

**КИНЕТИКА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ
ГУМИНОВЫХ И ФУЛЬВОКИСЛОТ
В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ**

М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
promtov@tambov.ru*

Ключевые слова: гуминовые кислоты; коэффициент диффузии; роторный импульсный аппарат; фульвокислоты; экстрагирование.

Аннотация: Исследована кинетика экстрагирования гуминовых кислот и фульвокислот из торфа и биогумуса в роторном импульсном аппарате. Представлены данные экспериментальных исследований по выходу гуминовых кислот и фульвокислот из торфа и биогумуса под влиянием гидродинамического многофакторного импульсного воздействия в роторном импульсном аппарате. Определены коэффициенты диффузии и эмпирические коэффициенты в уравнениях кинетических закономерностей процесса экстрагирования. Установлен экспоненциальный характер кинетических закономерностей выхода гуминовых кислот и фульвокислот от кратности обработки суспензий и соотношения твердой и жидкой фаз. Расчетные значения концентраций гуминовых кислот и фульвокислот в водном растворе совпадают с экспериментальными значениями с погрешностью, не превышающей 15 %.

Обозначения

A – параметр, определяющий форму частицы;	V – средняя скорость потока жидкости в канале статора РИА, м/с;
B – коэффициент;	C_0 – концентрация извлекаемого вещества в порах твердого тела, заполненных жидкой фазой, кг/м ³ ;
b – отношение суммарного объема твердых частиц к объему жидкой фазы;	C_1 – концентрация извлекаемых веществ в растворе в произвольный момент времени, кг/м ³ ;
Bi – критерий Био, $Bi = \frac{\beta R}{D}$;	C_n, C_p – начальная и равновесная концентрации извлекаемого вещества в растворе соответственно, кг/м ³ ;
D – коэффициент диффузии, м ² /с;	α – угол наклона прямой к оси ординат;
d – средний диаметр исходных частиц в потоке жидкости, м;	β – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с;
Fo – диффузионный критерий Фурье, $Fo = \frac{D\tau}{R^2}$;	μ – вязкость суспензии, Па·с;
G – количество массовых единиц твердой фазы, кг;	μ_1 – коэффициент характеристического уравнения;
i – число циклов обработки суспензии в РИА;	ρ – плотность суспензии, кг/м ³ ;
k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты;	τ – время экстрагирования, с.
L – количество объемных единиц жидкости, м ³ ;	
R – радиус частицы, м;	
Re – критерий Рейнольдса, $Re = \frac{Vd\rho}{\mu}$;	

Введение

Гуминовые кислоты (ГК) и фульвокислоты (ФК) применяются в качестве стимуляторов роста растений, лекарственных препаратов, красящих и антикоррозионных веществ [1, 2]. Гуминовые и фульвокислоты получают путем экстрагирования в системе «твердое тело – жидкость» из различного гуматсодержащего сырья (торфа, биогумуса, сапропеля и бурого угля). Традиционно экстрагирование ГК и ФК осуществляют в емкостном оборудовании с мешалками. Для увеличения выхода ГК суспензию нагревают, добавляют щелочь и другие химические реагенты. При щелочном экстрагировании в раствор переходят, в основном, соли ГК и водорастворимая форма ГК в небольшом количестве. Для интенсификации процесса экстрагирования водорастворимых ГК и ФК, на суспензию гуматсодержащего сырья воздействуют гидродинамическими пульсациями и акустическими волнами, электрическим полем, электрическими разрядами. К эффективному оборудованию, позволяющему увеличить выход водорастворимых ГК и ФК, относятся роторные импульсные аппараты (РИА). Обработка суспензий в РИА осуществляется за счет импульсного многофакторного воздействия: вихреобразования, пульсаций давления, интенсивной кавитации, ударных волн и нелинейных гидроакустических эффектов, которые способствуют увеличению поверхности фазового контакта, увеличению относительных скоростей движения фаз и уменьшению величины диффузионного слоя. Общий подход в описании кинетики экстрагирования в системе «твердое тело – жидкость» представлен в работах [3 – 7].

Теоретическая часть

Цель исследований – определение коэффициентов диффузии и эмпирических коэффициентов в уравнениях кинетических закономерностей процесса экстрагирования ГК и ФК при обработке суспензий торфа и биогумуса в РИА.

Для расчета кинетических закономерностей процесса экстрагирования ГК и ФК в РИА, принимаем следующие допущения:

1) постоянство кинетических коэффициентов на протяжении всего процесса экстрагирования;

2) физическое и гидродинамическое воздействие РИА одинаково для всех частиц суспензии;

3) концентрация ГК и ФК в экстрагенте в зависимости от времени обработки суспензии изменяется по экспоненциальному закону;

4) процесс экстрагирования проводится достаточно длительное время, устанавливается равновесие. Равновесная концентрация извлекаемого вещества в растворе, заполняющем поры твердого тела, такая же как и в основном растворе;

5) процесс экстрагирования периодический, до достижения концентрации насыщения в растворе;

6) форма частиц твердой фазы сферическая;

7) концентрация C_0 является равновесной концентрацией вещества в твердой фазе;

8) критерий $Bi \rightarrow \infty$, кинетический режим экстрагирования внутридиффузионный, массоперенос лимитируется внутренней диффузией извлекаемого вещества.

Уравнение кинетики для процесса экстрагирования целевого вещества из твердой частицы записывается в виде [5 – 7]

$$\frac{C_p - C_l}{C_0 - C_n} = B e^{-\mu_1^2 Fo} \quad (1)$$

Для расчета кинетики экстрагирования уравнение (1) может быть представлено в линейном виде путем логарифмирования [5]:

$$\ln \frac{C_p - C_1}{C_0 - C_n} = \ln B - \mu_1^2 \frac{D\tau}{R^2}; \quad (2)$$

$$B = bA; \quad b = \frac{C_0 - C_n}{C_0 - C_p} = -1. \quad (3)$$

Коэффициент μ_1 определяется с учетом параметра A , учитывающего форму частиц [5, 6], по уравнению:

$$6b \left(\frac{1}{B} - 1 \right) + \frac{1}{4} = \left(\frac{\mu_1^2}{-1 + \mu_1 \operatorname{ctg} \mu_1} + 0,5 \right)^2 + \mu_1^2. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) численными методами позволяет определить коэффициент диффузии D и диффузионный критерий Фурье Fo [5]

$$D = \frac{R^2 \operatorname{tg} \alpha}{\mu_1^2}. \quad (5)$$

Значения коэффициента диффузии и диффузионного критерия Фурье позволяют определить расчетную концентрацию C_1 целевых веществ в экстрагенте в произвольный момент времени по уравнению (1).

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования по изучению кинетики экстрагирования ГК и ФК проводились с суспензиями «торф–вода» и «биогукус–вода» при многократной обработке в РИА. В качестве экстрагента использовалась вода по ГОСТ Р 51232–98. Плотность и вязкость суспензий «торф–вода» и «биогукус–вода» определялись опытным путем с помощью весов НЛ-100, мерного цилиндра и вискозиметра ВЗ-4 по методике, описанной в ГОСТ 8420–74. Значения параметров суспензии ρ и μ в зависимости от соотношений жидкой L и твердой G фаз показаны в табл. 1.

Методика проведения эксперимента. Сухое гуматсодержащее сырье просеивали, твердую фазу с размерами частиц до 2 мм предварительно смешивали в определенном соотношении объемных единиц жидкости L и массовых единиц твердой фазы G $L/G = 4; 5; 10; 15$. Затем суспензию загружали в емкость исходной суспензии 3 установки на базе РИА (рис. 1). Из емкости исходной суспензии 3 грубодисперсная суспензия насосом 2 подавалась в РИА 1, в котором осуществлялась механическая, гидродинамическая, и кавитационная обработка суспензии. Для повышения эффективности процесса экстрагирования проводилась многократная циклическая обработка в РИА, суспензия проходила многократно по замкнутому контуру установки. Отбор проб проводился из патрубка 4 после 10, 20, 30 и 40 проходов суспензии

Таблица 1

Плотность и вязкость суспензий торфа и биогукуса

L/G	Суспензии			
	торфа		биогукуса	
	ρ	$\mu \cdot 10^3$	ρ	$\mu \cdot 10^3$
4	1100	1,17	1150	1,23
5	1080	1,16	1130	1,22
10	1050	1,14	1100	1,20
15	1030	1,12	1080	1,18

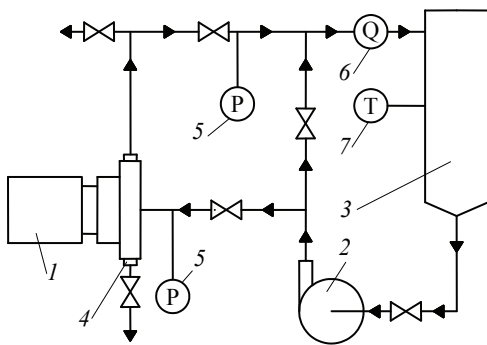


Рис. 1. Схема установки на базе РИА для экстрагирования ГК и ФК:

- 1 – роторный импульсный аппарат;
 2 – насос; 3 – емкость исходной суспензии;
 4 – патрубок отбора проб; 5 – манометр;
 6 – расходомер; 7 – термометр

через РИА. Число циклов обработки определялось временем обработки и расходом суспензии в установке. Концентрация ГК и ФК в образцах суспензий определялась по стандартным методикам [8, 9].

Обсуждение полученных результатов

На основе расчета числа Рейнольдса для частиц суспензии сделан вывод о турбулентном режиме движения жидкости относительно частиц суспензии при ее прохождении через каналы РИА ($Re > 4500$), что подтверждает допущение по критерию $Vi \rightarrow \infty$. Средняя скорость потока жидкости в канале РИА определялась

на основе решения нестационарного уравнения Бернулли [10], $V = 6$ м/с. Средний размер частиц исходной суспензии равен 1,3 мм.

В соответствии с полученными экспериментальными данными построены графические зависимости $\ln \frac{C_p - C_1}{C_0 - C_n}$ от времени экстрагирования τ , которые

представлены на рис. 2, где время одного цикла $i = (1,6 \pm 0,05)$ с. Экстраполируя полученные графики до вертикальной оси, определяли значения переменной B и значения тангенса угла наклона прямой α для каждого значения L/G , и затем определяли величину b по уравнению (3).

На основе полученных экспериментальных данных, решая уравнение (4) численным методом Ньютона, определяли значения коэффициента μ_1 . По уравне-

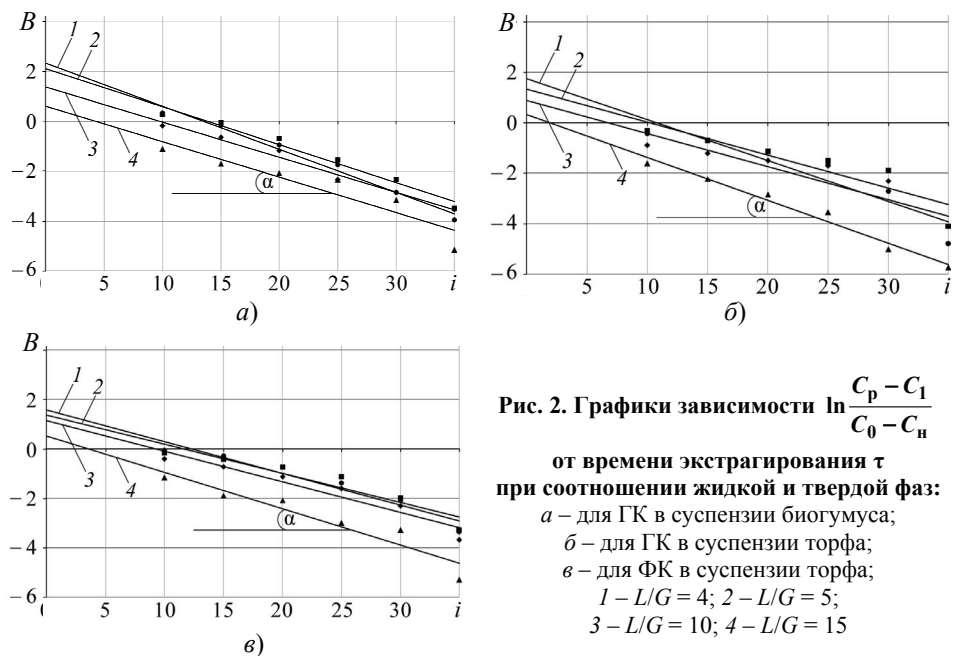


Рис. 2. Графики зависимости $\ln \frac{C_p - C_1}{C_0 - C_n}$

- от времени экстрагирования τ при соотношении жидкой и твердой фаз:**
 а – для ГК в суспензии биогумуса;
 б – для ГК в суспензии торфа;
 в – для ФК в суспензии торфа;
 1 – $L/G = 4$; 2 – $L/G = 5$;
 3 – $L/G = 10$; 4 – $L/G = 15$

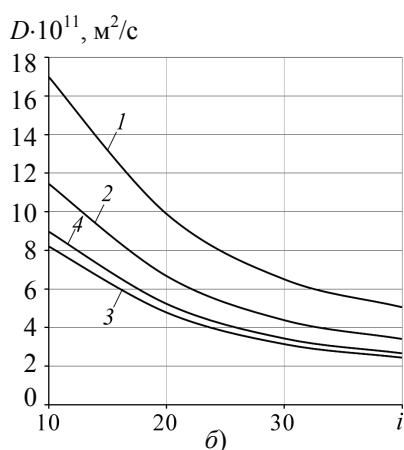
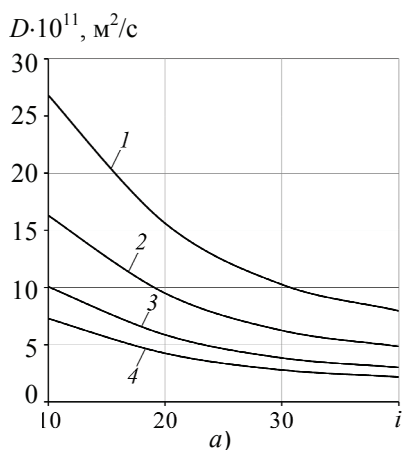
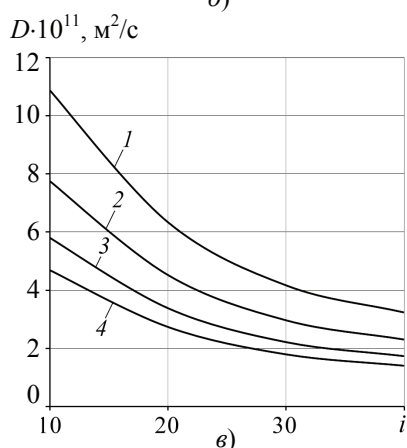


Рис. 3. Графические зависимости коэффициента диффузии от числа циклов обработки в РИА:
а – для ГК в суспензии биогуруса;
б – для ГК в суспензии торфа;
в – для ФК в суспензии торфа;
 1 – $L/G = 4$; 2 – $L/G = 5$;
 3 – $L/G = 10$; 4 – $L/G = 15$



нию (5) определяли коэффициенты диффузии D для ГК и ФК. Графики изменения коэффициентов диффузии от количества циклов обработки в установке на базе РИА и от соотношения L/G представлены на рис. 3 и 4.

При 10 циклах обработки суспензии в РИА и большой концентрации твердой фазы в воде коэффициент диффузии имел наибольшие значения. Это связано

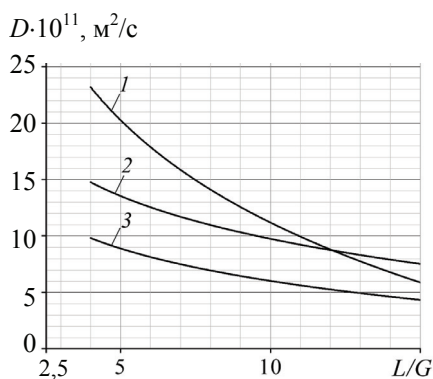


Рис. 4. Графические зависимости коэффициента диффузии от соотношений жидкой и твердой фаз при числе циклов обработки $i = 10$:
 1 – 3 – суспензии биогуруса и ГК, торфа и ГК, торфа и ФК соответственно

с тем, что в начале процесса экстрагирования разность концентраций в растворе и твердых частицах наибольшая, частицы быстро измельчаются, и в них открываются поры. Экстрагируемые вещества, находящиеся на поверхности частицы и в близких к поверхности порах, легко переходят в экстрагент. Полученные данные согласуются с закономерностями диффузионных процессов экстрагирования из твердых частиц в жидкость [11, 12].

Диффузионный критерий Фурье Fo определяли с учетом изменения среднего размера частиц торфа и биогуруса от числа циклов обработки в РИА. Размеры частиц торфа и биогуруса определяли с использованием лазерного анализатора частиц «Микро-

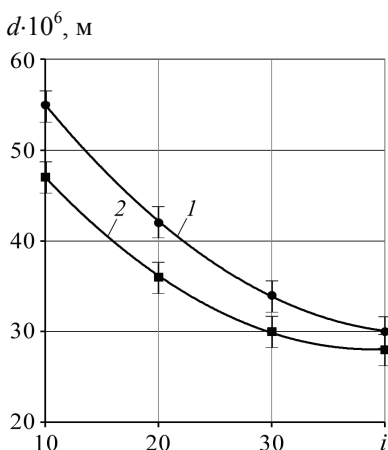


Рис. 5. Графики зависимостей среднего размера частиц биогумуса и торфа от числа циклов обработки суспензии в РИА:
1 – биогумус; 2 – торф

сайзер-201С». Графики зависимостей среднего диаметра частиц при увеличении числа циклов обработки суспензии в РИА показаны на рис. 5.

Запишем уравнение кинетики процесса экстрагирования (1) ГК и ФК из торфа и биогумуса в виде

$$\frac{C_p - C_1}{C_0 - C_n} = k_1 e^{-k_2 F_0}, \quad (6)$$

где k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты для экстрагирования ГК и ФК из суспензий «торф–вода» и «биогумус–вода» показаны в табл. 2.

Расчетные кинетические кривые и экспериментальные данные по концентрации ГК и ФК в водном растворе показаны на рис. 6. Расчетные данные совпадают с экспериментальными данными с погрешностью не более 15 %.

Таблица 2

Численные значения эмпирических коэффициентов

L/G	Суспензии					
	биогумуса и ГК		торфа и ГК		торфа и ФК	
	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2
4	2,33	0,18	1,75	0,23	1,56	0,35
5	2,11	0,25	1,33	0,29	1,36	0,46
10	1,36	0,38	0,88	0,41	1,14	0,64
15	0,60	0,53	0,32	0,48	0,52	0,94

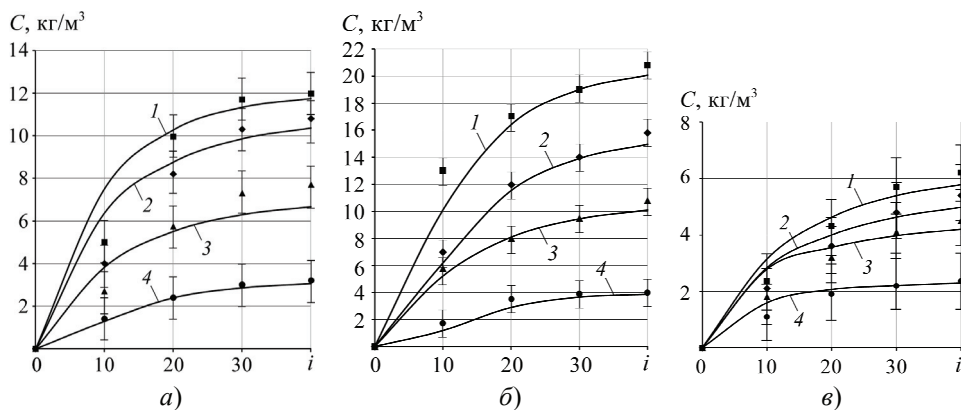


Рис. 6. Графики кинетических закономерностей процесса экстрагирования ГК и ФК в РИА:

a – для ГК в суспензии биогумуса;
б – для ГК в суспензии торфа; в – для ФК в суспензии торфа;
точки – экспериментальные данные, кривые – расчетные зависимости;
1 – L/G = 4; 2 – L/G = 5; 3 – L/G = 10; 4 – L/G = 15

Выводы

Представленные данные экспериментальных исследований по экстрагированию ГК и ФК в суспензиях «торф–вода» и «биогумус–вода» при обработке в РИА показывают экспоненциальный характер кинетических закономерностей выхода ГК и ФК от кратности обработки суспензий и соотношения твердой и жидкой фаз L/G . Коэффициенты диффузии ГК и ФК имеют наибольшую величину в начале процесса экстрагирования и затем снижаются по обратно-экспоненциальной зависимости при увеличении времени (числа циклов) обработки суспензии. Коэффициенты диффузии ГК и ФК имеют наибольшую величину для малых значений соотношения твердой и жидкой фаз L/G . Это объясняется тем, что в первые циклы обработки суспензии в РИА разность концентраций в растворе и в твердых частицах наибольшая, при большой концентрации частиц они быстро измельчаются, и в них открываются поры. В силу этого экстрагируемые вещества, находящиеся на поверхности частицы и в близких к поверхности порах, быстро и при меньшем сопротивлении переходят в экстрагент в начальной стадии процесса и при большой концентрации твердых частиц в экстрагенте. Определены эмпирические коэффициенты в кинетических зависимостях, описывающие процесс экстрагирования ГК и ФК из торфа и биогумуса. Расчетные значения концентраций ГК и ФК в водном растворе совпадают с экспериментальными значениями с погрешностью, не превышающей 15 %.

Список литературы

1. Effects of Humic Acids from Vermicomposts on Plant Growth / N. Q. Arancon [et al.] // *European Journal of Soil Biology*. – 2006. – Vol. 42, Supplement 1. – P. 65 – 69.
2. Tan, Kim H. Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies / Kim H. Tan. – USA : CRC Press, 2014. – 371 p.
3. Mass-Transfer Model for Humic Acid Removal by Ultrafiltration / I. Galambos [et al.] // *Environment Protection Engineering*. – 2005. – Vol. 5, No. 3-4. – P. 145 – 152.
4. Тепляков, Ю. А. Кинетический расчет процесса экстрагирования для непористых гранулированных материалов / Ю. А. Тепляков [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2009. – Т. 15, № 2. – С. 330 – 336.
5. Аксельруд, Г. А. Экстрагирование «система твердое тело – жидкость» / Г. А. Аксельруд, В. М. Лысянский. – Л. : Химия, 1974. – 256 с.
6. Коптелова, Е. Н. Исследование кинетики массопереноса в процессе экстрагирования бересты / Е. Н. Коптелова, Н. А. Кутакова, С. И. Третьяков // *Изв. вузов. Лесной журнал*. – 2013. – № 4. – С. 119 – 128.
7. Исследование скорости экстрагирования компонентов из древесного сырья / И. В. Новикова [и др.] // *Вестн. Воронеж. гос. университета инженер. технологий*. – 2012. – № 3. – С. 99 – 103.
8. Практикум по агрохимии / под ред. В. Г. Минеева. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2001. – 689 с.
9. ГОСТ 9517–94 (ИСО 5073–85). Топливо твердое. Методы определения выхода гуминовых кислот. – Взамен ГОСТ 9517–76 ; введ. 1997–01–01. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; М. : Изд-во стандартов, 1996. – 12 с.
10. Промтов, М. А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата : монография / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 148 с.
11. Шишацкий, Ю. И. Определение коэффициента диффузии экстрактивных веществ в сырье растительного происхождения при экстрагировании диоксидом углерода / Ю. И. Шишацкий, С. Ю. Плюха // *Вопр. соврем. науки и практики*. Университет им. В. И. Вернадского. – 2011. – № 4 (35). – С. 95 – 101.
12. Красноселова, Е. А. Основные кинетические характеристики процесса экстрагирования пектиновых веществ из яблочных выжимок / Е. А. Красноселова,

Extraction Kinetics of Humic and Fulvic Acids in the Rotor-Stator Device

M. A. Promtov, A. Yu. Stepanov, A. V. Aleshin

Department "Technological Processes, Devices and Technosphere Safety", TSTU,
Tambov, Russia; promtov@tambov.ru

Keywords: diffusion coefficient; extraction; fulvic acids; humic acids; rotor-stator device.

Abstract: The paper studies the kinetics of extraction of humic acid (HA) and fulvic acids (FA) of peat and vermicompost in rotor-stator device (RSD). The authors present the data of experimental studies on HA and FA output from peat and vermicompost under the influence of hydrodynamic effects in multivariate impulse RPA. The diffusion coefficient and the empirical coefficients in the equations of the kinetics of the extraction process are found. Defined exponential mode of kinetic law for extraction HA and FA from multiplicity processing suspensions and the ratio of the solid and liquid phases. The calculated values of the concentrations of HA and FA coincide with the experimental values with an error not exceeding 15 % in aqueous solution.

References

1. Arancon Q.N., Edwards C.A., Lee S., Byrne R. Effects of humic acids from vermicomposts on plant growth, *European Journal of Soil Biology*, 2006, vol. 42, Supplement 1, pp. 65-69.
2. Kim Tan H. *Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies*, USA: CRC Press, 2014, 371 p.
3. Galambos I., Csiszar E., Bekassy-Molnar E., Vatai G. Mass-transfer model for humic acid removal by ultrafiltration. *Environment Protection Engineering*, 2005, vol. 5, no. 3-4, pp. 145-152.
4. Teplyakov Yu.A., Rudobashta S.P., Nechaev V.M., Klimov A.M. [Kinetic Calculation of Extraction Process for Porosity-Free Granular Materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 330-336. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Aksel'rud G.A., Lysyanskii V.M. *Ekstragirovanie "sistema tverdoe telo – zhidkost"* [Extraction "system of solid – liquid"], Leningrad: Khimiya, 1974, 256 p. (In Russ.)
6. Koptelova E.N., Kutakova N.A., Tret'yakov S.I. [Study of Mass Transfer Kinetics During Birch Bark Extraction], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Lesnoy Zhurnal* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Forestry journal], 2013, no. 4, pp. 119-128. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Novikova I.V., Agafonov G.V., Kornienko T.S., Mal'tseva O.Yu. [Research extraction speed components of the wood raw material], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2012, no. 3, pp. 99-103. (In Russ.)
8. Mineev V.G. [Ed.] *Praktikum po agrokhimii* [Workshop on Agricultural Chemistry], Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2001, 689 p. (In Russ.)
9. Russian Federation Committee on Standardization, Metrology and Certification, *GOST 9517-94 (ISO 5073-85). Toplivo tverdoe. Metody opredeleniya vykhoda guminovykh kislot* [Russian Interstate Standart 9517-94 (ISO 5073-85). Solid fuel. Methods for determination of humic acids yeild], Minsk: Mezhgosudarstvennyi sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, Moscow: Izdatel'stvo standartov. (In Russ.)

10. Promtov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata* [Methods for calculating the rotary pulse unit]. Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO "TGTU", 2015, 148 p. (In Russ.)

11. Shishatsky Yu.I., Plyukha S.Yu. [Determining the Diffusion Coefficient of Extractives in Raw Materials of Vegetable Origin by Extraction of Carbon Dioxide], *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2011, no. 4 (35), pp. 95-101. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Krasnoselova E.A., Donchenko L.V. [Basic kinetic characteristics of the process of extraction of pectin from apple pomace], *Sovremennye aspekty proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaistvennoi produktsii* [Modern aspects of agricultural production and processing], Proceedings of the II scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists, Krasnodar, March 20, 2016, pp. 321-326. (In Russ.)

Kinetik der Extrahierung der Huminsäuren und der Gelbstoffe im Rotorimpulsapparat

Zusammenfassung: Es ist die Kinetik der Extrahierung der Huminsäuren (HS) und der Gelbstoffe (GS) aus dem Torf und Biogumus im Rotorimpulsapparat (RIA) untersucht. Es sind die Angaben der experimentalen Forschungen nach dem Ausgang von HS und GS aus dem Torf und Biogumus unter dem Einfluss der hydrodynamischen multifaktoriellen Impulseinwirkung im RIA angeführt. Es sind die Diffusionskoeffizienten und die empirischen Koeffizienten in den Gleichungen der kinetischen Gesetzmäßigkeiten des Prozesses der Extrahierung bestimmt. Es ist der exponentiale Charakter der kinetischen Gesetzmäßigkeiten des Ausgangs von HS und GS von der Vielfachheit der Bearbeitung der Suspensionen und von der Korrelation der festen und flüssigen Phasen bestimmt. Die Rechenbedeutungen der Konzentrationen HS und GS in der Wasserlösung stimmen mit den experimentalen Bedeutungen mit dem nicht übertretenden 15 % Fehler überein.

Cinétique d'extraction d'acides humiques et fulviques dans un appareil rotor d'impulsion

Résumé: Est étudiée la cinétique d'extraction des acides humiques (AH) et fulviques (AF) à partir de la tourbe et du vermicopost dans un appareil rotor d'impulsion (ARI). Sont présentées les données expérimentales sur la sortie de AH et de AF à partir de la tourbe et du vermicopost sous l'influence de l'action hydrodynamique multifactorielle des impulsions dans la ARI. Sont définis les coefficients de la diffusion et les coefficients empiriques dans les équations cinétiques des régularités du processus de l'extraction. Est établie la nature exponentielle des régularités cinétiques des de la sortie de AH et de AF à partir de la multiplicité de traitement de la suspension de la relation entre la phase solide et celle liquide. Les valeurs calculées des concentrations de AH et de AF dans une solution aqueuse coïncident avec les valeurs expérimentales avec une marge d'erreur ne dépassant pas 15 %.

Авторы: *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования; *Степанов Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Алешин Андрей Владимирович* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», г. Тамбов, Россия.