

КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ ИЗ ТОРФА И БИОГУМУСА В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

М. А. Промтов, А. Ю. Степанов

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

Ключевые слова: биогумус; гуминовые кислоты; коэффициент массоотдачи; роторный импульсный аппарат; торф; экстрагирование.

Аннотация: Исследованы закономерности процесса экстрагирования гуминовых кислот (ГК) из торфа и биогумуса в роторном импульсном аппарате (РИА). Установлено, что для расчета коэффициента массоотдачи необходимо определить удельную мощность и значения диффузионного критерия Прандтля; при увеличении времени (количества циклов) обработки суспензии в РИА расчетные значения критерия Прандтля возрастают и снижается коэффициент массоотдачи; коэффициент массоотдачи возрастает при увеличении удельной мощности, потребляемой для экстрагирования ГК из торфа и биогумуса в РИА. На основе экспериментальных исследований определены коэффициенты в критериальном уравнении для процесса экстрагирования ГК из торфа и биогумуса в РИА.

Введение

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

Торф и биогумус являются растительным сырьем природного происхождения и относятся к коллоидным капиллярно-пористым материалам, так как их внутренняя структура представляет собой сложную систему взаимосвязанных и изолированных капилляров различной формы и длины с переменным поперечным сечением [9 – 11]. Перенос ГК из твердых частиц торфа или биогумуса в жидкую фазу происходит по системе капилляров и пор.

Совмещение процессов диспергирования и экстракции в одном технологическом аппарате существенно интенсифицирует выход целевого компонента, так как в процессе обработки суспензии происходит непрерывное 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 РИА частицы подвергаются динамическому воздействию в виде удара и сдвига, которое измельчает и изменяет структуру обрабатываемого материала, что значительно облегчает выход целевых веществ из сырья [12 – 17].

Теоретическая часть

Скорость массоотдачи от поверхности частицы, взвешенной в турбулентном потоке, зависит от молекулярной и турбулентной диффузии, а также от градиента концентрации экстрагируемого вещества вблизи поверхности частицы [18]

$$j = (D_M + D_T) \frac{dc}{dy}, \quad (1)$$

где D_T , D_M – коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии, m^2/c , соответственно; c – концентрация извлекаемых веществ в растворе, $кг/м^3$; y – расстояние от поверхности массообмена, $м$.

При интенсивной турбулентности вблизи поверхности массопереноса, коэффициент молекулярной диффузии значительно меньше коэффициента турбулентной диффузии и в расчетах им можно пренебречь. В соответствии с моделью затухания турбулентности в вязком подслое [19], величина коэффициента турбулентной диффузии вблизи твердой поверхности определяется по уравнению [20, 21]

$$D_T = \delta_0 \nu_0 (y / \delta_0)^4, \quad (2)$$

где δ_0 – толщина вязкого подслоя, $м$; ν_0 – характеристическая скорость турбулентных пульсаций, $м/с$.

В соответствии с уравнением (2) коэффициент турбулентной диффузии D_T пропорционален y^4 . Согласно уравнению (1), увеличение D_T приводит к быстрому снижению градиента концентрации. Изменение концентрации в пределах вязкого подслоя принимается равным разности концентраций между границей раздела и ядром потока [18]. Диффузионное сопротивление вязкого подслоя $R_d = 1/\beta$ определяется по формуле

$$R_d = \frac{c_{нас} - c}{j} = \int_0^{\infty} \frac{dy}{D + \nu_0 y^4 / \delta_0^3} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{\delta_0^3}{\nu_0 D^3}}; \quad (3)$$

– коэффициент массоотдачи, $м/с$:

$$\beta = 0,9 \sqrt[4]{\nu_0 D^3 / \delta_0^3}, \quad (4)$$

где D – эффективный коэффициент диффузии, m^2/c ; $c_{нас}$ – концентрация насыщения, $кг/м^3$.

Величины δ_0 и ν_0 зависят от условий перемешивания и описываются системой уравнений:

$$Re_{\delta} = \nu_0 \delta_0 / \nu = 11,5; \quad (5)$$

$$\nu_0 = \varepsilon_0^{1/3} \delta_0^{1/3}. \quad (6)$$

где Re_{δ} – критерий Рейнольдса у поверхности частицы; ν – кинематическая вязкость, m^2/c ; ε_0 – удельная мощность, подведенная к массе жидкости у поверхности частицы, $Вт/кг$.

Для экстрагирования в системе «твердое – жидкость» в условиях интенсивного смешения и высокоскоростных режимах движения фаз относительно друг друга, с учетом соотношений (5) и (6), уравнение для определения коэффициента массоотдачи (4) принимает вид [18, 22]

$$\beta = 0,267 \left(\varepsilon \frac{\mu}{\rho} \right)^{0,25} \text{Pr}^{-0,75}, \quad (7)$$

где $\text{Pr} = \frac{\mu}{\rho D}$ – критерий Прандтля; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; ρ – плотность суспензии, кг/м³; ε – удельная мощность, Вт/кг, подведенная к единице массы суспензии при ее обработке в установке на базе РИА, определяемая по формуле [12]

$$\varepsilon = \frac{(N_1 + N_2)}{m}, \quad (8)$$

где N_1 – мощность, затраченная на вращение ротора РИА, Вт; N_2 – мощность, затрачиваемая насосом на подачу суспензии в РИА, Вт.

Критериальное уравнение для определения основных параметров процесса экстрагирования может быть записано в форме

$$\text{Bi} = f(\text{Fo}, \text{Re}, L/G), \quad (9)$$

где $\text{Re} = \frac{\omega R_p^2 \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса; $\text{Fo} = \frac{D\tau}{R^2}$ – критерий Фурье; $\text{Pr} = \frac{\mu}{\rho D}$ –

критерий Прандтля; $\text{Bi} = \frac{\beta R}{D}$ – число Био; L, G – количество массовых единиц

жидкости и твердой фазы, кг, соответственно; R, R_p – радиусы частиц в форме шара и ротора, м, соответственно; τ – время, с; ω – угловая скорость ротора, с⁻¹.

Экспериментальная часть

Для экспериментальных исследований готовили четыре варианта суспензий из фракций частиц торфа и биогумуса, прошедших через сито с ячейками 2×2 мм, соотношениями жидкой и твердой фаз по массе L/G : 4, 5, 10, 15. В основной массе частиц биогумуса (67 масс.%) преобладали частицы среднего размера 0,25...1,5 мм; частиц торфа (83 масс.%) – 0,5...1,5 мм. Плотность исследуемых образцов суспензий определяли весовым методом. Определение вязкости суспензий выполняли с использованием ротационного вискозиметра ThermoHaake VT7R-plus [14]. Физические характеристики суспензий торфа и биогумуса представлены в табл. 1.

В установку заливалась суспензия с необходимым соотношением твердой и жидкой фаз, устанавливалась частота вращения вала РИА и проводилась обработка суспензии. Суспензию прокачивали многократно, от $i = 10$ до $i = 40$ циклов по замкнутому контуру из емкости через насос в РИА и обратно в емкость. Время одного цикла обработки составляло $\tau = 1,6$ с, суммарное время обработки образца суспензии определялось как произведение количества циклов обработки и времени одного цикла. Форма частиц торфа и биогумуса в процессе обработки в РИА приближалась к шарообразной. После 40-кратной обработки суспензии торфа средний размер твердых частиц уменьшился почти в 30 раз (с 800 до 28 мкм), а частиц биогумуса – в 40 раз (с 1200 до 30 мкм) [14]. На основе результатов исследований по изменению концентрации ГК в твердой и жидкой фазах суспензий торфа и биогумуса при обработке в РИА определены эффективные коэффициенты диффузии ГК [15].

Таблица 1

Физические характеристики суспензии торфа и биогуруса

Физическая характеристика	Соотношение фаз L/G			
	15	10	5	4
<i>Торф</i>				
Динамическая вязкость суспензии, Па·с	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$
Плотность суспензии, кг/м ³	1025	1030	1040	1060
Коэффициент диффузии ГК, м ² /с	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$1,7 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$
<i>Биогурус</i>				
Динамическая вязкость суспензии, Па·с	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$
Плотность суспензии, кг/м ³	1130	1135	1140	1150
Коэффициент диффузии ГК, м ² /с	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$1,7 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$

Центробежный насос в пилотной установке, представленной в работах [12, 14], обеспечивал подачу суспензии в РИА с расходом $Q = (42 \pm 3) \text{ м}^3/\text{ч}$ и давлением на входном патрубке РИА $P_1 = (0,45 \pm 0,02) \text{ МПа}$. Давление на выходном патрубке РИА равно $P_2 = (0,05 \pm 0,01) \text{ МПа}$. Роторный импульсный аппарат имеет нелинейное гидравлическое сопротивление, зависящее от скорости вращения ротора. На основе полученных экспериментальных данных по перепаду давления в установке $\Delta P = P_1 - P_2$ и расхода суспензии через РИА, определяли мощность, затрачиваемую насосом на подачу суспензии в РИА, по формуле

$$N_2 = \Delta P Q. \quad (10)$$

Измерения потребляемой энергии РИА при обработке суспензий выполняли с помощью прибора «Ресурс-UF2М», предназначенного для измерений характеристик напряжения и тока, мощности и энергии переменного трехфазного и однофазного токов. Измеритель подключался к частотному преобразователю Toshiba TOSVERT VF – P7-4370P, с помощью которого изменяли частоту вращения электродвигателя РИА в пилотной установке. Энергетические характеристики пилотной установки при обработке суспензий торфа и биогуруса в РИА представлены на рис. 1.

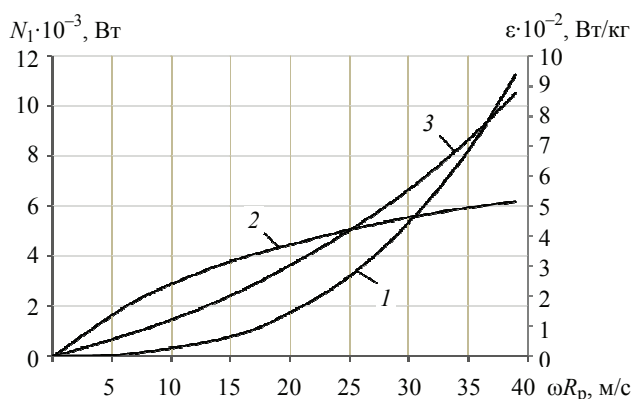


Рис. 1. Графики зависимости энергетических характеристик установки от линейной скорости ротора:

- 1, 2 – потребляемые мощности РИА и насоса соответственно;
3 – удельная потребляемая мощность ϵ установки

Обсуждение полученных результатов и выводы

Расчетные значения удельной мощности ε и значения диффузионного критерия Прандтля Pr необходимы для определения коэффициента массоотдачи β процесса экстрагирования ГК из торфа и биогумуса по уравнению (7). Расчет диффузионного критерия Прандтля Pr выполняли с учетом данных в табл. 1 при различных соотношениях L/G [14, 15]. Зависимости расчетных значений критерия Прандтля от времени обработки (числа циклов) суспензий биогумуса и торфа показаны на рис. 2.

Расчетные значения критерия Прандтля возрастают при увеличении времени обработки (числа циклов) суспензии в связи с изменением значений плотности и вязкости суспензий.

Расчет коэффициента массоотдачи для процесса экстрагирования ГК и ФК из частиц торфа и биогумуса проводили по уравнению (7). Результаты расчета представлены в виде графиков (рис. 3, 4). Расчетное значение эффективного коэффициента диффузии для процесса экстрагирования ГК из торфа и биогумуса определяли для каждого соотношения L/G при обработке $i = 10 \dots 40$ циклов [15].

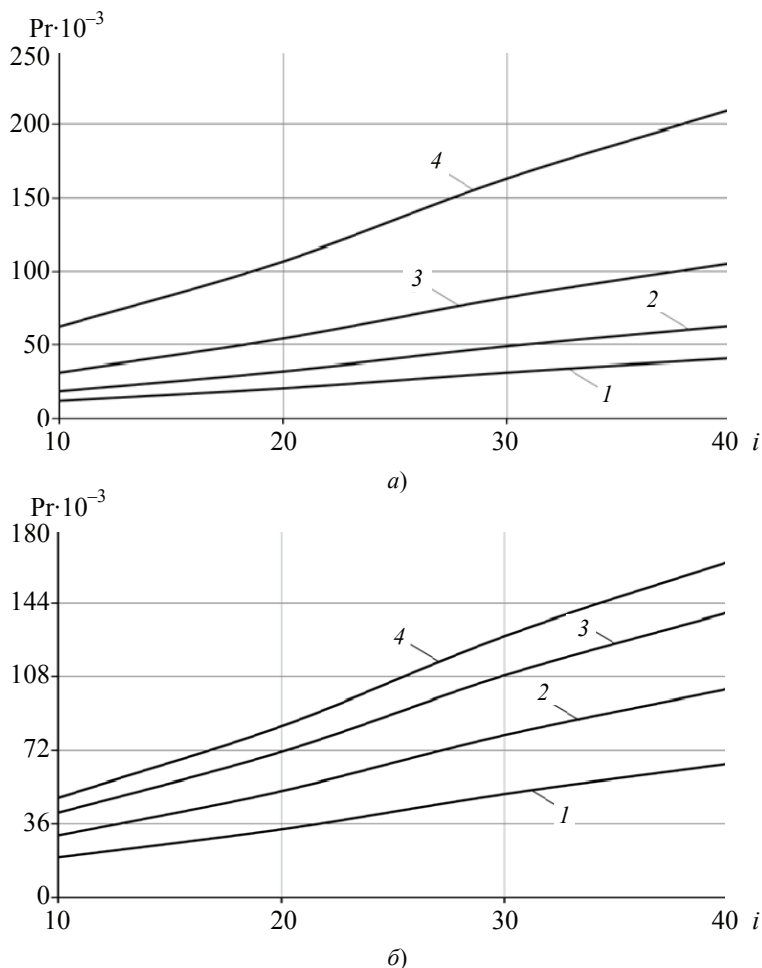


Рис. 2. Расчетные значения критерия Прандтля при экстрагировании ГК из суспензий биогумуса (а) и торфа (б) в зависимости от числа циклов обработки суспензии при соотношениях L/G :
1 – 4; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15

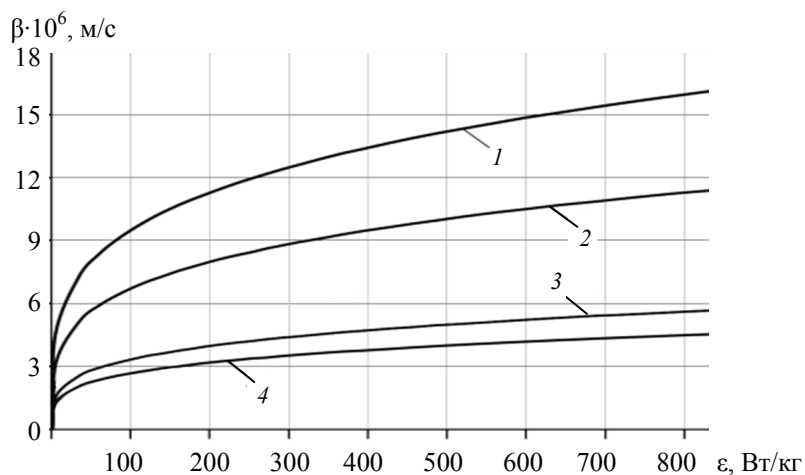
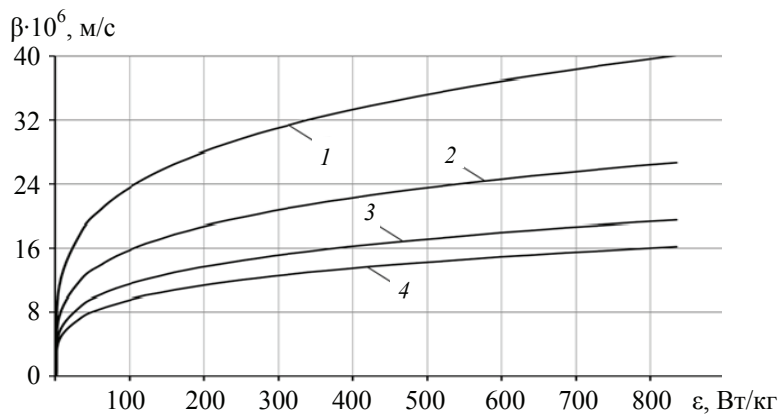
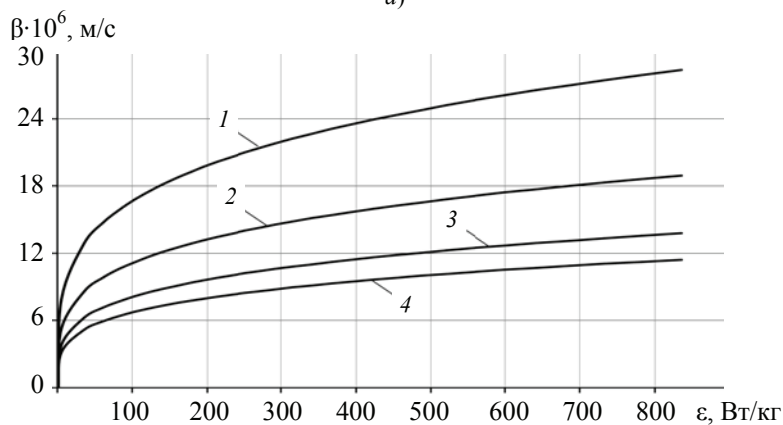


Рис. 3. Зависимости коэффициента массоотдачи от удельной мощности:
L/G = 4: 1 – ГК из биогумуса; 2 – ГК из торфа;
L/G = 15: 3 – ГК из биогумуса; 4 – ГК из торфа



a)



б)

Рис. 4. Зависимость коэффициента массоотдачи от удельной мощности при экстрагировании ГК из суспензий биогумуса (а) и торфа (б) при $L/G = 4$:
1 – $i = 10$, $\tau = 16$ с; 2 – $i = 20$, $\tau = 32$ с; 3 – $i = 30$, $\tau = 48$ с; 4 – $i = 40$, $\tau = 64$ с

Анализ графических зависимостей коэффициента массоотдачи от удельной мощности при экстрагировании ГК из суспензий торфа и биогумуса показывает увеличение значений коэффициента массоотдачи при увеличении удельной мощности установки на базе РИА (см. рис. 3, 4). Это связано с тем, что при увеличении удельной энергии РИА повышается скорость потока суспензии в РИА, происходит увеличение скорости обтекания твердых частиц торфа и биогумуса жидкостью. Значительное увеличение коэффициента массоотдачи в начале процесса связано с интенсивным механическим воздействием РИА, при котором измельчаются твердые частицы суспензий торфа и биогумуса, происходит многократное увеличение площади контактирующих фаз.

С увеличением числа циклов обработки суспензии в РИА коэффициент массоотдачи снижается, так как концентрации ГК в растворе и твердых частицах уравниваются и движущая сила массоотдачи уменьшается.

На основе анализа графиков можно сделать вывод, что рациональной величиной удельной мощности при обработке суспензий торфа и биогумуса в РИА являются значения $\epsilon = 140 \dots 160$ Вт/кг (см. рис. 3, 4). При этих величинах удельной мощности происходит изменение линии тренда коэффициента массоотдачи. Дальнейшее увеличение удельной мощности показывает незначительный прирост коэффициента массоотдачи β и является энергетически нецелесообразным.

Используя экспериментальные данные по изменению размера частиц суспензий торфа и биогумуса при их обработке в РИА [14], а также данные из табл. 1, определяли диффузионный критерий Фурье. Графики изменения диффузионного критерия Фурье от числа циклов обработки суспензий торфа и биогумуса в РИА показаны на рис. 5.

Для подтверждения предположения о внутридиффузионном режиме экстрагирования ГК из частиц торфа и биогумуса в РИА определяли критерий Био

$$Bi = \beta R / D. \quad (11)$$

Результаты расчета значений критерия Bi показывают, что для процесса экстрагирования ГК из торфа и биогумуса перенос вещества осуществляется по внутридиффузионному механизму (табл. 2). Лимитирующей стадией является внутренняя диффузия в капиллярах и порах твердой частицы.

На основании результатов по определению критерия Фурье, с учетом результатов расчетов числа Bi (см. табл. 2) и критерия Рейнольдса получена критериальная зависимость в виде

$$Bi = 0,8Fo^{-0,27}Re^{0,21}(L/G)^{-0,15}. \quad (12)$$

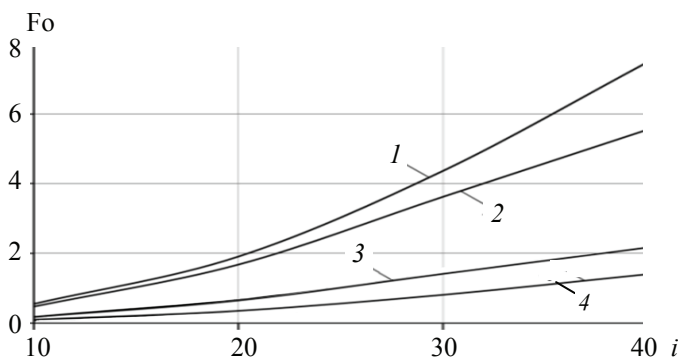


Рис. 5. Зависимости критерия Фурье от числа циклов обработки суспензий торфа и биогумуса в РИА:

$L/G = 4$: 1 – ГК из биогумуса; 2 – ГК из торфа;
 $L/G = 15$: 3 – ГК из биогумуса; 4 – ГК из торфа

Расчетные значения критерия Bi для суспензий при экстрагировании ГК

Суспензия	i	L/G			
		4	5	10	15
Биогумус	10	12,40	13,9	16,0	19,22
	20	10,80	12,2	14,0	16,80
	30	9,80	10,9	12,6	15,11
	40	9,20	10,3	11,8	14,20
Торф	10	11,86	13,2	14,4	15,20
	20	10,20	11,3	12,4	13,00
	30	9,50	10,4	11,5	12,00
	40	9,40	10,3	11,3	11,90

Примечание. Удельная мощность обработки $\varepsilon = 850$ Вт/кг

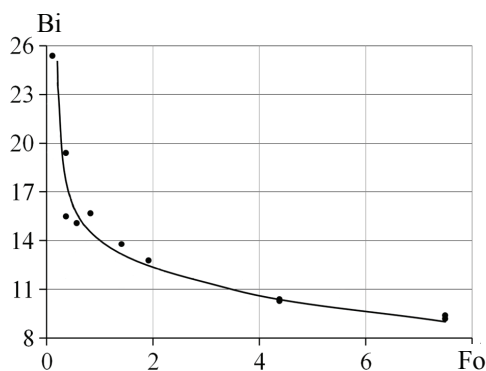


Рис. 6. Зависимость числа Bi от критерия Фурье

Результат расчета по зависимости (12) показал сходимость экспериментальных и расчетных данных при определении числа Bi с небольшой относительной погрешностью (рис. 6).

Зависимость (12) адекватна для диапазонов $1,5 \cdot 10^6 \leq Re \leq 4,5 \cdot 10^6$; $0,1 \leq Fo \leq 7,5$; $8 \leq Bi \leq 26$. Расчетные значения числа Bi , полученные по зависимости (12), удовлетворительно совпадают с расчетными значениями числа Bi , полученными на основе экспериментальных данных, с погрешностью не превышающей 15 %.

Список литературы

1. Kim H. Tan. Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies / Kim H. Tan. – New-York : Marcel Dekker Inc., 2014. – 371 p.
2. Davies, G. Humic Substances: Structures, Properties and Uses / G. Davies, E. A. Ghabbour. – Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 1998. – 272 p.
3. Гуминовые кислоты торфа – перспективные биологически активные вещества с антиоксидантной активностью для разработки протекторных средств / К. А. Братишко, М. В. Зыкова, В. В. Иванов [и др.] // Химия растительного сырья. – 2021. – № 1. – С 287 – 298. doi:10.14258/jcprgm.2021018784.

4. Изменение биологической активности гуминовых кислот при их окислительно-гидролитической деструкции / Г. В. Наумова, Т. Ф. Овчинникова, Н. А. Жмакова, Н. Л. Макарова // Природопользование. – 2001. – № 7. – С. 123 – 125.
5. Ефанов, М. В. Окислительный аммонолиз торфа в условиях кавитационной обработки / М. В. Ефанов, В. А. Новоженев, В. Н. Франкивский // Химия растительного сырья. – 2010. – № 1. – С. 165 – 169.
6. Влияние гидродинамической кавитации на выход гуминовых веществ из торфа / Г. А. Соколов, В. В. Смирнова, Н. Н. Бамбалов, Л. Ю. Цвирко // Изв. Национ. академии наук Беларуси. Серия хим. наук. – 2010. – № 4. – С. 112 – 117.
7. Москаленко, Т. В. Структурные превращения гуминовых кислот торфов при экстрагировании под действием магнитного и ультразвуковых полей / Т. В. Москаленко, В. А. Михеев, О. С. Данилов // Химия растительного сырья. – 2011. – № 4. – С. 283 – 286.
8. Дудкин, Д. В. Малоотходная технология получения растворов гуминовых веществ из торфа различного ботанического состава и степени разложения / Д. В. Дудкин, И. М. Федяева // Химия растительного сырья. – 2018. – № 2. – С. 175 – 182. doi: 10.14258/jcprgm.2018023356
9. Суворов, В. И. Пористая структура торфа / В. И. Суворов // Тр. Инсторфа. – 2011. – № 3. – С. 12 – 27.
10. Intensification of Humic Acid Extraction by Pulse Flow of Vermicompost and Sapropel Slurries / M. Promtov, A. Stepanov, A. Aleshin, M. Kolesnikova // Chemical Engineering Research and Design. – 2016. – Vol. 108. – P. 217 – 221. doi: 10.1016/j.cherd.2016.03.013
11. Промтов, М. А. Кинетика экстрагирования гуминовых и фульвокислот в роторном импульсном аппарате / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 265 – 273. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.265-273
12. Промтов, М. А. Экстрагирование гуминовых и фульвовых кислот из торфа и биогумуса в роторном импульсном аппарате (часть I) / М. А. Промтов, А. В. Алешин, А. Ю. Степанов // Южно-Сибирский науч. вестник. – 2017. – № 4 (20). – С. 7 – 12.
13. Промтов, М. А. Экстрагирование гуминовых и фульвовых кислот из торфа и биогумуса в роторном импульсном аппарате (часть II) / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов // Южно-Сибирский науч. вестник. – 2018. – № 2 (22). – С. 28 – 32.
14. Промтов, М. А. Интенсификация процесса экстрагирования в роторном импульсном аппарате с профилированным ротором / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 86 – 91. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.086-091
15. Промтов, М. А. Кинетика совмещенных процессов диспергирования и экстракции гуминовых и фульвовых кислот из торфа и биогумуса в роторном импульсном аппарате / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов // Химия растительного сырья. – 2019. – № 2. – С. 261 – 269. doi: 10.14258/jcprgm.2019024536
16. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах : физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
17. Ландау, Л. Д. Механика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Гос. изд-во техн.-теорет. литературы, 1953. – 788 с.
18. Колмогоров, А. Н. Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности / А. Н. Колмогоров // ДАН СССР. – 1941. – Т. 32. – С. 19 – 21.
19. Обухов, А. М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока / А. М. Обухов // Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая. – 1941. – Т. 5, № 4-5. – С. 455 – 458.

20. Романков, П. Г. Массообменные процессы химической технологии (системы с твердой фазой) / П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская, В. Ф. Фролов. – Л. : Химия, 1975. – 336 с.

21. Аксельруд, Г. А. Экстрагирование (система твердое тело – жидкость) / Г. А. Аксельруд, В. М. Лысянский. – Л. : Химия, 1974. – 256 с.

Criteria Dependences to Calculate the Process of Extracting Humic Acids from Peat and Vermicompost in a Rotary Pulse Apparatus

M. A. Promtov, A. Yu. Stepanov

Department of Technological Processes, Apparatus and Technosphere Safety, mpromtov@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: biohumus; humic acids; mass transfer coefficient; rotary pulse apparatus; peat; extraction.

Abstract: The regularities of the process of extraction of humic acids (HA) from peat and vermicompost in a rotary pulse apparatus (RPA) have been investigated. It was found that to calculate the mass transfer coefficient, it is necessary to determine the specific power and the values of the Prandtl diffusion criterion; with an increase in the time (number of cycles) of suspension treatment in the RPA, the calculated values of the Prandtl criterion increase and the mass transfer coefficient decreases; the mass transfer coefficient increases with an increase in the specific power consumed for the extraction of HA from peat and vermicompost in the RPA. On the basis of experimental studies, the coefficients in the criterion equation for the process of HA extraction from peat and vermicompost in RPA have been determined.

References

1. Kim H. Tan. *Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies*, New-York: Marcel Dekker Inc., 2014, 371 p.

2. Davies G., Ghabbour E.A. *Humic Substances: Structures, Properties and Uses*, Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1998, 272 p.

3. Bratishko K.A., Zykova M.V., Ivanov V.V., Buyko Ye.Ye., Drygunova L.A., Per-minova I.V., Belousov M.V. [Humic acids of peat - promising biologically active substances with antioxidant activity for the development of protective agents], *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2021, no. 1, pp. 287-298, doi:10.14258/jcprm.2021018784. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Naumova G.V., Ovchinnikova T.F., Zhmakova N.A., Makarova N.L. [Changes in the biological activity of humic acids during their oxidative-hydrolytic destruction], *Prirodopol'zovaniye* [Nature management], 2001, no. 7, pp. 123-125. (In Russ.)

5. Yefanov M.V., Novozhenov V.A., Frankivskiy V.N. [Oxidative ammonolysis of peat in conditions of cavitation treatment], *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2010, no. 1, pp. 165-169. (In Russ.)

6. Sokolov G.A., Smirnova V.V., Bambalov N.N., Tsvirko L.Yu. [Influence of hydrodynamic cavitation on the output of humic substances from peat], *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk* [News of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Science Series], 2010, no. 4, pp. 112-117. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Moskalenko T.V., Mikheyev V.A., Danilov O.S. [Structural transformations of humic acids of peat during extraction under the influence of magnetic and ultrasonic fields], *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2011, no. 4, pp. 283-286. (In Russ.)
8. Dudkin D.V., Fedyayeva I.M. [Low-waste technology for obtaining solutions of humic substances from peat of various botanical composition and degree of decomposition], *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2018, no. 2, pp. 175-182, doi: 10.14258/jcprm.2018023356 (In Russ.)
9. Suvorov V.I. [The porous structure of peat], *Trudy Instorfa* [Proceedings of the Institute], 2011, no. 3, pp. 12-27. (In Russ.)
10. Promptov M., Stepanov A., Aleshin A., Kolesnikova M. Intensification of Humic Acid Extraction by Pulse Flow of Vermicompost and Sapropel Slurries, *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, vol. 108, pp. 217-221, doi: 10.1016/j.cherd.2016.03.013
11. Promptov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. [Kinetics of extraction of humic and fulvic acids in a rotary impulse apparatus], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 265-273, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.265-273 (In Russ., abstract in Eng.)
12. Promptov M.A., Aleshin A.V., Stepanov A.Yu. [Extraction of humic and fulvic acids from peat and vermicompost in a rotary pulse apparatus (part I)], *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South Siberian Scientific Bulletin], 2017, no. 4 (20), pp. 7-12. (In Russ.)
13. Promptov M.A., Stepanov A.Yu. [Extraction of humic and fulvic acids from peat and vermicompost in a rotary pulse apparatus (part II)], *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South Siberian Scientific Bulletin], 2018, no. 2 (22), pp. 28-32. (In Russ.)
14. Promptov M.A., Stepanov A.Yu. [Intensification of the extraction process in a rotary impulse apparatus with a profiled rotor], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 86-91, doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.086-091 (In Russ., abstract in Eng.)
15. Promptov M.A., Stepanov A.Yu. [Kinetics of combined processes of dispersion and extraction of humic and fulvic acids from peat and biohumus in a rotary pulse apparatus], *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2019, no. 2, pp. 261-269, doi: 10.14258/jcprm.2019024536 (In Russ., abstract in Eng.)
16. Braginskiy L.N., Begachev V.I., Barabash V.M. *Peremeshivaniye v zhidkikh sredakh: fizicheskiye osnovy i inzhenernyye metody rascheta* [Mixing in liquid media: physical foundations and engineering methods of calculation], Leningrad: Khimiya, 1984, 336 p. (In Russ.)
17. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Mekhanika sploshnykh sred* [Mechanics of continuous media], Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1953, 788 p. (In Russ.)
18. Kolmogorov A.N. [Energy dissipation at locally isotropic turbulence], *DAN SSSR* [DAN SSSR], 1941, vol. 32, pp. 19-21. (In Russ.)
19. Obukhov A.M. [On the distribution of energy in the spectrum of turbulent flow], *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya* [Izvestiya AN SSSR. Geographical and geophysical series], 1941, vol. 5, no. 4-5, pp. 455-458. (In Russ.)
20. Romankov P.G., Rashkovskaya N.B., Frolov V.F. *Massoobmennyye protsessy khimicheskoy tekhnologii (sistemy s tverdoy fazoy)* [Mass exchange processes of chemical technology (systems with a solid phase)], Leningrad: Khimiya, 1975, 336 p. (In Russ.)
21. Aksel'rud G.A., Lysyanskiy V.M. *Ekstragirovaniye (sistema tverdoye telo – zhidkost')* [Extraction (solid-liquid system)], Leningrad: Khimiya, 1974, 256 p. (In Russ.)

Kriterialabhängigkeiten für die Berechnung des Prozesses der Extraktion von Huminsäuren aus Torf und Wurmkompost in einem Drehimpulsgerät

Zusammenfassung: Es sind die Gesetzmäßigkeiten des Extraktionsprozesses von Huminsäuren (HS) aus Torf und Wurmkompost in einem Rotationsimpulsapparat (RIA) untersucht. Es ist festgestellt, dass zur Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten die spezifische Leistung und die Werte des Prandtl-Diffusionskriteriums bestimmt werden müssen; bei der Vergrößerung der Zeit (der Zykluszeit) der Bearbeitung der Suspension in RIA steigen die Prandtl-Kriterien an und sinkt der Koeffizient der Massenabgabe, die für die Extraktion von Huminsäuren aus Torf und Wurmkompost in RIA angewendet wird. Auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen sind die Koeffizienten in der Kriterialgleichung für den Prozess der HS-Extraktion aus Torf und Wurmkompost in RIA bestimmt.

Dépendances de critère pour le calcul du processus d'extraction des acides humiques à partir de tourbe et de biohumus dans un appareil rotatif à impulsions

Résumé: Sont étudiés les modèles du processus d'extraction des acides humiques (AG) à partir de tourbe et de biohumus dans un appareil à impulsions rotatives (AIR). Est établi que pour calculer du coefficient de perte de masse, il est nécessaire de déterminer la puissance spécifique et les valeurs du test de diffusion de Prandtl; avec l'augmentation temporelle (qualité des cycles), du traitement de la suspension en AIR les calculs de Prandtl augmentent et le coefficient de transfert de masse diminue; le coefficient de transfert de masse augmente avec l'augmentation de la puissance spécifique consommée pour l'extraction à partir de tourbe et de biohumus en AIR. A la base d'études expérimentales, sont déterminés les coefficients dans l'équation de critère pour le processus d'extraction de AC de la tourbe et du biohumus dans AIR.

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, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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