

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ
В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ
С ПРОФИЛИРОВАННЫМ РОТОРОМ**

М. А. Промтов, А. Ю. Степанов

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

Ключевые слова: гуминовая кислота; кавитация; роторный импульсный аппарат; торф; фульвовая кислота; экстрагирование.

Аннотация: Выполнен анализ направлений повышения эффективности работы роторного импульсного аппарата (РИА). Геометрическая форма внутренней полости ротора в виде профиля трубки Вентури по радиальному направлению способствует увеличению интенсивности механической, гидродинамической и кавитационной обработки суспензии. Интенсивность кавитации для РИА с профилированной полостью ротора выше по сравнению с конструкциями с цилиндрической полостью ротора. Применение РИА с активной зоной гидромеханической обработки суспензии в полости ротора интенсифицирует процесс экстрагирования гуминовой и фульвовой кислот из торфа в водный раствор.

Обозначения

C – концентрация, кг/м ³ ;	V – скорость потока, м/с;
P_c, P_p, P_n – давления соответственно в канале статора, полости ротора и насыщенного пара жидкости, Па;	t – температура, °С;
	ρ – плотность жидкости, кг/м ³ ;
	χ – число гидродинамической кавитации.

Введение

Роторный импульсный аппарат (РИА) предназначен для структурных преобразований в жидкости на микро- и наноуровнях в целях изменения ее физико-химических параметров, интенсификации массообменных и гидромеханических процессов. Обработка жидкости в РИА осуществляется за счет импульсного многофакторного воздействия: пульсаций давления, интенсивной кавитации, вихреобразования, ударных волн и нелинейных гидроакустических эффектов [1].

Для повышения эффективности процесса экстрагирования целевых веществ из твердых частиц в жидкость необходимо предварительное измельчение частиц сырья. Интенсификация процесса экстрагирования в РИА является одним из перспективных направлений, так как в РИА реализуются ударно-сдвиговые, срезающие и кавитационные виды воздействия на частицы обрабатываемой суспензии, сопровождаемые измельчением и изменением структуры обрабатываемого материала, что значительно облегчает выход целевых веществ из частиц сырья.

В роторном импульсном аппарате можно выделить пять основных зон с активными гидродинамическими потоками: полость ротора, канал ротора, зазор между ротором и статором, канал статора, рабочая камера. Наиболее активными зонами РИА являются каналы ротора и статора, зазор между ротором и статором. В обрабатываемой суспензии в указанных активных зонах возникают большие пульсирующие сдвиговые и срезающие нагрузки, которые деформируют и измельчают частицы, клетки и капилляры в обрабатываемом сырье. В промежутки времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, в полости ротора возрастает давление, которое за короткий период времени сбрасывается. В момент совмещения каналов ротора с каналами статора, в них распространяется импульс давления [1, 2].

Твердые частицы до момента совмещения каналов ротора и статора находятся в канале ротора и прижимаются к его стенке за счет силы инерции, а также продавливаются в зазор между ротором и статором за счет перепада давления между полостью ротора и каналом статора. При вращении ротора и подаче жидкости в полость ротора под давлением, частицы двигаются вместе с потоком жидкости и проходят из канала ротора или зазора в канал статора.

Теоретическая часть

Повышение эффективности работы РИА можно достичь особой геометрией полости ротора аппарата и установкой дополнительных турбулизирующих элементов. Необходимо увеличить гидродинамическое и гидроакустическое воздействия РИА в полости ротора, так как она имеет большой объем и через эту зону проходит вся обрабатываемая жидкость. Движение жидкости в полости ротора носит сложный характер по спирали, так как ротор вращается с большой скоростью. Кроме того, поток жидкости пульсирует из-за периодического совмещения каналов ротора с каналами статора.

По сравнению с каналами ротора и статора, скорость потока жидкости в полости ротора невелика, так как для РИА радиального типа поток расходится по радиусу от центра ротора, и площадь проходного сечения значительно увеличивается по мере удаления от центра ротора по радиальной прямой. В связи с этим, скорость потока за счет перепада давления в радиальном направлении снижается. В противовес падению скорости потока в роторе, из-за увеличения площади проходного сечения, действует центробежная сила, которая существенно разгоняет центробежный поток в радиальном направлении.

Нами предложены конструктивные решения РИА, повышающие эффективность его работы за счет изменения конфигурации полости ротора [3, 4]. Предварительная обработка жидкости в полости ротора осуществляется за счет ее прохождения через профильный объем в его внутренней полости. Сечение внутренней полости ротора по радиальной прямой имеет профиль одного или нескольких последовательных сужений и расширений или форму профиля трубки Вентури [3, 4]. Профиль трубки Вентури широко применяется в технике и технологиях для создания кавитации в проходящем потоке жидкости. Эффективность развития кавитации при прохождении жидкости с закономерностями изменения давления и скорости потока, как это происходит при движении жидкости в трубке Вентури, значительно выше по сравнению с потоком, проходящим через профиль постоянного сечения.

В программе ANSYS проведен расчет скорости и давления жидкости в области пространства, ограниченной трехмерной моделью внутреннего объема РИА. Расчет параметров потока жидкости в РИА осуществлялся для следующих условий: $t = 25^{\circ}\text{C}$ – начальная температура обрабатываемой суспензии; $P_p = 4 \cdot 10^5$ Па – давление на входе в РИА; $P_c = 4 \cdot 10^4$ Па – давление на выходе из канала статора.

На рисунке 1 представлены результаты расчета скоростей потока жидкости в РИА. Скорость потока жидкости и давление в основных рабочих зонах РИА определялись по трем сечениям для РИА различных конструкций: в центральной части полости ротора (сечение I), каналах ротора (сечение II) и статора (сечение III), как показано на рис. 1. Такое зональное деление внутренней полости РИА позволяет определить точные расчетные значения скорости потока жидкости и давление по сечениям, выявить застойные зоны аппарата.

Одной из характеристик, показывающих эффективность кавитационного воздействия РИА, является число гидродинамической кавитации χ – степень развитости кавитационных явлений. При $0 < \chi < 1$ кавитация считается развитой, причем, чем меньше значение χ , тем интенсивнее кавитация.

Число гидродинамической кавитации можно определить на основании данных по давлению в потоке жидкости и скорости жидкости, полученных с использованием расчета гидродинамики в программе ANSYS по формуле [2]

$$\chi = \frac{2(P_c - P_n)}{\rho V^2}.$$

Расчет числа гидродинамической кавитации проведен для различных конструкций РИА: с цилиндрической формой внутренней полости ротора и РИА с профилем внутренней поверхности ротора, выполненного в форме профиля трубки Вентури.

Анализ результатов расчета числа кавитации χ позволяет сделать вывод о целесообразности применения конструкции РИА с профилем внутренней поверхности ротора, выполненного по форме сечения трубки Вентури. По расчетным данным (см. рис. 1), интенсивность кавитации для РИА с профилированной полостью ротора значительно выше по сравнению с РИА с цилиндрической полостью ротора. Расчетные данные свидетельствуют об увеличении интенсивности кавитации, так как значения числа гидродинамической кавитации χ близки к единице в зоне I, в зонах II и III для аппаратов новой конструкции, – меньше единицы, что характерно для потока с развитой кавитацией.

Результаты компьютерного моделирования потока жидкости в РИА позволяют подобрать рациональные геометрические и режимные параметры аппарата, обеспечивающие эффективную обработку суспензии.

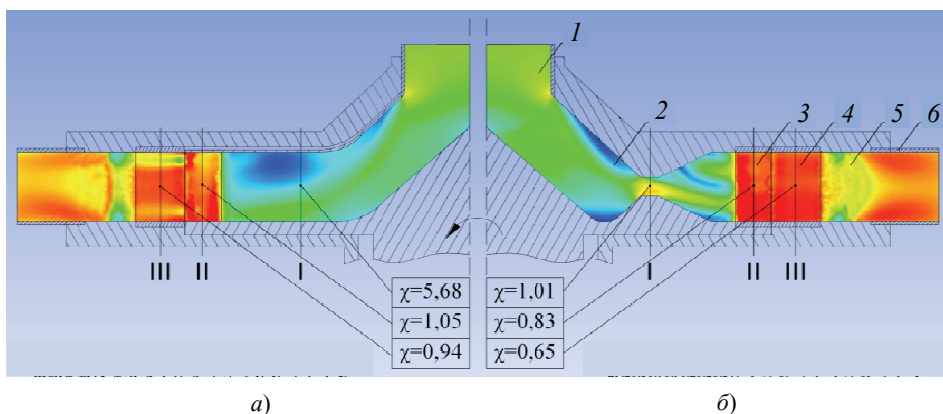


Рис. 1. Результаты расчета скорости потока жидкости в РИА по сечениям:

a – цилиндрическая полость ротора; *б* – сечение полости ротора

по радиальной прямой – профиль трубки Вентури;

1, 6 – входной и выходной патрубков соответственно; 2 – внутренняя полость ротора; 3, 4 – каналы ротора и статора соответственно; 5 – рабочая камера; I, II, III – сечения в центральной части полости ротора, каналах ротора и статора соответственно

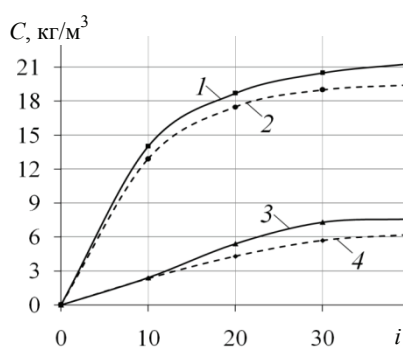


Рис. 2. Графики изменения концентрации ГК и ФК в суспензии торфа от числа циклов обработки i в РИА с цилиндрической полостью ротора (кривые 2, 4) и РИА с профилированной полостью ротора (кривые 1, 3): 1, 2 – экстрагирование ГК; 3, 4 – экстрагирование ФК

Экспериментальная часть

Для подтверждения эффективности применения предлагаемых конструкций РИА, выполненных с цилиндрической полостью ротора и профилированной полостью ротора, обоснования влияния гидродинамической кавитации на эффективность процесса экстрагирования, экспериментально исследовали процесс извлечения гуминовых (ГК) и фульвовых (ФК) кислот из торфа. Использование кавитации и импульсного гидромеханического воздействия на обрабатываемые суспензии обеспечивает высокую степень измельчения частиц, а также увеличивает выход водорастворимых ГК в раствор без применения химических реагентов.

Просеянное сырье смешивали с водой в соотношении 1 : 4 и затем заливали в емкость экспериментального стенда. После предварительного перемешивания и равномерного распределения суспензии в гидравлической системе проводили ее многократную обработку, прокачивая насосом через РИА. По достижению 10, 20, 30 и 40 циклов обработки суспензии через РИА осуществляли отбор проб.

Результаты экспериментального исследования по определению выхода ГК и ФК в воду при экстрагировании из суспензии торфа в РИА новой конструкции представлены на рис. 2.

Обсуждение результатов и выводы

Модификация внутренней полости ротора в виде профиля трубки Вентури способствует предварительной механической и гидродинамической обработке суспензии. Интенсивность кавитации для РИА с профилированной полостью ротора значительно выше по сравнению с РИА с цилиндрической полостью ротора. Применение РИА с активной зоной гидромеханической обработки суспензии в полости ротора интенсифицирует процесс экстрагирования ГК и ФК из торфа в водный раствор. Выход гуминовых кислот из частиц торфа увеличился на 10, фульвовых – на 17 %.

Список литературы

1. Промтов, М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 861 – 869.

2. Промтов, М. А. Компьютерная система расчета роторного импульсного аппарата / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 83 – 89.

3. Полезная модель к патенту 147138 Рос. Федерация, МПК В01F 7/28. Роторный импульсный аппарат / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин ; патентообладатель М. А. Промтов. – № 2014117787/05 ; заявл. 30.04.2014 ; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 30. – 7 с.

4. Полезная модель к патенту 159457 Рос. Федерация, МПК В01F 7/10. Роторный импульсный аппарат / М. А. Промтов, А. В. Алешин, М. М. Колесникова ; патентообладатель М. А. Промтов. – № 2015108445/05 ; заявл. 11.03.2015 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. – 4 с.

Intensification of the Extraction Process in the Rotary Pulse Device with a Profiled Rotor

M. A. Promptov, A. Yu. Stepanov

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety,
TSTU, Tambov, Russia; promptov@tambov.ru*

Keywords: humic acid; cavitation; rotary pulse device; peat; fulvic acid; extraction.

Abstract: The analysis of the directions of increasing the efficiency of the rotary pulse apparatus (RPA) was performed. The geometric shape of the internal cavity of the rotor in the form of a Venturi tube profile in the radial direction increases the intensity of the mechanical, hydrodynamic and cavitation slurry treatment. The cavitation intensity for RPA with a profiled rotor cavity is higher compared with the designs with a cylindrical rotor cavity. The use of RPA with the active zone of hydromechanical treatment of the suspension in the rotor cavity intensifies the process of extracting humic acid and fulvic acid from peat into an aqueous solution.

References

1. Promptov M.A. [Prospects for the use of cavitation technologies for the intensification of chemical-technological processes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 861-869. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Promptov M.A., Stepanov A.Yu. [Computer system for calculating rotary impulse apparatus], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 83-89. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Promptov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Rotornyy impul'snyy apparat* [Rotary pulse device], Russian Federation, 2014, Poleznaya model' k pat. 147138. (In Russ.)

4. Promptov M.A., Aleshin A.V., Kolesnikova M.M. *Rotornyy impul'snyy apparat* [Rotary pulse device], Russian Federation, 2016, Poleznaya model' k pat. 159457. (In Russ.)

Intensivierung des Extraktionsprozesses im Dreh -Impuls-Gerät mit profiliertem Rotor

Zusammenfassung: Es ist die Analyse der Richtungen zur Steigerung der Effizienz der Drehimpulsvorrichtung (RIA) durchgeführt. Die geometrische Form des inneren Hohlraums des Rotors in Form eines Venturi-Rohrprofils in radialer Richtung

erhöht die Intensität der mechanischen, hydrodynamischen und Kavitationsbehandlung von Suspensionen. Die Kavitationsintensität für RIA mit profiliertem Rotorhohlraum ist höher als bei Konstruktionen mit zylindrischem Rotorhohlraum. Die Verwendung von RIA mit der aktiven Zone der hydromechanischen Behandlung der Suspension im Rotorhohlraum verstärkt den Extraktionsprozess von GC und FC aus Torf in eine wässrige Lösung.

Intensification du processus d'extraction dans un appareil rotor d'impulsion avec un rotor profilé

Résumé: Est effectuée une analyse des directions de l'augmentation de l'efficacité du fonctionnement de l'appareil rotor d'impulsion (ARI). La forme géométrique de la cavité interne du rotor sous la forme d'un profil de tube Venturi dans la direction radiale contribue à augmenter l'intensité de la mécanique du traitement hydro-dynamique et celui de cavitation de la suspension. L'intensité de la cavitation pour ARI avec la cavité profilée du rotor est plus élevée par rapport aux structures avec la cavité cylindrique du rotor. L'application de ARI avec le secteur actif du traitement hydro-mécanique de la suspension dans la cavité du rotor intensifie le process d'extraction du GC et du FC à partir de la tourbe dans la solution aqueuse.

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