

## ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ПОЛЯ ВЫСОКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ

В. Т. Казуб<sup>1</sup>, А. Г. Кошкарлова<sup>1</sup>, С. П. Рудобашта<sup>2</sup>

*Кафедра физики и математики, Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава РФ», г. Пятигорск, Россия (1); bukva46@mail.ru; кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева»; г. Москва, Россия*

**Ключевые слова:** импульсное электрическое поле; массоотдача; софора японская; экстрагирование.

**Аннотация:** Теоретически и экспериментально исследована кинетика процесса экстрагирования биологически активных соединений – флавоноидов из листьев софоры японской с применением импульсного электрического поля высокой напряженности. Выявлены два периода процесса экстрагирования (с постоянной и падающей скоростью экстрагирования). Точку, разграничивающую два периода, обозначили как критическую. Получены необходимые для анализа и расчета кинетики экстрагирования с использованием уравнения массоотдачи значения равновесных концентраций во взаимодействующих фазах.

---

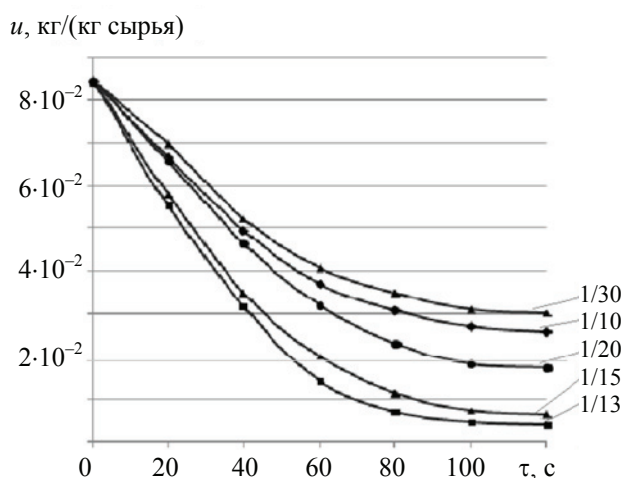
Одной из основных задач, решаемых при проектировании экстракционных аппаратов, является определение продолжительности процесса, обеспечивающего снижение концентрации извлекаемых веществ в твердой фазе от начального значения до конечного, заданного по условию, и, соответственно, получение экстракта нужной концентрации. Продолжительность экстрагирования при периодическом процессе определяет рабочий объем аппарата и количество аппаратов или рабочий объем экстрактора, соответствующего производительности технологической линии при непрерывном процессе [1].

В работе проведены исследования концентрации биологически активных компонентов, оставшихся в твердой фазе после обработки, в зависимости от времени воздействия электрического поля при различном соотношении твердой и жидкой фаз  $G/L$  (табл. 1, рис. 1).

Концентрация флавоноидов твердой фазы в начале процесса изменяется линейно – примерно до значения  $\bar{u}_{кр} \approx 5 \cdot 10^{-2}$  кг/(кг сырья), а затем начинается замедление процесса и концентрация  $\bar{u}$  приближается к равновесному значению  $u_p$  (см. рис. 1). По аналогии с процессом сушки, при которой также наблюдается линейный и нелинейный участки на кинетических кривых, – соответственно первый и второй периоды сушки [2], точку, разграничивающую данные периоды, будем называть *критической*, ей соответствует критическая массовая доля

## Кинетика извлечения флавоноидов из шрота листьев софоры

t, с	Соотношение фаз G/L							
	1/10		1/13		1/15		1/20	
	Масса, кг ( $\times 10^{-3}$ )	Концентрация, кг/(кг сырья) ( $\times 10^{-2}$ )	Масса, кг ( $\times 10^{-3}$ )	Концентрация, кг/(кг сырья) ( $\times 10^{-2}$ )	Масса, кг ( $\times 10^{-3}$ )	Концентрация, кг/(кг сырья) ( $\times 10^{-2}$ )	Масса, кг ( $\times 10^{-3}$ )	Концентрация, кг/(кг сырья) ( $\times 10^{-2}$ )
0	1,687	8,435	1,687	8,435	1,687	8,435	1,687	8,435
20	1,336	6,680	1,102	5,510	1,161	5,805	1,317	6,585
40	0,985	4,925	0,634	3,170	0,693	3,465	0,927	4,635
60	0,693	3,465	0,283	1,415	0,400	2,000	0,663	3,315
80	0,634	3,170	0,137	0,685	0,225	1,125	0,488	2,440
100	0,567	2,835	0,108	0,540	0,166	0,830	0,400	2,000
120	0,517	2,585	0,078	0,392	0,108	0,538	0,342	1,708



**Рис. 1.** Изменение концентрации флавоноидов в твердой фазе от времени воздействия электрического поля при различном соотношении фаз  $G/L$  (амплитуда импульса напряжения  $U = 25$  кВ; частота 5 имп./с; длительность импульса 0,2 мкс)

распределяемого вещества в твердой фазе. В данном случае  $\bar{u}_{кр} \approx 5 \cdot 10^{-2}$  кг/(кг сырья). Линейный и нелинейный участки на кривых кинетики экстрагирования (см. рис. 1) будем называть *первым* и *вторым периодами экстрагирования* (или периодами постоянной и падающей скорости экстрагирования) аналогично теории сушки [1].

Линейный характер функции  $\bar{u} = f(\tau)$  (см. рис. 1) объясняется следующим. В начале процесса (при  $\bar{u} > \bar{u}_{кр}$ ) в порах твердой фазы извлекаемые вещества

присутствуют как в твердой, так и жидкой фазе, и внутрипоровый раствор является насыщенным. Поэтому у поверхности раздела фаз поддерживается постоянная концентрация распределяемых веществ, равная концентрации насыщенного раствора  $u_{\text{п}} = u_{\text{нас}} \approx 5 \cdot 10^{-2}$  кг/(кг сырья). Постоянство концентрации извлекаемых веществ во внутрипоровой жидкости и соответственно у поверхности раздела фаз обеспечивается растворением твердофазных извлекаемых веществ во внутрипоровой жидкости в ходе процесса. К моменту времени  $\tau = \tau_{\text{кр}}$ , соответствующему значению  $\bar{u} = \bar{u}_{\text{кр}}$ , извлекаемые вещества, находившиеся в порах тела в твердом состоянии, полностью исчезают, и концентрация извлекаемых веществ во внешней фазе у поверхности раздела фаз начинает понижаться, что приводит к снижению скорости процесса, то есть начинается второй период экстрагирования.

Запишем уравнение массоотдачи для процесса экстрагирования

$$i = \beta_c (C_{\text{сп}} - C_c), \quad (1)$$

где  $i$  – удельный поток извлекаемых веществ, кг/(м<sup>2</sup>с);  $\beta_c$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $C_{\text{сп}}, C_c$  – концентрации извлекаемых веществ в экстрагенте соответственно у поверхности раздела фаз и в его ядре, кг/м<sup>3</sup>.

В первом периоде экстрагирования, как отмечено выше  $C_{\text{сп}} = C_{\text{нас}} = \text{const}$ , и поэтому  $i = \text{const}$  – наблюдается период постоянной скорости экстрагирования. При  $\bar{u} < \bar{u}_{\text{кр}}$  концентрация  $C_{\text{сп}} < C_{\text{нас}}$  и в ходе процесса непрерывно понижается, в результате происходит замедление процесса.

Для анализа и расчета кинетики экстрагирования большое значение имеет знание равновесных концентраций во взаимодействующих фазах. В процессе электроимпульсного экстрагирования в замкнутом объеме, при котором количество твердой и жидкой фаз в аппарате в ходе процесса не изменяется, каждому моменту времени соответствуют свои равновесные концентрации, определяющие движущую силу процесса, которая по твердой фазе представляет собой разность концентраций  $(\bar{u} - u_{\text{кр}})$ , где  $\bar{u}$  – средняя по объему твердого тела массовая доля извлекаемого вещества.

Равновесные концентрации  $x_{\text{р}}$  найдены из кривых кинетики по жидкой фазе [3] как асимптотические значения  $x_{\text{р}} = \lim x |_{\tau \rightarrow \infty}$ . Затем для каждой из найденных величин  $x_{\text{р}}$  из уравнения материального баланса

$$G(\bar{u}_{\text{н}} - u_{\text{р}}) = L(x_{\text{р}} - x_{\text{н}}) \quad (2)$$

вычислены соответствующие им равновесные концентрации

$$u_{\text{р}} = \bar{u}_{\text{н}} - \frac{L}{G}(x_{\text{р}} - x_{\text{н}}), \quad (3)$$

где  $G, L$  – масса твердой и жидкой фазы в аппарате соответственно, кг;  $x_{\text{н}}, \bar{u}_{\text{н}}$  – начальные концентрации, кг/(кг фазы), причем  $x_{\text{н}} = 0$ .

Аналогично для концентрации  $x_{\text{р}}$  из уравнения (2) получаем

$$x_{\text{р}} = x_{\text{н}} + \frac{G}{L}(\bar{u}_{\text{н}} - u_{\text{р}}). \quad (4)$$

Поскольку при нахождении асимптотических величин  $x_{\text{р}} = \lim x |_{\tau \rightarrow \infty}$  возможна определенная погрешность, то для повышения точности определения зна-

чений  $x_p$  в каждом из опытов следили за тем, чтобы выполнялось условие: чем больше отношение  $L/G$ , тем меньше при прочих равных условиях (одна и та же загрузка в аппарат твердой фазы  $G$  и одна и та же концентрация в ней извлекаемых веществ) должна быть величина  $x_p$ .

Полученные таким образом равновесные концентрации  $x_p$  и  $u_p$  приведены в табл. 2 в соответствии со значениями  $L/G$  в опытах.

При кинетическом расчете процесса экстрагирования с использованием уравнения массоотдачи обычно оперируют объемной концентрацией распределяемого вещества во внешней фазе  $C_c$ . В связи с этим пересчитаем равновесную концентрацию  $x_p$  в соответствующую ей равновесную концентрацию  $C_{c p}$ , кг/м<sup>3</sup>, используя соотношение [4]

$$C_{c p} = \rho_3 x_p,$$

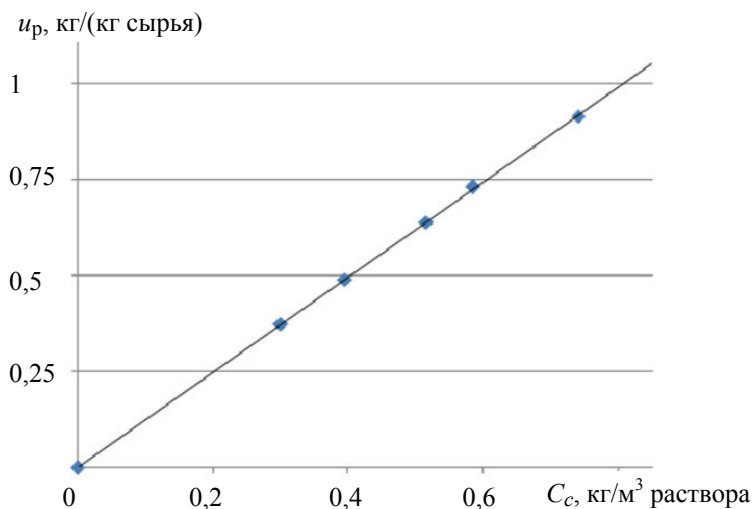
где  $\rho_3$  – плотность экстрагента, (кг экстрагента)/м<sup>3</sup>.

Температура экстракта при электроимпульсном экстрагировании в ходе процесса повышается. В нашем случае она изменялась от 18 до ~ 60 °С. Примем среднюю температуру экстракта в аппарате равной 40 °С, пренебрежем содержанием извлеченного вещества в нем и, исходя из этого, примем плотность экстракта, равную плотности воды при температуре 40 °С  $\rho_3 = 988$  кг/м<sup>3</sup> [5]. Найденные значения  $C_{c p}$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения равновесных концентраций**  
(амплитуда импульса напряжения  $U = 25$  кВ; частота 5 имп./с;  
длительность импульса 0,2 мкс)

$L/G$	10	13	15	20	26
$x_p$ , кг/(кг экстрагента) ( $\times 10^{-2}$ )	0,750	0,592	0,520	0,397	0,310
$C_{c p}$ , кг/м <sup>3</sup>	0,741	0,585	0,514	0,392	0,306
$u_p$ , кг/(кг сырья) ( $\times 10^{-3}$ )	0,935	0,740	0,635	0,495	0,375



**Рис. 2. Равновесная зависимость  $u_p = f(C_c)$**

(амплитуда импульса напряжения  $U = 25$  кВ; частота 5 имп./с; длительность импульса 0,2 мкс)

На рис. 2 показана равновесная зависимость  $u_p = f(C_c)$ , построенная по данным табл. 2. Очевидно, что она имеет линейный характер и для удобства расчетов аппроксимирована уравнением

$$u_p = A_p(C_c) = 1,26 \cdot 10^{-3} C_c, \quad (5)$$

где  $A_p = 1,26 \cdot 10^{-3}$  (кг/(кг сырья))/((кг/кг экстракта)(кг экстракта/м<sup>3</sup>)).

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для расчета кинетики экстрагирования биологически активных соединений под воздействием импульсного электрического поля высокой напряженности.

#### *Список литературы*

1. Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: учеб. для вузов / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 3-е изд. – М.: Химия, 1987. – 496 с.

2. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

3. Рудобашта, С.П. Исследование кинетики экстрагирования сырья под воздействием импульсного поля высокой напряженности / С.П. Рудобашта, В. Т. Казуб, А. Г. Кошкарлова // Вестник МГАУ им. В. П. Горячкина. – 2017. – № 5(75). – С. 49 – 56.

4. Рудобашта, С.П. Теплотехника / С. П. Рудобашта. – 2-е изд., доп. – М.: Перо, 2015. – 672 с.

5. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / Под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – 2-е изд., перер. Кн. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.

---

### **Features of the Kinetics of the Extraction Process under the Impulse Field of High Voltage**

**V. T. Kazub<sup>1</sup>, A. G. Koshkarova<sup>1</sup>, S. P. Rudobashta<sup>2</sup>**

*Department of Physics and Mathematics, Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute – Branch of Volgograd State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Pyatigorsk (1); bukva46@mail.ru;*

*Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises, Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy (2); Moscow; Russia*

**Keywords:** extraction; pulsed electric field; Japanese Sophora; mass transfer.

**Abstract:** The kinetics of the extraction of biologically active compounds (BACs) – flavonoids from Japanese Sophora leaves with the use of a pulsed electric field of high voltage was theoretically and experimentally studied. Two periods of the extraction process were identified (with a constant and decreasing extraction rate). The point delimiting the two periods was designated as critical. The values of equilibrium concentrations in the interacting phases, which are necessary for analysis and calculation of the extraction kinetics using the mass transfer equation, were obtained.

## References

1. Planovskii A.N., Nikolaev P.I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi i neftekhimicheskoi tekhnologii* [Processes and apparatuses of chemical and petrochemical technology], Moscow: Khimiya, 1987, 496 p. (In Russ.)
2. Lykov A.V. *Teoriya sushki* [Theory of drying], Moscow: Energiya, 1968, 472 p. (In Russ.)
3. Rudobashta S.P., Kazub V.T., Koshkarova A.G. [Investigation of the kinetics of extraction of raw materials under the influence of a high-intensity pulsed field], *Vestnik MGAU im. V. P. Goryachkina* [Vestnik of the Moscow State Agro engineering University of the V.P. Goryachkin], 2017, no. 5(75), pp. 49-56. (In Russ.)
4. Rudobashta S.P. *Teplotekhnika* [Heat engineering], Moscow: Pero, 2015, 672 p. (In Russ.)
5. Grigor'ev V.A., Zorin V.M. (Eds.) *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki. Teplo-tekhnicheskii eksperiment* [Theoretical foundations of heat engineering. Thermotechnical experiment], Book 2. Moscow: Energoatomizdat, 1988, 560 p. (In Russ.)

---

### Besonderheiten der Kinetik des Extraktionsprozesses unter dem Einfluss des Impulsfeldes der hohen Spannung

**Zusammenfassung:** Es ist die Kinetik des Prozesses der Extraktion von biologisch aktiven Verbindungen (BAV) theoretisch und experimentell untersucht – der Flavonoide aus den Blättern der japanischen Sophora mit der Verwendung des Impulsfeldes der hohen Spannung. Zwei Perioden des Extraktionsprozesses (mit konstanter und abnehmender Extraktionsrate) wurden identifiziert. Der Punkt, der die beiden Perioden abgrenzt, wurde als kritisch bezeichnet. Es sind die Werte der Gleichgewichtskonzentrationen in den wechselwirkenden Phasen erhalten, die für die Analyse und Berechnung der Kinetik der Extraktion unter Verwendung der Stoffübergangsgleichung notwendig sind.

---

### Caractéristiques de la cinétique du processus de l'extraction sous l'influence du champ d'impulsions à haute tension

**Résumé:** Théoriquement et expérimentalement est étudiée la cinétique du processus de l'extraction des composés biologiquement actifs (CBA) – flavonoïdes des feuilles de Sophora japonais avec l'utilisation d'un champ d'impulsion électrique à haute tension. Sont identifiées deux périodes du processus de l'extraction (avec la vitesse d'extraction constante et celle descendante). Le point, délimitant les deux périodes, a été désigné comme critique. Sont obtenues les valeurs des concentration d'équilibre dans les phases d'interaction nécessaires pour l'analyse et pour le calcul de la cinétique de l'extraction avec l'utilisant de l'équation du transfert de la masse.

---

**Авторы:** *Казуб Валерий Тимофеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и математики; *Кошкарлова Анна Геннадьевна* – преподаватель кафедры физики и математики, Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава РФ», г. Пятигорск, Россия; *Рудобашта Станислав Павлович* – доктор технических наук, профессор кафедры тепло-техники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева», г. Москва, Россия.

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.