

На правах рукописи



СТЕПАНОВ Андрей Юрьевич

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА
ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ
В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ**

Специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2014

Работа выполнена на кафедре «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»).

Научный руководитель

Промтов Максим Александрович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Баранов Дмитрий Анатольевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
машиностроительный университет (МАМИ)»,
заведующий кафедрой «Процессы и аппараты
химической технологии»

Казуб Валерий Тимофеевич,
доктор технических наук, профессор,
Пятигорский медико-фармацевтический
институт – филиал ГБОУ ВПО «Волгоградский
государственный медицинский университет»,
заведующий кафедрой «Физика и математика»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»

Защита состоится 26 декабря 2014 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 в ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ФГБОУ ВПО «ТГТУ», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.260.02.

Электронная почта d.sov21202@tstu.ru, факс (4752)-63-20-24.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «ТГТУ», с авторефератом диссертации – на официальном сайте ФГБОУ ВПО «ТГТУ» <http://www.tstu.ru> и ВАК Минобрнауки РФ <http://www.vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Нечаев Василий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Гуминовые кислоты (ГК) применяются как составляющие красителей, ингибиторов коррозии, лекарственных препаратов, буровых растворов, стимуляторов роста растений. Разработка технологий и оборудования для интенсификации процесса экстрагирования ГК в водные растворы из различного гуматосодержащего сырья имеет большую актуальность для химической, пищевой, фармацевтической, аграрной и других отраслей промышленности.

Перспективным научно-техническим направлением является разработка высокоэффективных аппаратов с многофакторным воздействием на обрабатываемую среду за счет дискретного ввода в рабочую зону импульса энергии большой плотности. К оборудованию, реализующему импульсное воздействие для процессов экстрагирования, относят роторные импульсные аппараты (РИА), принцип работы которых основан на нестационарности потоков энергии и вещества. Для интенсификации процесса экстрагирования ГК актуально совершенствование и научное обоснование методов расчета основных характеристик РИА, исследование комплексного воздействия РИА на суспензию гуматосодержащего сырья, разработка технологий и оборудования.

Цель работы – исследование и интенсификация процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате.

Задачи исследования:

- анализ процесса экстрагирования в роторном импульсном аппарате для интенсификации процесса экстрагирования гуминовых кислот из гуматосодержащего сырья;
- анализ методов расчета, разработка и применение программных продуктов для расчета параметров роторного импульсного аппарата, влияющих на интенсивность процесса экстрагирования;
- экспериментальные исследования и уточнение кинетических закономерностей процесса экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса в роторном импульсном аппарате;
- разработка новых конструкций роторных импульсных аппаратов для интенсификации процесса экстрагирования;
- экспериментальные исследования и разработка технологии экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса и получения жидких гуминовых удобрений.

Научная новизна. Разработана и экспериментально подтверждена технология экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса с получением жидких гуминовых удобрений.

Экспериментально определены коэффициенты критериального уравнения для расчета массопередачи в процессе экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса в РИА.

Для расчета производительности и мощности РИА определен вид поправочной функции и эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние центробежных сил и вязкости на течение жидкости в полости ротора.

Впервые экспериментально исследовано влияние обработки суспензии гуминовых удобрений в РИА на клетки бактерий, спор и мицелия грибов, микроскопических грибов, которое показало их многократное снижение.

Практическая значимость. Доказана эффективность применения РИА для интенсификации процесса экстрагирования ГК из биогумуса.

Разработана программа расчета на ЭВМ полей скоростей и давления в РИА (Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010612236).

Разработаны новые конструкции РИА для обработки суспензий, защищенные патентами РФ на полезную модель № 130877 и 147138.

Рекомендации по соотношению основных параметров РИА ($5 \leq l_{p,c} / a_{p,c} \leq 10$; $250 \leq R_p / \delta \leq 1250$; $5 \leq h_{p,c} / a_{p,c} \leq 15$; $144 \leq z / R_p \leq 480$) используются для изготовления и эксплуатации РИА в ООО «Амальтеа-Сервис» (Москва).

Разработана технологическая схема и даны рекомендации по соотношению твердой и жидкой фаз суспензии ($4 \leq L / G \leq 10$) для процесса экстрагирования ГК из биогумуса, принятые к внедрению в ООО «Биогумус» (Тамбов).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены на восьми международных научных конференциях.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 29 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 патента и свидетельство на программу для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация включает введение, четыре главы, основные выводы и результаты, список литературы (147 наименований) и приложения. Работа изложена на 121 странице основного текста, содержит 64 рисунка, 5 таблиц и 11 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи научного исследования.

В **первой главе** представлен анализ процесса экстрагирования в РИА, описаны методы экстрагирования ГК из гуматосодержащего сырья, выполнен анализ методик расчета основных характеристик РИА (расход жидкости, мощность для вращения ротора, скорость и ускорение потока жидкости).

Во **второй главе** дается анализ процесса экстрагирования в РИА. Для экстрагирования в системе «твердое–жидкость» в условиях интенсивного смешения и высокоскоростных режимов движения фаз относительно друг друга, характерных для РИА, коэффициент массоотдачи рассчитывается по известной формуле

$$\beta = 0,267 \epsilon^{0,25} Sc^{-0,75}. \quad (1)$$

Для определенного вида суспензии и извлекаемого вещества критерий Шмидта Sc изменяется в очень малом диапазоне. Для увеличения коэффициента массоотдачи необходимо увеличивать удельную энергию ϵ .

В процессе экстрагирования основное воздействие на обрабатываемую суспензию происходит в зазоре между ротором и статором и в канале статора РИА.

Удельная энергия импульса давления в объеме суспензии в канале статора в период его совмещения с каналом ротора, определяется по формуле

$$\epsilon_1 = \left[S_0 \int_0^{t_1} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 dt \right] / \left[2\pi \omega t_2 \int_0^{t_1} V(t) dt \right]. \quad (2)$$

Удельная энергия импульса давления зависит в основном от скорости и ускорения потока жидкости в канале статора, длительности времени совмещения канала ротора с каналом статора, времени перекрытия канала статора.

Удельная энергия в зазоре между ротором и статором определяется по формуле

$$\epsilon_2 = N / (\rho v_1), \quad (3)$$

где $v_1 = 2\pi h \delta (R_p + \delta/2)$ – объем зазора между ротором и статором, m^3 .

Формула для определения затрат мощности может быть записана в виде

$$N = A \operatorname{Re}_{\text{ц}}^{-B} \left(\frac{\delta}{R_p} \right)^{0,2} \left(\frac{az}{R_p} \right)^{0,7} \omega^3 \rho R_p^4 h_p, \quad (4)$$

где $A = k_1 \mu / \rho$; $B = k_2 \mu / \rho$.

Эмпирические коэффициенты A и B зависят от конструктивного исполнения ротора, вязкости и плотности жидкости.

Удельная энергия в зазоре между ротором и статором зависит от радиуса ротора, угловой скорости ротора, величины зазора, количества каналов в роторе и статоре, вязкости и плотности жидкости, высоты ротора. Наибольшее влияние на удельную энергию в зазоре оказывает величина скорости совмещения канала ротора с каналом статора $(\omega R_p)^3$.

Суммарные удельные энергозатраты при обработке жидкости в активных зонах РИА определяются по формуле

$$\varepsilon = z\varepsilon_1 + \gamma\varepsilon_2, \quad (5)$$

где γ – коэффициент, зависящий от конструкции аппарата и показывающий соотношение транзитного расхода жидкости через зазор и расхода жидкости через каналы ротора и статора при их совмещении.

Коэффициент γ можно определить при сравнении расхода жидкости для полностью совмещенных каналов ротора и статора и перекрытых каналов ротора и статора при подаче жидкости в аппарат от внешнего насоса.

По аналогии с методикой, используемой для расчета процесса экстрагирования из твердого в жидкость в электроимпульсных аппаратах, уравнение массопередачи по жидкой фазе может быть представлено в виде

$$dM = Ldc = K_c(c_p - c)dSdt = K_{cv}(c_p - c)V_{ж}dt. \quad (6)$$

Коэффициент массопередачи для жидкой фазы K_{cv} i -го концентрационного интервала (цикла обработки) определяется по формуле

$$K_{cv_i} = \frac{L(c_{ki} - c_{ni})}{t_i \Delta c_{cpi} V_{ж}}, \quad (7)$$

где $\Delta c_{ni} = c_p - c_{ni}$; $\Delta c_{ki} = c_p - c_{ki}$; $L = V_{ж} \rho$; $\Delta c_{cpi} = (\Delta c_{ni} - \Delta c_{ki}) / \ln(\Delta c_{ni} / \Delta c_{ki})$.

В качестве равновесной концентрации c_p принимается предельное значение концентрации ГК в жидкости для конкретных условий процесса экстрагирования.

На основе анализа закономерностей экстрагирования ГК в РИА критериальное уравнение для расчета коэффициента массопередачи можно представить в виде

$$\operatorname{Sh}_v = A \operatorname{Sc}^e \operatorname{Re}^g \left(\frac{L}{G} \right)^b \left(\frac{t}{t_1} \right)^f, \quad (8)$$

где $\operatorname{Re} = \omega R_p a \rho / \mu$; $\operatorname{Sh}_v = K_{cv} d_{cp}^2 / (D_{эф} \rho)$.

На основе анализа уравнения (8) можно сделать вывод, что коэффициент массопередачи зависит в основном от скорости совмещения канала ротора с каналом статора (ωR_p) , характерного размера каналов ротора и статора a и времени генерирования импульса давления в канал статора t_1 . Коэффициенты в критериальном уравнении (8) определяются на основании экспериментальных исследований.

Для расчета кинетических уравнений процесса экстрагирования в РИА необходим расчет скорости и ускорения потока жидкости в канале статора. Течение потока жидкости в каналах РИА можно описать системой уравнений Навье–Стокса и неразрывности потока. Частным случаем уравнений Навье–Стокса является уравнение Бернулли.

Для расчета скорости и ускорения потока жидкости в каналах ротора и статора на основе системы уравнений Навье–Стокса и неразрывности использовались программные продукты FlexPDE и ANSYS CFX. Известное нестационарное уравнение Бернулли решалось численным методом Рунге–Кутты. Для реализации этих методов была разработана специальная компьютерная программа (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010612236 «Программа расчета полей скоростей и давлений потоков жидкости в каналах роторного импульсного аппарата»).

По разработанному сценарию программный продукт FlexPDE (свободный доступ) производит операции, необходимые для преобразования системы дифференциальных уравнений в частных производных в модель для расчета методом конечных элементов и представления результатов расчета в графической форме.

На рисунке 1 поясняются геометрические параметры модели каналов ротора и статора в двухмерной системе координат. Задача решалась при следующих граничных условиях: $P = P_p + P_{\text{ц}}$ – давление на входе жидкости в каналы ротора; $P = P_c$ – на выходе из канала статора; $V_x = 0$, $V_y = 0$ – скорость на поверхностях каналов ротора и статора и в зазоре между ротором и статором (границы участков показаны на рис. 1 утолщенной линией). На рисунке 2 представлен пример поля скорости в каналах РИА, рассчитанного программой FlexPDE.

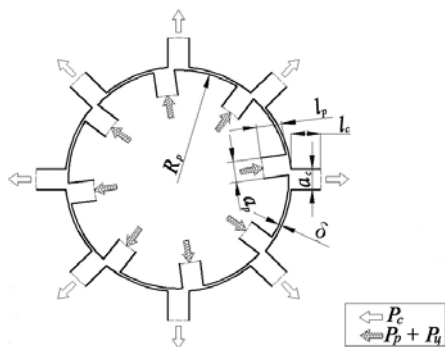


Рис. 1. Геометрические параметры каналов ротора и статора

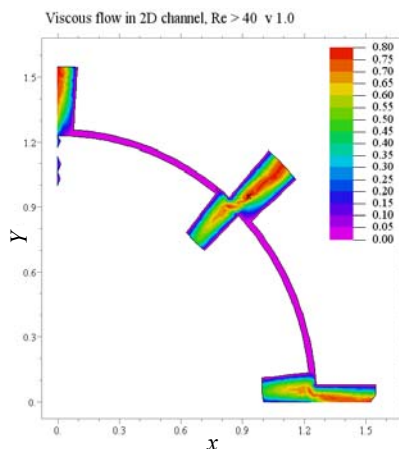


Рис. 2. Пример поля скоростей в каналах РИА, рассчитанного программой FlexPDE

Программный продукт ANSYS CFX (Лицензионное соглашение № 616773 между CADCAD-CIS и ФГБОУ ВПО «ТГТУ») основан на методе контрольных объемов, дающем высокую точность и использующем вычислительный блок по давлению. Вычислительный блок ANSYS CFX использует сетку конечных элементов (числовые значения в узлах сетки) и формирует уравнения для конечных объемов, которые обеспечивают сохранение значений потока. На рисунке 3 представлен пример результата расчета объемного поля скорости в каналах ротора и статора РИА в системе ANSYS.

Используя данные скорости, ускорения и давления потока жидкости в каналах статора, полученные на основе решения уравнения Бернулли численным методом и программными продуктами FlexPDE и ANSYS CFX при одинаковых геометрических и технологических параметрах, был выполнен анализ точности их решения. Изменение скорости и ускорения потока жидкости в канале статора от времени показаны на рис. 4.

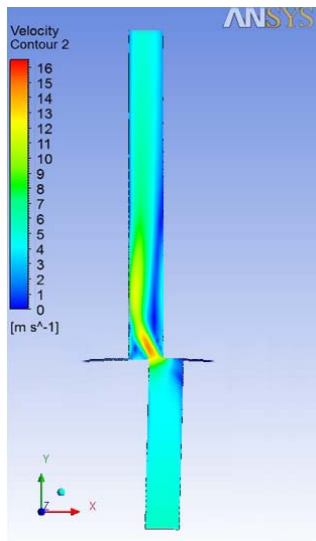


Рис. 3. Пример поля скоростей в каналах РИА, рассчитанного программой ANSYS

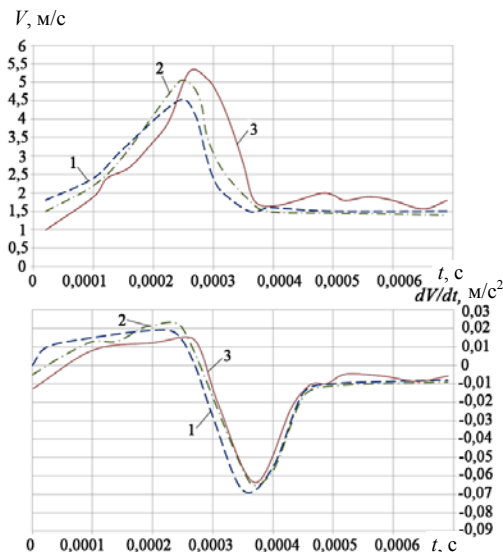


Рис. 4. Изменение скорости и ускорения потока жидкости во времени:

1 – численное решение уравнения Бернулли;
2 – решение уравнений Навье–Стокса программным продуктом ANSYS CFX; 3 – экспериментальные данные

Анализ результатов, представленных на рис. 4, показывает, что разница в результатах расчета скорости и ускорения потока жидкости в канале статора РИА при численном решении уравнения Бернулли и при решении уравнений Навье–Стокса программным продуктом ANSYS CFX не превышает 10%. Точные данные скорости и давления в каналах ротора и статора по времени и координатам позволяет получить программный продукт ANSYS.

Рекомендации по выбору основных параметров и характеристик РИА используются для изготовления и эксплуатации РИА в ООО «Амальтеа-Сервис» (Москва).

На основе анализа зависимостей скорости и ускорения потока жидкости в канале статора установлено, что наибольшее влияние на гидродинамические параметры потока имеет скорость совмещения канала ротора с каналом статора ωR_p , величина зазора между ротором и статором δ , давление на входе в канал ротора P_p .

На рисунке 5 показана зависимость удельной энергии ϵ от параметров ωR_p и δ . На рисунке 6 показан график зависимости коэффициента массоотдачи от диссипации энергии в канале статора. На основе анализа зависимостей $\epsilon = f(\omega R_p, \delta, \beta)$ можно сделать вывод, что уменьшение величины зазора между ротором и статором δ и увеличе-

ние скорости совмещения канала ротора с каналом статора ωR_p приводят к увеличению величины удельной энергии ϵ и увеличению коэффициента массоотдачи для процесса экстрагирования целевого компонента из твердой фазы в жидкость β .

При увеличении скорости совмещения канала ротора с каналом статора уменьшается время генерирования импульса давления и время нахождения объема жидкости в канале статора, что способствует увеличению удельной энергии в объеме суспензии и росту коэффициента массоотдачи.

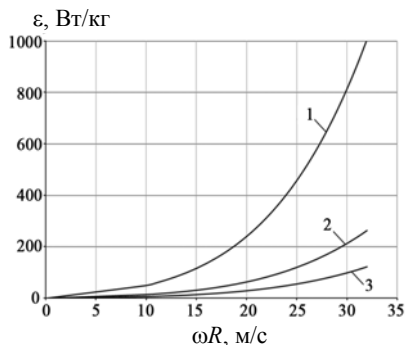


Рис. 5. Зависимость удельной энергии от линейной скорости совмещения каналов ротора и статора при различной величине зазора между ротором и статором:

1 - $\delta = 0,0001$ м; 2 - $\delta = 0,0002$ м; 3 - $\delta = 0,0003$ м

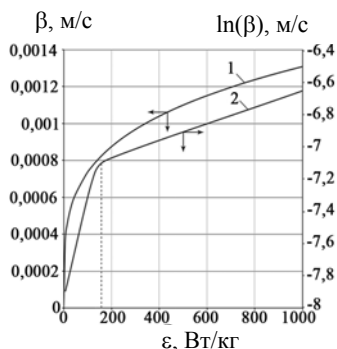


Рис. 6. Зависимость коэффициента массоотдачи β от удельной энергии ϵ :

1 - $\beta = f(\epsilon)$;

2 - $\ln(\beta) = f(\epsilon)$

В третьей главе дано описание экспериментального стенда и представлены результаты исследований по определению эмпирических коэффициентов критериальных уравнений процесса экстрагирования гуминовых кислот в РИА.

Для определения эмпирических коэффициентов в уравнении (8) были проведены экспериментальные исследования экстрагирования ГК из биогуруса в РИА, результаты которых показаны на рис. 7.

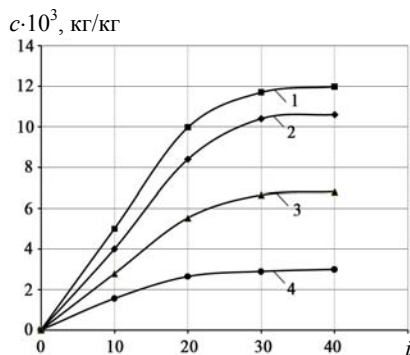


Рис. 7. Изменение концентрации ГК в водном растворе в зависимости от количества циклов обработки в РИА:

1 - $L/G = 4$; 2 - $L/G = 5$; 3 - $L/G = 10$; 4 - $L/G = 15$

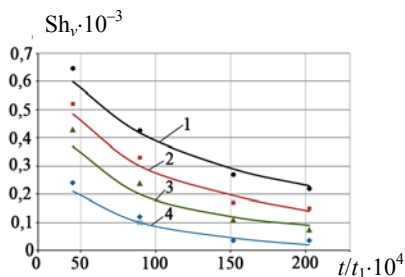


Рис. 8. Зависимость числа Шервуда от безразмерного времени экстрагирования:

1 - $L/G = 4$; 2 - $L/G = 5$; 3 - $L/G = 10$; 4 - $L/G = 15$.

Точки - экспериментальные данные

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных позволил установить коэффициенты A, b, e, g, f для уравнения (8).

$$\text{Sh}_v = 193 \cdot 10^{-6} \text{Sc}^{0,33} \text{Re}^{0,7} \left(\frac{L}{G} \right)^{-1,73} \left(\frac{t}{t_1} \right)^{-0,52}; \quad (9)$$

$$\text{Re} = (1,2 \dots 26) \cdot 10^3; \quad L/G = 4 \dots 15; \quad t/t_1 = (50 \dots 200) \cdot 10^4.$$

На рисунке 8 показана расчетная зависимость модифицированного числа Шервуда по уравнению (8) и точки, полученные на основе экспериментальных данных по уравнению $\text{Sh}_v = K_{cv} d_{cp}^2 / (D_{эф} \rho)$. Уравнение (9) удовлетворительно описывает процесс экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса в воду, реализуемый в РИА. Расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 10%.

Для реализации процесса экстрагирования в РИА необходимо рассчитать производительность аппарата и потребляемую мощность.

Средний расход жидкости через один канал статора за время его совмещения с каналом ротора Q_1 и за время, когда канал статора перекрыт Q_2 , определяется по формулам:

$$Q_1 = \frac{1}{t_1} \left(\int_0^{t_1} Q(t) dt \right); \quad Q_2 = \frac{1}{t_2} \left(\int_0^{t_2} Q(t) dt \right); \quad Q(t) = V(t) S(t). \quad (10)$$

Общий расход через все z каналы статора и ротора $Q_{\text{полн}}$ равен

$$Q_{\text{полн}} = (Q_1 + Q_2) z^2 \omega / 2\pi. \quad (11)$$

Для учета центробежной силы и вязкости жидкости при ее течении в полости ротора без лопаток необходимо ввести поправочную функцию $f(\omega, R_p, \mu)$ для расчета расхода жидкости через РИА:

$$Q = Q_{\text{полн}} + f(\omega, R_p, \mu). \quad (12)$$

Поправочная функция $f(\omega, R_p, \mu)$ определяет влияние центробежных сил на течение жидкости в полости ротора без внутренних лопаток. Центробежные силы, действующие на жидкость внутри ротора, в основном зависят от радиуса ротора R_p и его угловой скорости вращения ω .

Экспериментальные исследования влияния параметров ω, R_p и μ позволили определить вид функции $f(\omega, R_p, \mu)$ для уравнения (12):

$$f(\omega R_p, \mu) = x_1 (\omega R_p)^3 + x_2 (\omega R_p)^2 + x_3 \omega R_p + x_4; \quad (13)$$

$x_1 = 3,5 \cdot 10^{-4}$; $x_2 = -0,02$; $x_3 = 0,25$; $x_4 = 1$ для $\mu = 0,001 \dots 0,030$ Па·с; $x_4 = 0,1$ для $\mu = 0,031 \dots 0,070$ Па·с; x_1, x_2, x_3, x_4 – эмпирические коэффициенты, учитывающие размерность и влияние ω, R_p и μ на Q .

Зависимости расхода жидкости от линейной скорости совмещения канала ротора с каналом статора ωR_p показаны на рис. 9

Важной характеристикой РИА является потребляемая мощность для вращения ротора без учета механических потерь, которую можно представить формулой (4).

Результаты расчета по формуле (4) сопоставляли с экспериментальными данными для определения эмпирических коэффициентов $A = k_1\mu/\rho$; $B = k_2\mu/\rho$:

– для жидкостей с $\mu = 0,001 \dots 0,030$ Па·с

$$k_1 = 8,5 \cdot 10^9, \quad k_2 = 3,6 \cdot 10^5;$$

– для жидкостей с $\mu = 0,031 \dots 0,070$ Па·с

$$k_1 = 2,45 \cdot 10^{10}, \quad k_2 = 1,73 \cdot 10^4.$$

Зависимости потребляемой мощности от линейной скорости совмещения канала ротора с каналом статора ωR_p показаны на рис. 9.

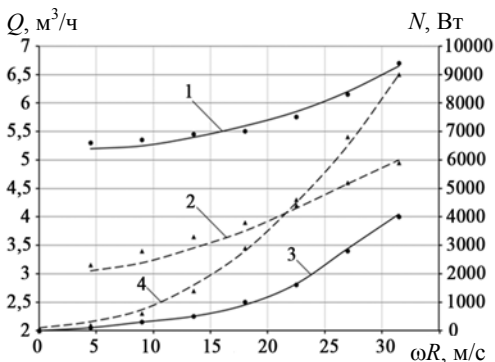


Рис. 9. Зависимость расхода жидкости (кривые 1, 2) и потребляемой мощности (кривые 3, 4) от линейной скорости ротора:
 1, 3 — вода
 ($\mu = 0,0018$ Па·с, $\rho = 1000$ кг/м³);
 2, 4 — масло
 ($\mu = 0,059$ Па·с, $\rho = 930$ кг/м³).
 Точки — экспериментальные данные, линии — расчет

В четвертой главе описаны новые конструкции РИА и технология экстрагирования ГК из биогумуса для получения жидких гуминовых удобрений

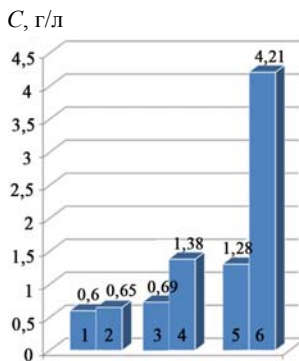
При обработке суспензий в РИА одна из существенных проблем — это заклинивание ротора при налипании твердых частиц на рабочие поверхности ротора и статора. Необходимы конструкции РИА, позволяющие регулировать зазор между ротором и статором без разборки аппарата, обеспечивать высокую скорость и ускорение потока жидкости в каналах ротора и статора. Разработан и запатентован РИА дискового типа с наклонными каналами в дисках ротора и статора. Для снижения гидравлического сопротивления в каналах ротора и статора их оси отклонены от центральной оси дисков статора и ротора на угол $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, а также отклонены в сторону, противоположную направлению вращения, от радиального луча, перпендикулярного центральной оси дисков статора и ротора, на угол $0^\circ < \beta < 90^\circ$.

Разработана и запатентована конструкция РИА, в которой на торцевых стенках ротора с внутренней стороны выполнены торообразные выступы и впадины. Пульсации давления и скорости потока в радиальном направлении при движении жидкости в роторе вызывают вихреобразования и кавитацию в полости ротора. Интенсивная гидродинамическая обработка жидкости внутри полости ротора повышает эффективность обработки жидкости.

Проведены экспериментальные исследования по экстрагированию ГК в воду и приготовлению жидких гуминовых удобрений в установке на базе РИА, исследовано расслоение суспензии жидких гуминовых удобрений. В результате проведенных экспериментов по экстрагированию ГК из биогумуса в РИА и в аппарате с ленточной мешалкой получены данные по выходу ГК (рис. 10).

Рис. 10. Концентрация гуминовых кислот в воде при обработке суспензии биогумуса:

обработка в емкостном аппарате
с ленточной мешалкой: 1 – $pH = 7,5$, 2 – $pH = 12,6$;
обработка в РИА: 3 – $pH = 7,6$, $\omega R_p = 13$ м/с;
4 – $pH = 12,5$, $\omega R_p = 13$ м/с;
5 – $pH = 7,6$, $\omega R_p = 39$ м/с;
6 – $pH = 12,5$, $\omega R_p = 39$ м/с



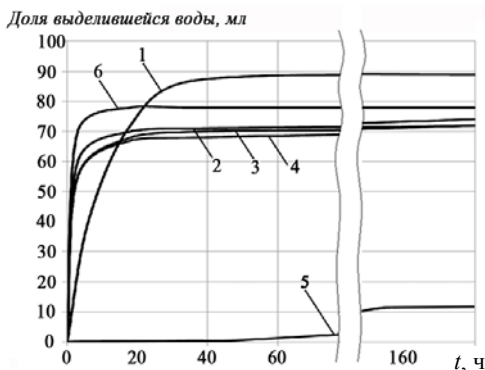
Анализируя данные на рис. 10, можно сделать вывод, что в РИА процесс экстракции ГК происходит интенсивнее. При экстрагировании ГК из биогумуса в водно-щелочной раствор ($pH = 12,5$) концентрация ГК составила 4,21 г/л. При обработке в аппарате с ленточной мешалкой концентрация ГК составила 0,65 г/л.

Выход ГК при обработке водно-щелочной суспензии биогумуса в РИА в 6,5 раз выше по сравнению с экстрагированием в емкостном аппарате с ленточной мешалкой. Выход ГК при обработке водной суспензии биогумуса (без добавления щелочи) в 2,2 раза выше по сравнению с экстрагированием в емкостном аппарате с ленточной мешалкой. Совместные механическое, гидродинамическое и химическое воздействия на суспензию биогумуса при обработке в РИА дают синергетический эффект для интенсификации процесса экстрагирования ГК.

Графики расслоения образцов гуминовых удобрений из суспензии биогумуса показаны на рис. 11. При обработке суспензии биогумуса в РИА наблюдается меньшее выделение воды в суспензии по сравнению с суспензией, обработанной ленточной мешалкой. Средний размер частиц обработанной суспензии биогумуса не превышает 10 мкм.

Рис. 11. Процесс выделения воды в суспензии биогумуса, обработанной в аппаратах:

1 – емкость с ленточной мешалкой ($\omega R_m = 0,8$ м/с); 2 – РИА ($\omega R_p = 13$ м/с);
3 – РИА ($\omega R_p = 26$ м/с);
4 – РИА ($\omega R_p = 39$ м/с);
5 – РИА ($\omega R_p = 39$ м/с), водно-щелочной раствор;
6 – емкость с ленточной мешалкой ($\omega R_m = 0,8$ м/с), водно-щелочной раствор



Одной из проблем при производстве жидких гуминовых удобрений (ГУ) из торфа и биогумуса является присутствие в растворе готовой продукции живых клеток бактерий и спор грибов. При длительном хранении ГУ такие микроорганизмы способны

активно расти и размножаться. Их развитие и накопление продуктов жизнедеятельности могут приводить к снижению качества готовой продукции. Удобрение на основе торфа выбрали для исследования по обеззараживанию жидких ГУ, как содержащее большое количество спор грибов и бактерий по сравнению с удобрениями на основе биогумуса.

При анализе пробы суспензии ГУ после пяти циклов обработки в РИА установлено, что содержание клеток бактерий – кокки и бактерий – палочки в пробах ГУ многократно уменьшилось. Обработка в РИА суспензии ГУ на основе торфа также способствует снижению численности грибных спор.

Эффективность дезинфицирующего действия обработки в РИА жидких ГУ была подтверждена сокращением общего содержания клеток бактерий, спор и мицелия грибов, а также уменьшением численности жизнеспособных микроскопических грибов. Применение РИА для интенсификации процесса экстрагирования ГК позволяет повысить их концентрацию в водной суспензии биогумуса и получить долгохранящиеся жидкие ГУ.

Разработана технология получения жидких ГУ из биогумуса. Разработанный РИА для производства жидких ГУ из биогумуса и рекомендации по процессу экстрагирования и приготовления водной дисперсии биогумуса приняты к внедрению в ООО «Биогумус» (Тамбов).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен анализ процесса экстрагирования в РИА и показана эффективность его применения для интенсификации процесса экстрагирования ГК из гуматосодержащего сырья.

2. Установлено, что для увеличения коэффициента массоотдачи и интенсификации процесса экстрагирования гуминовых кислот в РИА необходимо увеличивать удельную энергию в канале статора и в зазоре между ротором и статором РИА. Удельная энергия возрастает при увеличении скорости и ускорении потока жидкости в РИА.

3. Выполнен анализ методов расчета скорости, ускорения и импульсного давления потока жидкости в канале статора РИА с применением программных продуктов FlexPDE и ANSYS CFX и численным методом решения уравнения Бернулли. Установлено, что данные значений скорости и ускорения, адекватные экспериментальным данным, позволяют получить численный метод решения нестационарного уравнения Бернулли и программный продукт ANSYS CFX.

4. Разработан программный комплекс на базе программы расчета на ЭВМ полей скорости и давления в РИА (Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010612236), позволяющий определять в численном и графическом виде скорость, ускорение, давление потоков жидкости, а также расход и мощность.

5. Для расчета производительности и мощности РИА определен вид поправочной функции и эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние центробежных сил и вязкости на течение жидкости в полости ротора.

6. Уточнены критериальные зависимости расчета коэффициента массопередачи по жидкой фазе при экстрагировании ГК в РИА. Экспериментально получены коэффициенты критериального уравнения процесса экстрагирования ГК из биогумуса в РИА.

7. Разработаны новые конструкции РИА для процесса экстрагирования, защищенные патентами РФ на полезную модель № 130877 и 147138.

8. Рекомендации по соотношению основных параметров РИА ($5 \leq l_{p,c} / a_{p,c} \leq 10$; $250 \leq R_p / \delta \leq 1250$; $5 \leq h_{p,c} / a_{p,c} \leq 15$; $144 \leq z / R_p \leq 480$) используются для изготовления и эксплуатации РИА в ООО «Амальтеа-Сервис» (Москва).

9. Изучено влияние обработки в РИА суспензии ГУ на клетки бактерий, спор и мицелия грибов, а также микроскопических грибов. Дезинфицирующее действие обработки жидких ГУ в РИА было подтверждено многократным сокращением общего содержания клеток бактерий, спор и мицелия грибов, а также уменьшением численности жизнеспособных микроскопических грибов.

10. Разработана технологическая схема и даны рекомендации по соотношению твердой и жидкой фаз суспензии ($4 \leq L/G \leq 10$) для процесса экстрагирования ГК из биогумуса, принятые к внедрению в ООО «Биогумус» (Тамбов).

Условные обозначения:

β – коэффициент массоотдачи, м/с; δ – величина зазора между ротором и статором, м; ε – удельная энергия, Вт/кг; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; σ – удельная поверхность контакта фаз, м²/м³; ω – угловая скорость ротора, с⁻¹; a – характерный размер каналов статора и ротора, м; $b, e, g, f, n, m, k_1, k_2$ – эмпирические коэффициенты; c – концентрация целевого компонента в жидкой фазе, кг/(кг р-ра); c_p, c_n, c_k – равновесная, начальная и конечная концентрации экстрагируемого вещества в растворе, кг/(кг р-ра); d – характерный размер частиц, м; $D_{эф}$ – эффективный коэффициент диффузии, м²/с; G – масса твердой фазы, кг; i – концентрационный интервал, цикл; K_c – коэффициент массопередачи, кг р-ра/(с·м²); K_{cv_i} – коэффициент массопередачи по жидкой фазе (объемный), кг р-ра/(с·м³); L – масса жидкости, кг; N – затраты мощности на вращение ротора, Вт; $P_{ц}$ – центробежное давление, Па; P_c – давление на выходе из канала статора, Па; R_p – радиус внешней поверхности ротора, м; $Re = (vdp) / \mu$ – критерий Рейнольдса; $Re_{ц} = (\omega R_p^2 \rho) / \mu$ – центробежный критерий Рейнольдса; S – площадь поверхности контакта фаз, м²; $Sc = \mu / (\rho D_{эф})$ – критерий Шмидта; $Sh_v = K_{cv} d_{cp}^2 / (D_{эф} \rho)$ – число Шервуда по жидкой фазе; S_0 – площадь сечения канала статора, м²; t – время экстрагирования, с; t_1 – время совмещения каналов ротора с каналами статора, с; t_2 – время нахождения объема жидкости в канале статора, с; V – скорость жидкости в канале статора, м/с; $V_{ж}$ – объем жидкой фазы, м³; Q – расход жидкости, м³/с; w – скорость звука в жидкости, м/с.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Степанов, А. Ю.** Компьютерная система расчета роторного импульсного аппарата / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 83 – 88.
2. **Степанов, А. Ю.** Сравнительный анализ методов расчета роторного импульсного аппарата / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов // Вопросы современной науки практики. Университет им. Вернадского. – 2012. – № 3(41) – С. 365 – 370.
3. **Степанов, А. Ю.** Кавитационное обеззараживание жидких органических удобрений / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, А. В. Алешин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 899 – 904.
4. **Степанов, А. Ю.** Характеристики потока жидкости в каналах проточных гидродинамических статических кавитаторов / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, А. В. Алешин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 20, № 4. – С. 562 – 569.

Публикации в других изданиях:

5. **Степанов, А. Ю.** Технологический комплекс на базе роторного импульсного аппарата для приготовления жидких органических удобрений / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, А. В. Алешин // Химическая промышленность. – 2014. – Т. 91, № 1. – С. 27 – 29.
6. **Степанов, А. Ю.** Применение ANSYS для расчета гидродинамического смесителя / А. Ю. Степанов // ANSYS Advantage. – 2011. – № 15. – С. 61 – 63.
7. **Степанов, А. Ю.** Расчет основных параметров течения жидкости в роторном импульсном аппарате / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, М. В. Сундуков // ММТТ–23 : сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. – Саратов : Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2010. – Т. 8. – С. 168–169.
8. **Степанов, А. Ю.** Моделирование гидродинамики потока в статических смесителях / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, М. В. Сундуков // ММТТ–23 : сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. – Саратов : Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2010. – Т. 8. – С. 145 – 147.
9. **Степанов, А. Ю.** Моделирование течения потока жидкости в каналах роторного импульсного аппарата / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов // ММТТ–25 : сб. тр. XXV Междунар. науч. конф. – Волгоград : Изд-во Волг. гос. техн. ун-та, 2012. – Т. 10. – С. 56 – 58.
10. **Степанов, А. Ю.** Экстрагирование биологически активных веществ в дисперсии биогумуса при многофакторном воздействии / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, О. В. Ириков // Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термо-влажностная обработка материалов) СЭТТ–2011 : тр. IV Междунар. конф. – М. : Изд-во МГАУ. – Т. 2 – С. 91 – 94.
11. **Степанов, А. Ю.** Расчет параметров, характеризующих эффективность работы роторного импульсного аппарата / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, А. В. Алешин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ–26 : сб. тр. XXVI Междунар. науч. конф. – Саратов : Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2013. – Т. 8. – С. 145 – 147.
12. **Степанов, А. Ю.** Кавитационные технологии дезинфекции и очистки жидкостей / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, А. В. Алешин // Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2013. – Т. 4. – С. 219 – 227.

13. **Степанов, А. Ю.** Исследование гидродинамики и закономерности эмульгирования при течении потока жидкости через диск с каналами / А. Ю. Степанов, Н. А. Лунева // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2011. – Вып. II. – С. 344.
14. **Степанов, А. Ю.** Кавитационное обеззараживание жидкостей / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов // Решение региональных экологических проблем : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ИП Чеснокова А. В. – 2011. – С. 126 – 128.
15. **Степанов, А. Ю.** Воздействие кавитации на биогумус и гуминовые кислоты / А. Ю. Степанов, А. В. Алешин // Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем (Крестовские чтения) : тез. докл. VII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – Изд-во «Иваново», 2012. – С. 53–54.
16. **Степанов, А. Ю.** Обеззараживание жидкостей с использованием роторного импульсного аппарата / А. Ю. Степанов, А. В. Алешин, Г. В. Ионов // Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2013. – Т. 2. – С. 12 – 14.
17. **Степанов, А. Ю.** Экологические аспекты применения водо-топливных эмульсий / А. Ю. Степанов, А. В. Алешин, Г. В. Ионов // Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2013. – Т. 2. – С. 41 – 47.
18. **Степанов, А. Ю.** Интенсификация массообменных процессов в производстве биодизеля при помощи проточного гидродинамического смесителя / А. Ю. Степанов, А. В. Алешин, Г. В. Ионов // Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2013. – Т. 2. – С. 30 – 36.
19. **Степанов, А. Ю.** Моделирование течения потока жидкости в каналах роторного импульсного аппарата / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов // Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2013. – Т. 2. – С. 41 – 47.
20. **Степанов, А. Ю.** Исследование устойчивости к расслоению донного ила, обработанного в роторном импульсном аппарате / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, А. В. Алешин // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – Вып. IV. – С. 173 – 176.
21. **Степанов, А. Ю.** Экстрагирование гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате / А. Ю. Степанов, А. В. Алешин, Г. В. Ионов // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. ст. науч. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – С. 144 – 147.
22. **Степанов, А. Ю.** Экстрагирование гуминовых кислот из сапропеля в роторном импульсном аппарате / А. Ю. Степанов, А. В. Алешин // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. докл. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – Вып. V. – С. 210 – 212.
23. **Степанов, А. Ю.** Исследование гидромеханического воздействия на суспензию биогумуса в роторном импульсном аппарате / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, А. В. Алешин // ПРЭТ-2014 : Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново : Изд-во Иван. гос. хим.-технол. ун-та, 2014. – С. 489 – 492.
24. **Степанов, А. Ю.** Моделирование процесса экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса в роторном импульсном аппарате / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов,

А. В. Алешин // ММТТ–27 : сб. тр. Междунар. науч. конф. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2014. – Т. 8. – С. 157 – 159.

25. **Степанов, А. Ю.** Расчет коэффициента массотдачи процесса экстрагирования в роторном импульсном аппарате / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, А. В. Алешин // ММТТ–27 : сб. тр. Междунар. науч. конф. Т. 8. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2014. – С. 159 – 161.

26. **Степанов, А. Ю.** Расчет энергетических параметров роторного импульсного аппарата / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, А. В. Алешин // Междунар. конф. с элем. науч. школы. – Тамбов : Изд-во ИП Чеснокова А. В., 2014. – С. 118 – 120.

Патенты и свидетельство на программу для ЭВМ:

27. **Пат. 130877 Российская Федерация**, МПК В01F 7/00. Роторный импульсный аппарат [Текст] / Промтов М. А., Степанов А. Ю., Алешин А. В. ; заявитель и патентообладатель М. А. Промтов. – № 2013107869/05 ; заявл. 21.02.13 ; опубл. 10.08.13, Бюл. № 22 (II ч.). – 2 с. : ил. 3.

28. **Пат. 147138 Российская Федерация**, МПК В01F 7/28. Роторный импульсный аппарат [Текст] / Промтов М. А., Степанов А. Ю., Алешин А. В. ; заявитель и патентообладатель М. А. Промтов. – № 2014117787/05 ; заявл. 30.04.14.

29. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612236. Программа расчета полей скоростей и давлений в каналах роторного импульсного аппарата / А. Ю. Степанов, М. А. Промтов, М. С. Сундуков. – 25.03.2010.

Подписано в печать 24.10.2014.
Формат 60 × 84/16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 493

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел./факс (4752) 63-81-08, 63-81-33. E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru