relatively small gradients of temperatures and concentrations arising in the lupine. It is noted that the possibility of simplified differential equations is associated with small values of the Lykov criterion. Because of this, there should be little.

Keywords: lupine, cheese whey, heat flows, mass flows, thermodynamic energy

Для цитирования

Шишацкий Ю.И., Белозерцев А.С., Барбашин А.М., Никель С.А. Термодинамика неизотермической диффузии при экстрагировании из люпина подсырной сывороткой // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 3. С. 39–42. doi:10.20914/2310-1202-2019-3-39-42

For citation

Shishackij Yu.I., Belozercev A.S., Barbashin A.M., Nikel S.A. Thermodynamics of non-isothermal diffusion at the extraction from cheese whey by Lupin. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2019. vol. 81. no. 3. pp. 39–42. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2019-3-39-42

Введение

В большинстве случаев экстрагированию сопутствуют тепловые явления. Нами установлено, что интенсификация процесса достигается, в частности, применением в качестве экстрагента нагретой до 50–60 °С подсырной сыворотки. При загрузке в экстрактор люпина, измельченного в различные геометрические формы (сферу, цилиндр или неограниченную пластину), и введении подсырной сыворотки с постоянной и более высокой температурой очевидно возникновение температурного градиента. По мере прогревания тела градиент температуры уменьшается, а затем исчезает. Температурный перепад будет возникать, если, например, в аппарате непрерывного действия организован ступенчатый температурный режим. Последний должен быть технологически и энергетически целесообразен [7–11].

При заполнении жидкостью капилляров люпина твердые частицы целевых компонентов быстро растворяются. Не исключено однако, что при диффузионном извлечении компонентов некоторые из них окажутся на поверхности тела в виде твердой фазы. Тогда на поверхности растворения поглощается теплота растворения. Из изложенного следует, что при экстрагировании имеет место период температурной нестационарности. Возникновение этого периода отмечается, в частности, в работах [1] и [2].

Обсуждение

По Онзагеру выражение для периода прироста энтропии в единицу времени (возникновение энтропии) запишется так [3, 12]:

$$\frac{ds}{d} = \sum_i j_i X_i, \quad (1)$$

где s – энтропия; j – поток массы вещества; X – термодинамическая движущая сила.

С учетом изменения энтропии уравнение Гиббса имеет вид [4]:

$$T \frac{ds}{d\tau} = dU + p dV - \sum_{i=1}^n \mu dM_i, \quad (2)$$

где T – абсолютная температура; U – внутренняя энергия; M – масса вещества; p – давление; V – объем; μ – химический потенциал.

Основой уравнений (1) и (2) является второй закон термодинамики, а сами уравнения – основа для выбора потоков и термодинамических сил. Опуская некоторые преобразования, запишем:

$$T \frac{ds}{d} = \sum_i j_i X_i.$$

Таким образом, произведение скорости возникновения энтропии на абсолютную температуру равно сумме произведений потоков на соответствующие движущие силы.

В соответствии с принципами термодинамики неравновесных состояний и записанным определением термодинамические силы переноса энергии (теплоты) X_U и массы вещества X_M по Лыкову равны:

$$X_U = -\frac{1}{T} \nabla T; X_M = -T \nabla \left(\frac{\mu}{T} \right),$$

где ∇ – символ, заменяющий $grad$.

Тогда плотность потока теплоты и плотность потока вещества определяется принципом линейности Онзагера [3]:

$$j_U = -\frac{L_{11}}{T} \nabla T - L_{12} T \nabla \left(\frac{\mu}{T} \right); \quad (3)$$

$$j_M = -\frac{L_{21}}{T} \nabla T - L_{22} T \nabla \left(\frac{\mu}{T} \right). \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) следует, что обе термодинамические силы вносят вклад в образование потока теплоты и массы вещества. Поток массы вещества зависит не только от градиента потенциала μ (диффузия), но и от градиента температур (термодиффузия). Поток теплоты определяется как градиентом температуры (теплопроводность), так и градиентом химического потенциала (диффузия).

В соответствии с соотношением взаимности (принцип симметрии кинетических коэффициентов) запишем:

$$L_{12} = L_{21}.$$

А.В. Лыков записал дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса в растворах:

$$\begin{cases} \frac{dT}{d\tau} = \alpha_p \nabla^2 T + \sigma D k_1 \nabla^2 \rho_{10} \\ \frac{d\rho_{10}}{d\tau} = D \nabla^2 \rho_{10} + \sigma D \nabla^2 T \end{cases}, \quad (5)$$

где $\sigma = D_T/D$ (коэффициент Соре); D_T – коэффициент термодинамики; k_1 – коэффициент, определяющий связь между температурой, химическим потенциалом растворенного вещества и плотностью раствора; D – коэффициент диффузии.

Система уравнений (5) применительно к процессу экстрагирования имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dT}{d\tau} = a \nabla^2 T + a_C \nabla^2 C \\ \frac{dC}{d\tau} = D \nabla^2 C + D_T \nabla^2 T \end{cases},$$

где a – коэффициент температуропроводности; a_C – коэффициент, определяемый соотношением [5]:

$$a_C = \frac{D_T T}{c_p C_2} \left(\frac{\partial \mu}{\partial C} \right)_{p,T},$$

где c_p – теплоемкость раствора; C_2 – концентрация растворителя.

С численными значениями коэффициентов D_T и a_C связана оценка влияния эффектов наложения (термодиффузия и диффузионная теплопроводность). По А.В. Лыкову, в растворах D_T в 10^3 – 10^5 раз меньше D . Обработка экспериментальных данных по экстрагированию из люпина подсырной сывороткой с целью получения молочно-растительного экстракта наложением низкочастотных механических колебаний позволила получить значение коэффициента диффузии $D = 3,2 \cdot 10^{-11}$ м²/с. Эффектами наложения можно пренебречь, поскольку сравнительно малы градиенты температур и концентраций, возникающих в люпине как в капиллярно-пористом теле [6].

Тогда систему дифференциальных уравнений можно упростить:

$$\begin{cases} \frac{dT}{d\tau} = a \nabla^2 T \\ \frac{dC}{d\tau} = D(T) \nabla^2 C \end{cases} \quad (6)$$

Трудности решения системы (6) обусловлены зависимостью коэффициента диффузии от температуры $D(T)$. В [5] отмечается, что возможность дальнейшего упрощения связана с малыми значениями критерия Лыкова:

$$Lu = D/a.$$

Критерий в условиях экстрагирования имеет значения 10^{-2} ... 10^{-3} . Из этого следует, что концентрационное поле более инерционно, чем температурное, а в период температурной нестационарности составляет малую часть от всего периода экстрагирования.

Заключение

Продолжительность периода зависит: от величины разности температур системы «твердое тело-жидкость»; от поверхности контакта фаз; строения пористого тела; свойств экстрагента; интенсивности экстрагирования и др. Однако понимание термодинамической сущности температурной нестационарности весьма важно.

Литература

- 1 Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой). Л.: Химия, 1990. 384 с.
- 2 Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
- 3 Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.: Государственное энергетическое издательство, 1963. 535 с.
- 4 Попова Н.В., Потороко И.Ю. Повышение эффективности экстракции биологически активных веществ из растительного сырья методом ультразвукового воздействия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2018. Т. 6. № 1. С. 14–22. doi: 10.14529/food180102
- 5 Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование (система твердое тело-жидкость). Л.: Химия, 1974. 256 с.
- 6 Шишацкий Ю.И., Барбашин А.М., Никель С.А. Разработка математической модели экстрагирования из люпина подсырной сывороткой наложением низкочастотных механических колебаний // Вестник ВГУИТ. 2019. №1. С. 36–41.
- 7 Wirunsawanya K., Upala S., Jaruvongvanich V., Sanguankeo A. Whey Protein Supplementation Improves Body Composition and Cardiovascular Risk Factors in Overweight and Obese Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis // Journal of the American College of Nutrition. 2018. V. 37. № 1. P. 60–70.
- 8 Palanisamy M., Töpfl S., Berger R.G., Hertel C. Physico-chemical and nutritional properties of meat analogues based on Spirulina/lupin protein mixtures // European Food Research and Technology. 2019. P. 1–10.
- 9 Eibl I., von der Haar D., Jesdinszki M., Stäbler A. et al. Adhesive based on micellar lupin protein isolate exhibiting oxygen barrier properties // Journal of Applied Polymer Science. 2018. V. 135. № 25. P. 46383.
- 10 Burgos-Díaz C., Wandersleben T., Olivos M., Lichtin N. et al. Food-grade Pickering stabilizers obtained from a protein-rich lupin cultivar (AluProt-CGNA®): Chemical characterization and emulsifying properties // Food hydrocolloids, 2019. V. 87. P. 847–857.
- 11 Zhu Y., Wang Z., Zhang L. Optimization of lactic acid fermentation conditions for fermented tofu whey beverage with high-isoflavone aglycones // LWT. 2019. V. 111. P. 211–217.
- 12 Shah Z., Islam S., Ayaz H., Khan S. Radiative heat and mass transfer analysis of micropolar nanofluid flow of Casson fluid between two rotating parallel plates with effects of Hall current // Journal of Heat Transfer. 2019. V. 141. №. 2. P. 022401.

References

- 1 Romankov P.G., Frolov V.F. Mass transfer processes of chemical technology (dispersed solid phase systems). L., Khimiya, 1990. 338 p. (in Russian).
- 2 Rudobashta S.P. Mass transfer in solid phase systems. Moscow, Khimiya, 1980. 248 p. (in Russian).
- 3 Lykov A.V., Mikhailov Yu.A. Theory of heat and mass transfer. Moscow, State Energy Publishing House, 1963. 535 p. (in Russian).
- 4 Popova N.V., Potoroko I.Yu. Improving the efficiency of extraction of biologically active substances from plant materials by ultrasonic treatment. Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnologies. 2018.vol. 6. no. 1. pp. 14–22. doi: 10.14529 / food180102 (in Russian).
- 5 Axelrud G.A., Lysyansky V.M. Extraction (solid-liquid system). L., Khimiya, 1974. 256 p. (in Russian).
- 6 Shishatsky Yu.I., Barbashin A.M., Nickel S.A. Development of a mathematical model for extraction from lupine with cheese whey by applying low-frequency mechanical vibrations. Proceedings of VSUET. 2019. no. 1. pp. 36–41. (in Russian).

- 7 Wirunsawanya K., Upala S., Jaruvongvanich V., Sanguankeo A. Whey Protein Supplementation Improves Body Composition and Cardiovascular Risk Factors in Overweight and Obese Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of the American College of Nutrition*. 2018. vol. 37. no. 1. pp. 60–70.
- 8 Palanisamy M., Töpfl S., Berger R.G., Hertel C. Physico-chemical and nutritional properties of meat analogues based on Spirulina/lupin protein mixtures. *European Food Research and Technology*. 2019. pp. 1–10.
- 9 Eibl I., von der Haar D., Jesdinszki M., Stäbler A. et al. Adhesive based on micellar lupin protein isolate exhibiting oxygen barrier properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2018. vol. 135. no. 25. pp. 46383.
- 10 Burgos-Díaz C., Wandersleben T., Olivos M., Lichtin N. et al. Food-grade Pickering stabilizers obtained from a protein-rich lupin cultivar (AluProt-CGNA®): Chemical characterization and emulsifying properties. *Food hydrocolloids*, 2019. vol. 87. pp. 847–857.
- 11 Zhu Y., Wang Z., Zhang L. Optimization of lactic acid fermentation conditions for fermented tofu whey beverage with high-isoflavone aglycones. *LWT*. 2019. vol. 111. pp. 211–217.
- 12 Shah Z., Islam S., Ayaz H., Khan S. Radiative heat and mass transfer analysis of micropolar nanofluid flow of Casson fluid between two rotating parallel plates with effects of Hall current. *Journal of Heat Transfer*. 2019. vol. 141. no. 2. pp. 022401

Сведения об авторах

Юлиан И. Шишаккий д.т.н., профессор, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Александр С. Белозерцев к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alex_bel77@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7391-0254>

Алексей М. Барбашин к.т.н., кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aleksej-barbashin@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0995-3396>

Сергей А. Никель к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sergei.nickel@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9043-9452>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Yulian I. Shishackij Dr. Sci. (Engin.), professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Aleksandr S. Belozercev Cand. Sci. (Engin.), professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alex_bel77@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7391-0254>

Alexey M. Barbashin Cand. Sci. (Engin.), physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, aleksej-barbashin@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0995-3396>

Sergey A. Nikel Cand. Sci. (Engin.), physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sergei.nickel@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9043-9452>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/08/2019	После редакции 20/08/2019	Принята в печать 29/08/2019
Received 12/08/2019	Accepted in revised 20/08/2019	Accepted 29/08/2019