

УДК 66.061.34

## **КИНЕТИКА СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ЭКСТРАКЦИИ ГУМИНОВЫХ И ФУЛЬВОВЫХ КИСЛОТ ИЗ ТОРФА И БИОГУМУСА В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ**

© *М.А. Промтов\**, *А.Ю. Степанов*

*Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, 392000 (Россия), e-mail: promtov@tambov.ru, kvidep@cen.tstu.ru*

Проведены исследования процессов диспергирования частиц и экстракции гуминовых кислот (ГК) и фульвовых кислот (ФК) в суспензиях торфа и биогумуса при механической и гидродинамической обработке в роторном импульсном аппарате (РИА). Зависимости уменьшения среднеарифметического размера частиц и увеличения концентрации водорастворимых ГК и ФК в суспензиях торфа и биогумуса от количества циклов обработки в РИА имеют экспоненциальный характер. После сорокакратного прохождения суспензии через РИА среднеарифметический размер частиц в суспензиях торфа и биогумуса уменьшается от 1 мм до 30 мкм. Интенсивность массопереноса целевых веществ из твердой фазы в жидкую обусловлена увеличением площади контакта фаз, величина которой зависит не только от площади поверхности твердых частиц, но существенно растет за счет открытия новых пор и капилляров при измельчении частиц. Концентрация водорастворимых ГК в 25% суспензии торфа достигает 20 г/л, концентрация ФК – 6 г/л. Концентрация водорастворимых ФК в 25% суспензии биогумуса достигает 12 г/л. Экстрагируемые вещества, находящиеся на поверхности частицы и в близких к поверхности порах, переходят в раствор в основном при первых 10 циклах обработки. Определены эффективные коэффициенты диффузии и эмпирические коэффициенты кинетического уравнения для процесса экстракции ГК и ФК в суспензиях торфа и биогумуса при их обработке в РИА.

*Ключевые слова:* экстракция, диспергирование, роторный импульсный аппарат, гуминовые кислоты, фульвовые кислоты, торф, биогумус.

### **Введение**

Гуминовые кислоты (ГК) и фульвовые кислоты (ФК) входят в группу гумусовых кислот и имеют широкий спектр применения в различных отраслях в качестве компонентов удобрений и стимуляторов роста растений, красителей, ингибиторов коррозии, поверхностно-активных веществ, лекарственных препаратов [1, 2]. Наибольшую биологическую и химическую ценность имеет водорастворимая часть гумусовых кислот. Экстракция ГК без применения химических реагентов дает меньший выход по сравнению с методами химической экстракции, но этот недостаток компенсируется тем, что в воду переходит водорастворимая часть гумусовых кислот без химической модификации, которые более востребованы в химической, фармацевтической и других отраслях промышленности [3, 4]. Для получения водорастворимых ГК применяют интенсивное гидродинамическое воздействие, кавитацию и механодеструкцию гуматосодержащего природного сырья [5–8].

Совмещение процессов диспергирования и экстракции в одном технологическом аппарате существенно интенсифицирует выход целевого компонента, так как в процессе обработки суспензии происходит непрерыв-

---

*Промтов Максим Александрович* – декан факультета международного образования, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», доктор технических наук, e-mail: promtov@tambov.ru

*Степанов Андрей Юрьевич* – доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», кандидат технических наук, e-mail: kvidep@cen.tstu.ru

ное увеличение и обновление межфазной поверхности. В качестве эффективного оборудования для обработки суспензий и интенсификации массообменных процессов зарекомендовали себя роторные импульсные аппараты (РИА). При обработке суспензий в роторном импульсном аппарате (РИА) частицы подвергаются динамическому воздействию в

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

виде удара и сдвига, которое измельчает и изменяет структуру обрабатываемого материала, что значительно облегчает выход целевых веществ из сырья [9, 10].

Торф и биогумус относят к коллоидным капиллярно-пористым материалам [11, 12]. Капилляры различной формы и длины с переменным поперечным сечением имеют эластичные стенки. Извлекаемое вещество переносится из твердой фазы в жидкую фазу за счет внутренней диффузии по капиллярам, заполненным экстрагентом.

Для формализации кинетических зависимостей экстракции по конвективно-диффузионному или диффузионному механизмам приходят к упрощению физической модели процесса экстрагирования, рассматривая твердые частицы как изотропные тела простейшей формы (шар, пластина, цилиндр) [13–16]. Особенности проведения процесса в конкретном оборудовании при определенных технологических параметрах учитывают за счет эмпирических коэффициентов в кинетических уравнениях [17–21].

Скорость извлечения целевого вещества лимитируется скоростью протекания самой медленной стадии, которой является диффузия молекул ГК и ФК в структуре капилляров и пор в процессе экстракции ГК и ФК из коллоидных капиллярно-пористых частиц торфа и биогумуса [13–15]. Процесс реализуется по смешанному конвективно-диффузионному или диффузионному механизму и характеризуется эффективным коэффициентом диффузии.

При диффузионном массопереносе кинетическое уравнение экстракции вещества из капиллярно-пористого твердого тела в жидкую фазу записывается в следующем виде [13]:

$$\frac{C_p - C_1}{C_0 - C_n} = \frac{1}{1+b} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(v+1)}{\left(1 + \frac{1}{Bi}\right)k_2^2 - 2(v+1)\left[\frac{k_2^2}{Bi} - 2(v+1)b\right] + \left[\frac{k_2^2}{Bi} - 2(v+1)b\right]^2} \cdot e^{-k_2^2 \tau}, \quad (1)$$

где  $C_n$  – начальная концентрация извлекаемого вещества в растворе, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – равновесная концентрация извлекаемого вещества в растворе, кг/м<sup>3</sup>;  $C_0$  – начальная концентрация извлекаемого вещества в порах твердого тела, заполненных жидкой фазой, кг/м<sup>3</sup>;  $C_1$  – концентрация извлекаемых веществ в растворе в текущий момент времени, кг/м<sup>3</sup>;  $Bi$  – число Био,  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $k_2$  – коэффициент;  $b = (C_p - C_n)/(C_0 - C_p)$ .

Для внутридиффузионного механизма переноса вещества в порах и капиллярах твердого тела при числе Био  $Bi \rightarrow \infty$  процесс массопереноса ограничен внутренней диффузией и уравнение (1) преобразуется в следующий вид [12–15]:

$$\frac{C_p - C_1}{C_0 - C_n} = \frac{1}{1+b} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(v+1)}{k_2^2 + 4(v+1)^2 b(1+b)} \cdot e^{-k_2^2 \tau}. \quad (2)$$

Используя диффузионный критерий Фурье  $Fo = D \cdot \tau / R^2$ , где  $\tau$  – время процесса экстракции, с;  $R$  – определяющий размер частиц (для шара и цилиндра – радиус, для пластины – толщина), м;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с; а также параметр  $A_n$ , зависящий от формы частиц [12–15], уравнение (2) можно записать в виде

$$\frac{C_p - C_1}{C_0 - C_n} = \frac{1}{1+b} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-k_2^2 Fo). \quad (3)$$

Уравнения для определения параметра формы частиц  $A_n$  и корней характеристического уравнения  $k_2$  для тел, имеющих форму пластины, цилиндра и сферы, получены в [12–15]. Корни  $k_2$  характеристического уравнения можно получить, решая систему уравнений для частиц соответствующей формы. Например, для сферических частиц такая система уравнений имеет вид

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{6}{\left(3b - \frac{k_2^2}{Bi}\right)^2 + k_2^2 \left(1 - \frac{1}{Bi}\right) + 9b} \\ ctgk_2 &= \frac{1}{k_2} + \frac{1}{\frac{3b}{k_2} - \frac{k_2}{Bi}} \\ tg\alpha &= k_2^2 \frac{D}{R^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Преобразуя систему уравнений (4), получают соответствующее характеристическое уравнение [12–15]:

$$\left(\frac{k_2^2}{-1 + k_2 ctgk_2} + 0,5\right)^2 + k_2^2 = 6b \left(\frac{1}{k_1} - 1\right) + \frac{1}{4}. \quad (5)$$

Применяя численные методы для решения характеристического уравнения (5), можно получить коэффициент  $k_2$ .

### **Экспериментальная часть**

Торф взят из Голдымского торфопредприятия Тамбовской области. Пробы отбирались из слоя торфа, добываемого фрезерным способом. Образец торфа соответствует группе верхового слаборазложившегося сосново-сфагнового торфа нормальной зольности, кислотность (рН) – 4.1.

Биогумус (вермикомпост) – продукт переработки червями органических веществ (навоза, соломы, листвьев, остатков силоса, сена, отходов пищевой промышленности, птичьего помета). Биогумус был произведен ООО «АГРОБИОЦЕНТР», Тамбов. Коэффициент гуммификации субстрата – до 20%. Содержание сухой органической массы составляет 52%; гумуса – 12%; кислотность (рН) – 7.2.

Торф и биогумус высушивали до остаточной влажности не более 5% и просеивали на сите с размером сторон квадратных отверстий 2 мм. Для экспериментальных исследований готовили 4 варианта суспензий из фракции частиц торфа и биогумуса, прошедших через сито, с соотношением жидкой и твердой фаз по массе  $L/G = 4 : 1; 5 : 1; 10 : 1; 15 : 1$ . Суспензию прокачивали многократно, от  $i=10$  циклов до  $i=40$  циклов под давлением через аппарат марки РИА-250 конструкции авторов [22]. Время одного цикла обработки составляло  $\tau=1.6$  с, суммарное время обработки образца суспензии определялось количеством циклов обработки.

Размер необработанных сухих частиц торфа и биогумуса определяли с использованием вибрационного грохота «Вибротехник ВП-Т/22С». Классификацию частиц по размеру проводили с применением листовых сит с размером сторон квадратных отверстий 2, 1.5, 1, 0.5, 0.25 мм. Навеску сухого торфа или биогумуса массой 1 кг просеивали в грохоте в течение 20 мин, затем взвешивали каждую фракцию частиц и определяли долю фракции частиц в общей массе.

На основе анализа распределения частиц торфа и биогумуса по фракциям установлено, что в основной массе частиц биогумуса (67% масс.) преобладают частицы среднего размера от 0.25 до 1.5 мм. В основной массе частиц торфа (83% масс.) преобладают частицы среднего размера от 0.5 до 1.5 мм. Распределение частиц в образцах соответствует нормальному закону распределения, что характерно для частиц природного сырья, не подвергающегося механической обработке.

Гранулометрический состав образцов суспензий биогумуса и торфа, прошедших обработку в РИА, определяли на лазерном анализаторе частиц «Microsizer 201С». Распределение частиц в суспензиях торфа и биогумуса, обработанных в РИА, практически не зависит от соотношения  $L/G$  и соответствует нормально-логарифметрическому закону распределения частиц по размерам. На рисунке 1 представлены графики изменения среднеарифметического размера частиц в суспензиях в зависимости от количества циклов обработки в РИА.

Для определения формы необработанных и измельченных в РИА частиц торфа и биогумуса их фотографировали при 125-кратном увеличении на микроскопе PZO WARSZAWA. Фотографии исходных и измельченных частиц торфа и биогумуса после 40-кратной обработки в РИА представлены на рисунке 2.

На основе сравнительного анализа фракционного состава измельченных и необработанных частиц торфа и биогумуса можно сделать вывод, что при обработке суспензий в РИА происходит существенное уменьшение размера частиц и их форма становится близкой к сферической. Уменьшение размера частиц при многократной обработке суспензии в РИА происходит по экспоненциальной зависимости. После 40 циклов прохождения суспензии через аппарат средний размер частиц торфа уменьшился в 28 раз, размер частиц биогумуса – в 40 раз.

От размера частиц торфа зависит величина площади контакта фаз и массоперенос ГК и ФК из твердой фазы в жидкую. Чем меньше размер частиц, тем больше открытых пор и капилляров, больше площадь фазового контакта и поток экстрагируемого вещества.

Концентрацию ГК и ФК в образцах необработанных и обработанных суспензий торфа и биогумуса определяли по методу Кононовой и Бельчиковой [23]. В таблице 1 приведены данные по концентрации ГК и ФК в водном растворе после многократной обработки суспензий торфа и биогумуса в РИА.

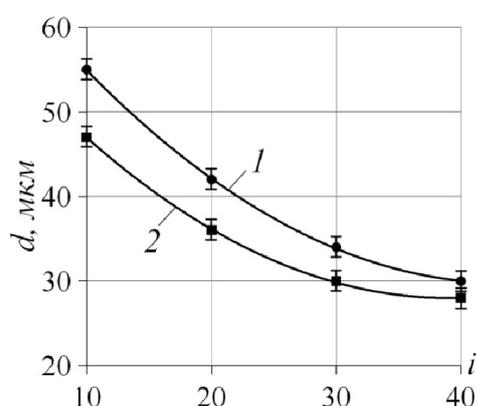


Рис. 1. Графики зависимостей среднего размера частиц в суспензиях биогумуса и торфа от количества циклов обработки суспензии в РИА:

1 – суспензия биогумуса; 2 – суспензия торфа

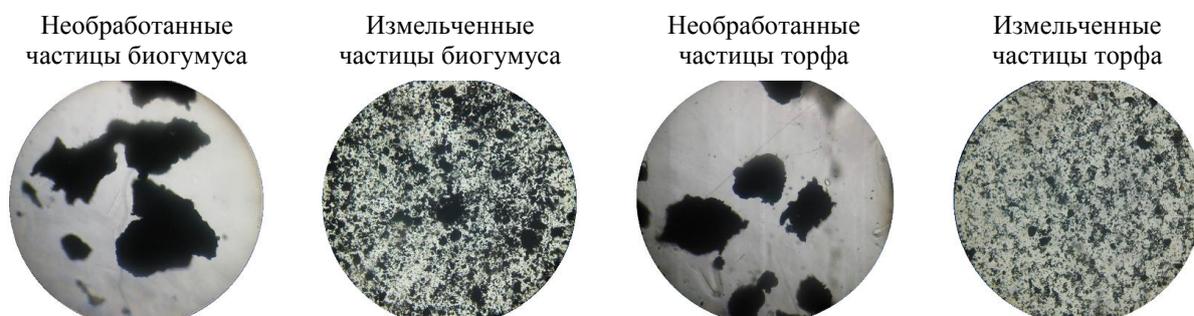


Рис. 2. Фотографии частиц биогумуса и торфа до и после обработки в РИА при 125-кратном увеличении

Таблица 1. Концентрация ГК и ФК в водном растворе при экстракции из торфа и биогумуса в РИА

Концентрация, кг/м <sup>3</sup>				
<i>i</i>	<i>L/G=4</i>	<i>L/G=5</i>	<i>L/G=10</i>	<i>L/G=15</i>
<i>l</i>	2	3	4	5
ГК, суспензия биогумуса				
10	5.1	3.9	2.3	1.5
20	10	8	4.6	2.2
30	11.8	10	6.2	2.8
40	11.95	10.4	6.8	2.9
ГК, суспензия торфа				
10	2.4	2.1	1.8	1.1
20	4.4	3.7	3.2	1.9
30	5.7	4.8	4.1	2.2
40	6.3	5.4	4.6	2.3

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
ФК, суспензия торфа				
10	2.4	2.1	1.8	1.1
20	4.3	3.7	3.2	1.9
30	5.7	4.8	4.1	2.2
40	6.2	5.4	4.5	2.4

Концентрация органических кислот в воде повышается по линейной зависимости при увеличении концентрации твердой фазы в суспензии. Увеличение концентрации твердого в суспензии более 25% нецелесообразно в связи с возможностью заклинивания ротора аппарата при зазоре менее 0.1 мм между ротором и статором.

### Обсуждение результатов

Допущения, упрощающие и идеализирующие структуру частиц торфа и биогумуса, условия массопереноса целевого вещества из твердой фазы в жидкую фазу и гидродинамику потоков в РИА приведены в работах [9, 10, 13–16].

Для установившегося процесса в уравнении (3) можно ограничиться первым членом ряда. С учетом уравнения (5) уравнение кинетики для процесса экстракции целевого вещества из капиллярно-пористых частиц в форме шара может быть представлено в виде

$$(C_p - C_1)/(C_0 - C_n) = k_1 \cdot e^{-k_2^2 \cdot Fo} \quad (6)$$

Для расчета кинетики экстракции уравнение (6) удобно перевести в линейный вид путем логарифмирования

$$\ln((C_p - C_1)/(C_0 - C_n)) = \ln k_1 - (k_2^2) \cdot (D \cdot \tau / R^2) \quad (7)$$

На основании результатов экспериментальных исследований образцов частиц торфа и биогумуса принимали, что для установившегося режима процесса экстракции частицы можно рассматривать как шарообразные с радиусом  $R$ . В качестве равновесной концентрации  $C_p$  принимали наибольшую концентрацию ГК или ФК в водном растворе, которая уже не увеличивается при достаточно длительном процессе обработки суспензий торфа и биогумуса в РИА. Величину концентрации извлекаемых веществ в растворе в текущий момент времени  $C_1$  брали из таблицы 1.

Коэффициент  $k_1$  определяли графическим методом, используя зависимость  $\ln((C_p - C_1)/(C_0 - C_n)) = f(\tau)$ . Аппроксимируя эту зависимость прямой линией, определяли значение углового коэффициента  $tg\alpha$  линии графика. Пересечение аппроксимирующей прямой с осью ординат ( $\tau = 0$ ) позволяет определить значение коэффициента  $k_1$  [13, 18–21]. Полное время процесса экстракции равно произведению времени одного цикла  $\tau_l = 1,6$  с и количества циклов обработки  $i$  суспензии в аппарате,  $\tau = \tau_l \cdot i$ . На рисунке 3 показаны аппроксимирующие прямые для параметра  $\ln((C_p - C_1)/(C_0 - C_n)) = f(\tau)$  от времени экстракции ГК и ФК. Точки пересечения прямых с осью ординат показывают значения коэффициента  $k_1$ .

Решение уравнения (5) численным методом хорд позволяет определить коэффициент  $k_2$  и эффективный коэффициент диффузии:

$$D = R^2 tg\alpha / (-k_2^2) \quad (8)$$

Эффективные коэффициенты диффузии в среднем составили для водорастворимых ГК в торфе  $\sim 1,5 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с, в биогумусе  $\sim 1,0 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с, для ФК в торфе  $\sim 0,7 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с.

Уравнение кинетики экстракции ГК и ФК из торфа и биогумуса в РИА, должно быть дополнено эмпирическим коэффициентом  $k_3$ , учитывающим специфику массообменного процесса в РИА:

$$\left(\frac{C_p - C_1}{C_0 - C_n}\right) = k_1 \cdot e^{-k_2^2 \cdot k_3 \cdot Fo} \tag{9}$$

Значения кинетических коэффициентов уравнения (9) для процесса экстрагирования ГК и ФК в РИА представлены в таблице 2.

Расчетные графики по уравнению (9) концентраций ГК и ФК при обработке суспензий в РИА показаны на рисунке 4.

Погрешность расчетов по уравнению (9) не превышает 15% по сравнению с экспериментальными данными по концентрациям ГК и ФК для процесса их экстракции при обработке суспензий торфа и биогумуса в РИА.

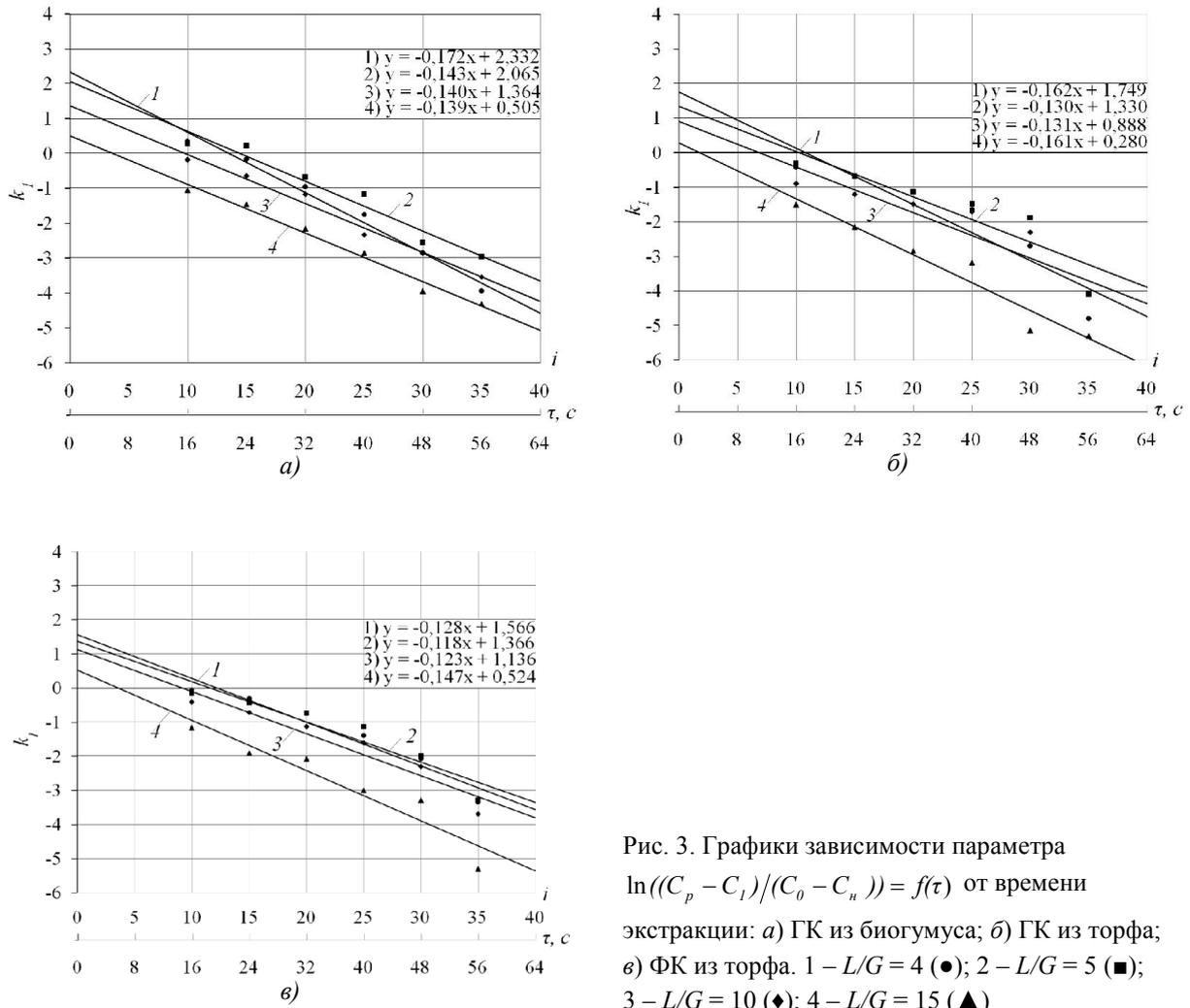


Рис. 3. Графики зависимости параметра  $\ln((C_p - C_1)/(C_0 - C_n)) = f(\tau)$  от времени экстракции: а) ГК из биогумуса; б) ГК из торфа; в) ФК из торфа. 1 – L/G = 4 (●); 2 – L/G = 5 (■); 3 – L/G = 10 (◆); 4 – L/G = 15 (▲)

Таблица 2. Значения коэффициентов кинетического уравнения (9)

L/G	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>
1	2	3	4
ГК, суспензия биогумуса			
4	2.33	1.21	0.6
5	2.07	1.38	
10	1.36	1.78	
15	0.51	2.52	
ГК, суспензия торфа			
4	1.75	1.46	0.5
5	1.33	1.63	

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
10	0.89	1.93	
15	0.28	2.33	
ФК, суспензия торфа			
4	1.57	1.65	
5	1.37	1.88	
10	1.14	2.22	0.7
15	0.524	2.69	

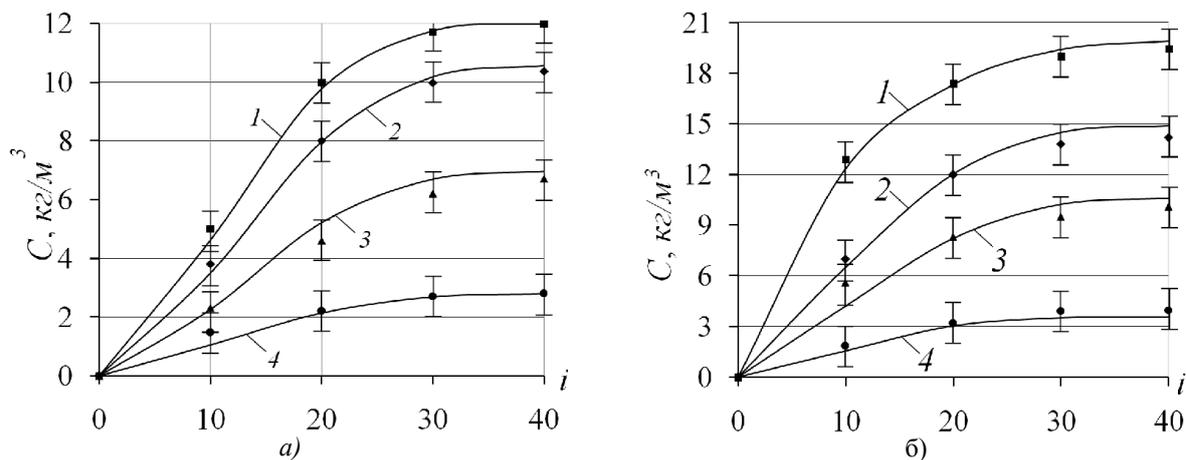
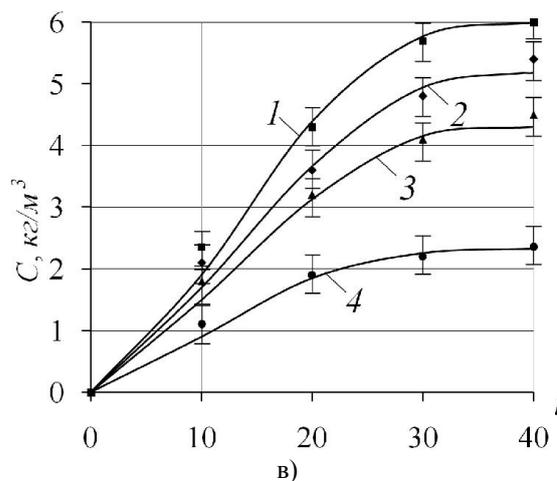


Рис. 4. Графики расчетных кинетических закономерностей процесса экстракции при обработке суспензий в РИА: а) ГК из биогумуса; б) ГК из торфа; в) ФК из торфа. 1 –  $L/G = 4$  (■); 2 –  $L/G = 5$  (◆); 3 –  $L/G = 10$  (▲); 4 –  $L/G = 15$  (●)



**Выводы**

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что изменение среднеарифметического размера частиц и концентрации ГК и ФК в суспензиях торфа и биогумуса происходит по экспоненциальным зависимостям. Среднеарифметический размер частиц в суспензиях торфа и биогумуса уменьшается при увеличении кратности обработки суспензии в РИА, достигая предельно малого размера для данной системы после сорокакратного прохождения через РИА.

Сравнение закономерностей изменения концентраций ГК и ФК в воде и размеров частиц суспензии позволяет сделать вывод, что интенсивность массопереноса целевых веществ из твердой фазы в жидкую обусловлена увеличением площади контакта фаз, величина которой зависит не только от площади поверхности твердых частиц, но существенно растет за счет открытия новых пор и капилляров при измельчении частиц.

Концентрация экстрагируемых веществ при 30-40 циклах приближается к постоянному равновесному значению. В период от 1 до 20 циклов обработки суспензии в РИА разность концентраций в растворе и в твердых частицах наибольшая. Экстрагируемые вещества, частицы, находящиеся на поверхности и в близких к поверхности порах, переходят в раствор в основном при первых 10 циклах обработки.

**Список литературы**

1. Kim H. Tan. Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies (2nd ed.). New-York, Marcel Dekker Inc. 2014. 371 p.
2. Davies G., Ghabbour E. A. Humic Substances: Structures, Properties and Uses. Cambridge, 1998. 272 p.
3. Rocha J.C., Rosa A.H., Furlan M. An alternative methodology for the extraction of humic substances from organic soils // Journ. Braz. Chem. Soc. 1998. Vol. 9, №1. Pp. 51–56.
4. Наумова Г.В., Овчинникова Т.Ф., Жмакова Н.А., Макарова Н.Л. Изменение биологической активности гуминовых кислот при их окислительно-гидролитической деструкции // Природопользование. 2001. Вып. 7. С. 123–125.
5. Ефанов М.В., Новоженев В.А., Франкивский В.Н. Окислительный аммонолиз торфа в условиях кавитационной обработки // Химия растительного сырья. 2010. №1. С. 165–169.
6. Соколов Г.А., Бамбалов Н.Н., Смирнова В.В., Цвирко Л.Ю. Влияние гидродинамической кавитации на выход гуминовых веществ из торфа // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. 2010. №4. С. 112–117.
7. Москаленко Т.В., Михеев В.А., Данилов О.С. Структурные превращения гуминовых кислот торфов при экстрагировании под действием магнитного и ультразвуковых полей // Химия растительного сырья. 2011. №4. С. 283–286.
8. Дудкин Д.В., Федяева И.М. Малоотходная технология получения гуминовых веществ из торфа различного ботанического состава и степени разложения // Химия растительного сырья. 2018. №2. С. 175–182. DOI: 10.14258/jcprgm.2018023356.
9. Promtov M., Stepanov A., Aleshin A., Kolesnikova M. Intensification of humic acid extraction by pulse flow of vermicompost and spropel slurries // Chemical engineering research and design. 2016. Vol. 108. Pp. 217–221. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.03.013.
10. Промтов М.А., Степанов А.Ю., Алешин А.В. Кинетика экстрагирования гуминовых и фульвокислот в роторном импульсном аппарате // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. Т. 23, №2. С. 265–273. DOI: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.265-273.
11. Суворов В.И. Пористая структура торфа // Труды Инсторфа. 2011. №3(56). С. 12–26.
12. Лыков А.В. Теория сушки. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., 1968. 472 с.
13. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование (система твердое тело – жидкость) Л., 1974. 256 с.
14. Crank J. The mathematics of diffusion (2nd ed.). London, 1975. 414 p.
15. Рудобашта С.П., Карташов М.И. Диффузия в химико-технологических процессах. М., 1993. 209 с.
16. Бабенко Ю.И., Иванов Е.В. Экстрагирование. Теория и практические приложения. СПб., 2009. 336 с.
17. Рудобашта С.П., Климов А.М., Тепляков Ю.А., Нечаев В.М. Расчет кинетики процессов экстрагирования из однородно-пористых материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т. 15, №2. С. 594–598.
18. Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И. Исследование кинетики массопереноса в процессе экстрагирования бересты // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. №4. С. 119–128.
19. Новикова И.В., Агафонов Г.В., Корниенко Т.С., Мальцева О.Ю. Исследование скорости экстрагирования компонентов из древесного сырья // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2012. №3. С. 99–103.
20. Chilev C., Koleva V., Simeonov E. A New Empirical Model for Calculation the Effective Diffusion Coefficient for Solid-Liquid Extraction from Plants // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2014. №53. Pp. 6288–6296. DOI: 10.1021/ie402473g.
21. Макаревич Н.А., Богданович Н.И., Третьяков С.И., Коптелова Е.Н. Кинетическая модель межфазовых процессов с участием компонентов растительного сырья. Химия растительного сырья. 2014. №4. С. 251–262. DOI: 10.14258/jcprgm.201404208.
22. Промтов М.А., Степанов А.Ю., Алешин А.В. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата. Тамбов, 2015. 148 с.
23. Минеев В.Г. Практикум по агрохимии. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2001. 689 с.

*Поступила в редакцию 15 октября 2018 г.*

*После переработки 16 ноября 2018 г.*

*Принята к публикации 23 января 2019 г.*

**Для цитирования:** Промтов М.А., Степанов А.Ю. Кинетика совмещенных процессов диспергирования и экстракции гуминовых и фульвовых кислот из торфа и биогумуса в роторном импульсном аппарате // Химия растительного сырья. 2019. №2. С. 261–269. DOI: 10.14258/jcprgm.2019024536.

Promptov M.A.\*, Stepanov A.Yu. THE KINETICS OF THE COMBINED PROCESSES OF DISPERSION AND EXTRACTION OF HUMIC AND FULVIC ACIDS FROM PEAT AND VERMICOMPOST IN THE ROTOR-STATOR DEVICE

Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., Tambov, 392000 (Russia), e-mail: promptov@tambov.ru, kvidep@cen.tstu.ru

Was conducted an experimental study of dispersion of solid particles, extraction of humic acids (HA) and fulvic acids (FA) in suspensions of peat and vermicompost with repeated mechanical and hydrodynamic treatment in a rotor-stator device (RSD). According to reduce the average particle size and increase the concentration of HA and FA in suspensions of peat and vermicompost on the number of cycles in the RSD have an exponential character. The average particle size in suspensions of peat and vermicompost decreases from average size of 1 mm to 30  $\mu\text{m}$  at 40 times the treatment of the suspension in the RSD. The intensity of the mass transfer of target substances from the solid phase to the liquid phase is due to an increase in the contact area of the phases, the value of which depends not only on the surface area of the solid particles, but significantly increases due to the opening of new pores and capillaries during particle grinding. The concentration of water-soluble HA in 25% peat suspension reaches 20 g/l, the concentration of FA – 6 g/l. The concentration of water-soluble HA in 25% vermicompost suspension reaches 12 g/l. Extractable substances on the surface of the particle and in the pores close to the surface, pass into the solution mainly during the first 10 treatment cycles. Effective diffusion coefficients and empirical coefficients of the kinetic equation for the extraction process of HA and FA in peat and vermicompost suspensions during their processing in RSD were determined.

**Keywords:** extraction, dispersing, rotor-stator device, humic acid, fulvic acid, peat, vermicompost.

### References

1. Kim H. Tan. Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies (2nd ed.). New-York, Marcel Dekker Inc. 2014. 371 p.
2. Davies G., Ghabbour E. A. Humic Substances: Structures, Properties and Uses. Cambridge, 1998. 272 p.
3. Rocha J.C., Rosa A.H., Furlan M. *Journ. Braz. Chem. Soc.*, 1998, vol. 9, no. 1, pp. 51–56.
4. Naumova G.V., Ovchinnikova T.F., Zhmakova N.A., Makarova N.L. *Prirodopolzovanie*, 2001, no. 7, pp. 123–125. (in Russ.)
5. Efanov M.V., Novozhenov V.A., Frankivsky V.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2010, no. 1, pp. 165–169. (in Russ.)
6. Sokolov G.A., Bambalov N.N., Smirnova V.V., Cvirko L.U. *Vesci NAN Belarusi. Ser. him. nauk*. 2010, no. 4, pp. 112–117. (in Russ.)
7. Moskalenko T.V., Miheev V.A., Danilov O.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2011, no. 4, pp. 283–286. (in Russ.)
8. Dudkin D.V., Fedyayeva I.M. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 2, pp. 175–182. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2018023356.
9. Promptov M., Stepanov A., Aleshin A., Kolesnikova M. *Chemical engineering research and design*, 2016, vol. 108, pp. 217–221. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.03.013.
10. Promptov M., Stepanov A., Aleshin A. *Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 265–273. DOI: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.265-273. (in Russ.)
11. Suvorov V.I. *Trudy Instorfa*, 2011, no. 3(56), pp. 12–26. (in Russ.)
12. Lykov A.V. *Teoriia sushki*. [Theory of Drying]. Moscow, 1968, 472 p. (in Russ.)
13. Aksel'rud G.A., Lysianskii V.M. *Ekstragirovanie (Sistema tverdoe telo – zhidkost')*. [Extraction System (solid – liquid)]. Leningrad, 1974, 256 p. (in Russ.)
14. Crank J. The mathematics of diffusion (2nd ed.). London, 1975. 414 p.
15. Rudobashta S.P., Kartashov E.M. *Diffuziia v khimiko-tehnologicheskikh protsessakh*. [Diffusion in chemical technological processes]. Moscow, 2010. 478 p. (in Russ.)
16. Babenko Yu.I., Ivanov E.V. *Ekstragirovanie. Teoriya i prakticheskie prilozheniya*. [Extraction. Theory and practical applications]. St. Petersburg. 2009. 336 p. (in Russ.)
17. Rudobashta S.P., Teplyakov Yu.A., Nechaev V.M., Klimov A.M. *Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 330–336. (in Russ.)
18. Koptelova E.N., Kutakova N.A., Tret'akov S.I. *Izvestiia vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2013, no. 4, pp. 119–128. (in Russ.)
19. Novikova I.V., Agafonov G.V., Kornienko T.S., Mal'tseva O.U. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta ingenernyh tehnologii*, 2012, no. 3, pp. 99–103. (In Russ.)
20. Chilev C., Koleva V., Simeonov E.A. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, no. 53, pp. 6288–6296. DOI: 10.1021/ie402473r.
21. Makarevich N.A., Bogdanovich N.I., Tret'akov S.I., Koptelova E.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2014, no. 4, pp. 251–262. DOI: 10.14258/jcprm.201404208 (in Russ.)
22. Promptov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V., *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata: monografiya* [Methods for calculating the characteristics of a rotary pulse apparatus: monograph], Tambov, 2015, 148 p. (in Russ.)
23. Mineev V.G. *Praktikum po agrohimii*. [Workshop on agricultural chemistry]. (2nd ed.). Moscow, 2001, 689 p. (in Russ.)

Received October 15, 2018

Revised November 16, 2018

Accepted January 23, 2019

**For citing:** Promptov M.A., Stepanov A.Yu. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2019, no. 2, pp. 261–269. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2019024536.

\* Corresponding author.

