

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЕССОЛИВАНИЯ ВОДЫ В МЕМБРАНАХ КОАКСИАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

### MODELING OF WATER DESALINATION IN THE MEMBRANES OF A COAXIAL CYLINDRICAL FORM

*А.М. АЗИМОВ, К.Т. ЖАНТАСОВ, Р.Ш. АБИЕВ, Л.М. САТАЕВА, А.Е. ХУСАНОВ*  
*A.M. AZIMOV, K.T. ZHANTASOV, R.SH. ABIYEV, L.M. SATAYEVA, A.E. KHUSANOV*

(Южно-Казахстанский государственный университет им. М.Ауэзова, Республика Казахстан,  
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет))  
(M.Auezov South Kazakhstan State University, Republic of Kazakhstan,  
St. Petersburg State Technological Institute (Technical University))  
E-mail: azimov-78@mail.ru

*В работе рассмотрены перспективы обессоливания воды мембранными методами очистки, исследовано развитие конструкции мембранного аппарата с мембранными элементами с целью повышения эффективности разделения смеси, увеличения продолжительности работы мембраны. Предложена математическая модель, поставленная задача решена уравнением Навье-Стокса в цилиндрических координатах.*

*The paper considers prospects for water desalination by membranous cleaning methods, development of the membranous apparatus with membranous elements' structure in order to increase efficiency of the mixture separation, to increase duration of the membrane operation were studied. A mathematical model was offered, the objective was solved by Navier-Stokes equation in cylindrical coordinates.*

**Ключевые слова:** сточные воды, обессоливание, мембранная технология.

**Keywords:** wastewaters, desalination, membranous technology.

В связи с обострением энергетической и сырьевой проблемы в последние годы во всем мире усилился интерес к снижению затрат энергетических и материальных ресурсов при сопутствующем повышении полезных эффектов, в том числе в водочистке и водоподготовке [1].

Мембранные технологии являются перспективными практически во многих отраслях промышленности, в которых возникает необходимость разделения, обессоливания и концентрирования растворов органических или минеральных веществ. Для осуществления высокоэффективного процесса обессоливания природных и промышленных вод, являющихся источником водоснабжения, а также разделения смеси в химической и других отраслях

промышленности разработана конструкция мембранного аппарата с мембранными элементами.

Методы улучшения характеристик химико-технологического оборудования можно разделить на два класса: 1) оптимизация существующих аппаратов, установок и производств на основе формальных *математических* методов; 2) поиск наиболее эффективных для данного процесса *физических* воздействий, включая адаптацию геометрической формы аппаратов и их элементов.

В работе [2] обсуждались общие принципы интенсификации процессов на примерах пульсационных аппаратов. Наиболее последовательно, с точки зрения эффективности преобразования энергии,

идеи снижения энергозатрат в технологических процессах реализованы в [3].

Примеры реализации описанных в [2] принципов в аппаратах для различных технологических процессов: сокращение времени обработки сточных вод при использовании пульсационного аппарата проточного типа [4], применение усовершенствованных мембранного аппарата и тонкослойных отстойников для очистки сточной воды [5] и [6], использование мембранного аппарата пульсационного типа [7], вакуумной дегазации воды при помощи вихревого струйного аппарата [8], пульсационного мембранного аппарата для обессоливания природных и промышленных вод с периодической выгрузкой сгущенного осадка [9].

Промышленные аппараты процессов должны удовлетворять следующим требованиям: иметь большую рабочую поверхность мембран в единице объема аппарата; быть доступными для сборки и монтажа. При конструировании этих аппаратов необходимо учитывать также требования, обусловленные работой аппарата при повышенных давлениях: обеспечение механической прочности, герметичности и др. Создать аппарат, который в полной мере удовлетворял бы всем перечисленным требованиям, по-видимому, невозможно. Поэтому для каждого конкретного процесса разделения следует подбирать аппарат такой конструкции, которая обеспечивала бы наиболее выгодные условия проведения процесса.

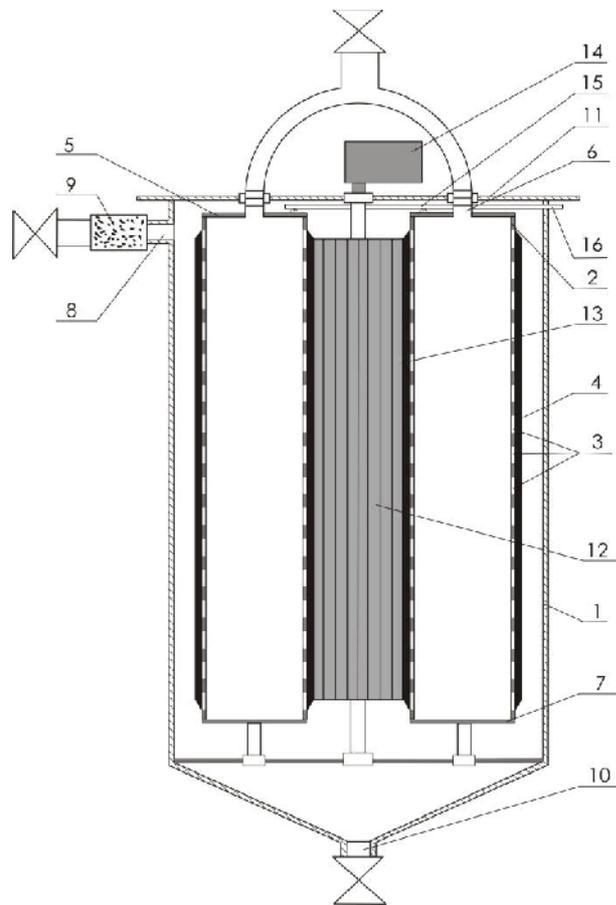
Одной из конструкций, отвечающих требованиям, является мембранный аппарат, задачей исследования которого является упрощение конструкции аппарата, повышение эффективности разделения смеси, увеличение продолжительности работы мембраны.

Мембранный аппарат содержит цилиндрический корпус с патрубком ввода очищаемой жидкости, расположенным тангенциально к образующей корпуса, патрубками вывода очищенной и недоочи-

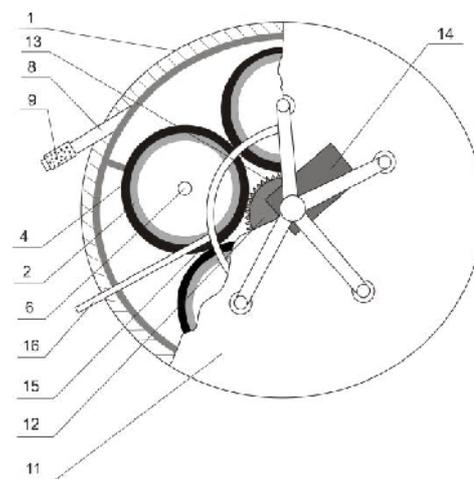
щенной жидкости, трубчатый мембранный модуль, содержащий каркас с дренажными отверстиями и с наружной полупроницаемой мембраной, установленный с зазором относительно внутренних стенок корпуса. Аппарат дополнительно снабжен эластичным элементом, выполненным из пористого материала в форме цилиндрического валика, расположенного с возможностью вращения по оси аппарата, причем мембранные модули также могут вращаться вертикально по своей оси и параллельно эластичному элементу.

Сущность разработанной конструкции поясняется с помощью рис. 1, где показаны общий вид (а) и вид сверху (б) мембранного аппарата с разрезом крышки аппарата.

Мембранный аппарат работает следующим образом: подлежащая мембранной очистке жидкость поступает через фильтр грубой очистки 9 и патрубок 8, расположенный тангенциально к образующей корпуса 1. Создается закрученное движение жидкости, наиболее крупные частицы отбрасываются к периферии под действием центробежных сил и осаждаются, что способствует более длительному сохранению проницаемости мембраны 4. Проходя через полупроницаемую мембрану 4 трубчатого мембранного модуля, жидкость очищается от механических примесей и по дренажным отверстиям 3 поступает внутрь трубчатого мембранного модуля, затем очищенная выводится через патрубок 6 потребителю. При работе устройства в режиме фильтрации патрубок 10 для вывода недоочищенной жидкости закрыт. В процессе работы аппарата происходит засорение поверхности мембраны 4, что приводит к увеличению перепада давления на трубчато-мембранном модуле. При достижении величины перепада давления до заданной автоматически приводится в движение эластичный валиковый элемент 12 с ребристой поверхностью 13 при помощи электродвигателя 14.



а)



б)

Рис. 1

Устройство для подачи промывной жидкости 15 включается одновременно с работой эластичных элементов. Данное устройство представляет собой трубчатый элемент с отверстиями, через которые на каждую полупроницаемую мембрану 4 и эластичный валиковый элемент 12 с ребристой поверхностью 13 подаются струи промывной жидкости. Промывная жидкость поступает через патрубок 16. Эластичный валиковый элемент 12 с ребристой поверхностью 13, касаясь поверхности мембраны 4, снимает загрязнения, которые в дальнейшем смываются тангенциальным потоком промывной жидкости, проводится промывка мембраны 4, при этом недоочищенная жидкость сливается через патрубок 10. Периодичность регенерации препятствует износу мембраны 4. Эластичный валиковый элемент 12 с ребристой поверхностью 13 выполнен из пористого эластичного материала в форме цилиндрического валика, который механи-

чески очищает поверхность мембраны без ее разрушения и сам при этом не забивается частицами. После длительной эксплуатации (до 2,5...3 лет) старые мембраны 4 заменяются новыми.

Отношение окружных скоростей поверхностей эластичного элемента с ребристой поверхностью и трубчатых мембранных модулей в 1,2...1,7 раза позволяет повысить степень очистки регенерации мембран. При отношении окружных поверхностей эластичного элемента с ребристой поверхностью и трубчатых мембранных модулей менее 1,2 раза не обеспечивается необходимого уровня очистки поверхности мембран, так как касательные напряжения на поверхности осадка недостаточно велики. При отношении окружных поверхностей эластичного элемента с ребристой поверхностью и трубчатых мембранных модулей более 1,7 раза существенно возрастает износ мембран и повышается

расход энергии. При оптимальном отношении окружных скоростей поверхностей эластичного элемента с ребристой поверхностью и трубчатых мембранных модулей, находящейся в диапазоне 1,2...1,7, в осадке создаются достаточные сдвиговые напряжения, приводящие к его эффективному удалению и последующему смыву промывной жидкостью.

Использование эластичного валикового элемента с ребристой поверхностью, а также устройства для подачи промывной жидкости позволяет снизить износ мембраны и повышает эффективность очистки поверхности и пор мембраны.

Рассмотрим геометрические характеристики конструкции для мембранной очистки воды (рис. 2: I – мембраны, II – валик, III – корпус).

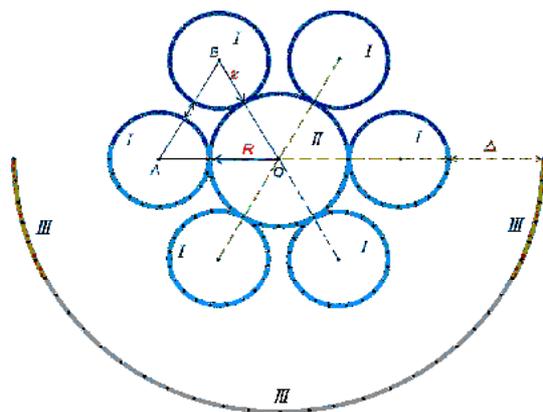


Рис. 2

Выбирая устройство с шестью мембранами и соединяя центры мембран друг с другом, мы получим правильный шестиугольник. Согласно общей формуле:

$$R + r = \frac{a}{2 \sin \frac{\pi}{n}}, \quad (1)$$

где  $a = |AB|$  – длина стороны многоугольника;  $n$  – число сторон, при  $n = 6R+r = a$ .

$$\rho = \left( \frac{\partial v^2}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} - \frac{v_\phi^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) = K_r - \frac{\partial \rho}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial v^2} + \frac{1 \partial v_r}{2 \partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{1 \partial^2 v_r}{r^2 \partial \phi^2} - \frac{2 \partial v_\phi}{r^2 \partial \phi} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

Так как  $a=2r+\delta$ , то  $S=R-\delta$ . Также отметим, что корпус представляет собой цилиндр радиусом  $(R+2r+\Delta)$  и высотой  $H$ .

Теперь рассмотрим течение жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами, вращающимися с разными, но постоянными угловыми скоростями. Пусть  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы внутреннего и внешнего цилиндров, а  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – их угловые скорости.

В общем случае уравнения Навье-Стокса имеют вид:

$$\rho = \frac{dv}{dt} = \rho F + (\xi + \mu) \text{grad} \text{div}(v) - \text{grad} \rho + \mu \Delta v_1, \quad (2)$$

где  $F$  – вектор объемной силы;  $\mu$ ,  $\xi$  – коэффициенты динамической и объемной вязкости. К уравнениям (2) необходимо также присоединить уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0. \quad (3)$$

В данной задаче нам понадобятся уравнения Навье-Стокса в цилиндрических координатах. Пусть  $r$ ,  $\phi$  и  $z$  соответственно радиальная окружная и осевая координаты цилиндрической системы координат, а  $v_r, v_\phi, v_z$  – составляющие скорости в направлении этих координат. Цилиндрические координаты  $r$ ,  $\phi$  и  $z$  связаны с декартовыми прямоугольными координатами следующими формулами преобразования:

$$\left. \begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2} \text{tg} \phi = \frac{x}{y}, \\ x &= r \cos \phi, \\ y &= r \sin \phi, \\ z &= z. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для несжимаемой жидкости получим следующие уравнения:

$$\rho \left( \frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\phi \partial v_\phi}{r \partial \phi} + \frac{v_r v_\phi}{r} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} \right) = K_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \phi} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\phi \partial v_z}{r \partial \phi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = K_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

Поскольку рассматриваемое течение можно считать точечным, из системы уравнений Навье-Стокса в полярных координатах остаются только первые два, которые, если окружную скорость обозначить через  $u$ , примут вид:

$$\rho \frac{u^2}{r} = \frac{dp}{dr}, \quad (9)$$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{d}{dr} \left( \frac{u}{r} \right) = 0. \quad (10)$$

Граничными условиями будут:

$$u = r_1 \omega_1 \text{ при } r = r_1, \\ u = r_2 \omega_2 \text{ при } r = r_2.$$

Проинтегрировав уравнение (10) при заданных граничных условиях, получим:

$$u(r) = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left[ r(\omega_2 r_2^2 - \omega_1 r_1^2) - \frac{r_1^2 r_2^2}{r} (\omega_2 - \omega_1) \right]. \quad (11)$$

Распределение давления в радиальном направлении определяется уравнением (9).

Теперь в случае одного цилиндра, вращающегося в жидкости при условии, что  $r_2 \rightarrow \infty$ ,  $\omega_2 = 0$ , соотношение (11) примет вид:

$$u = \frac{r_1^2}{r} \omega_1. \quad (12)$$

Решая совместно уравнения (9) и (12), найдем, что

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{r_1^4 \omega_1^2}{r^3}. \quad (13)$$

Отсюда:

$$\rho = \rho r_1^4 \omega_1^2 \int \frac{dr}{r^3} = \frac{\rho r_1^4 \omega_1^2}{2r^2} + C, \quad (14)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

Количество жидкости, протекающей через поперечное сечение в единицу времени, определяется формулой Хагена-Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi r_0^4 \Delta P}{8\mu \ell}. \quad (15)$$

Мембрана в развернутом виде представляет собой прямоугольник со сторонами  $2\pi r$  и  $h$ .

Объем жидкости, проходящей через поры, составит:

$$V' = N_2 \frac{\pi r_0^4 t}{16\ell\mu} \rho gh. \quad (16)$$

Учитывая количество пор, найдем общий объем для одной мембраны:

$$V(I) = N_1 V' = N_1 N_2 \frac{\pi r_0^4 t}{16\ell\mu} \rho gh, \quad (17)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли ( $9,81 \text{ м/с}^2$ ).

Количество жидкости, протекающей через поры в единицу времени, для одной мембраны равно:

$$Q(I) = N_1 N_2 \frac{\pi r_0^4 t}{16\ell\mu} \rho gh. \quad (18)$$

Процесс регенерации мембран происходит в жидкой фазе. Здесь важно отметить, что вращение мембран имеет место только в ходе регенерации. При вращении мембран приходит в движение и пограничный слой жидкости. Для частицы жидкости, находящейся в увлеченном, вследствие трения, слое на расстоянии  $r$  от оси, центробежная сила на единицу объема равна  $g\omega^2$ . Слой жидкости под действием центробежной силы отбрасывается наружу. Взамен отброшенной жидкости поступает новая жидкость, которая также увлекается мембраной (цилиндром) и опять отбрасывается наружу. Таким образом, достигается высокая степень перемешивания жидкости и промывки конструкции, а также и регенерации мембран.

В результате вращения валика жидкость, находящаяся в мембране (цилиндре), под действием центробежной силы отбрасывается к внутренней стенке мембраны, что приводит к дополнительному давлению  $P_{изб}$  в порах мембраны. В свою очередь, согласно формуле (14) у внешней стенки создается разрежение, отсюда имеет место перепад давления обратного характера, который приведет к очищению засорившихся пор.

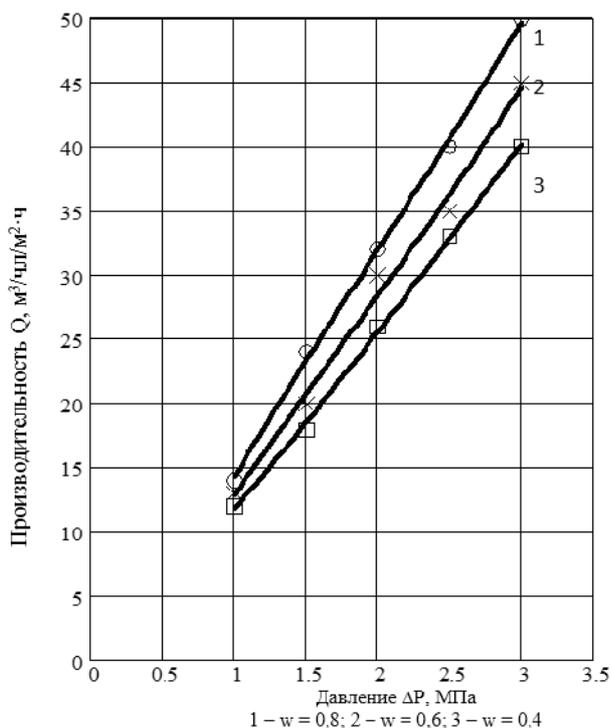


Рис. 3

На рис. 3 представлена зависимость производительности установки от давления и скорости водного потока.

## ВЫВОДЫ

По результатам исследований можно сделать вывод, что использование эластичного валикового элемента с ребристой поверхностью, а также устройства для подачи промывной жидкости позволяют снизить износ мембраны и повысить эффективность очистки поверхности и пор мембраны. Здесь важно отметить, что вращение мембран имеет место только в ходе регенерации. При вращении мембран приходит в движение и пограничный слой жидкости. Для частицы жидкости, находящейся в увлеченном, вследствие трения, слое на расстоянии  $r$  от оси, центробежная сила на единицу объема равна  $g\omega^2$ . Слой жидкости под действием центробежной силы отбрасывается наружу. Взамен отброшенной жидкости поступает новая жидкость, которая также увлекается мембраной (цилиндром) и опять отбрасывается наружу. Таким образом, достигается высокая степень перемешивания жидкости, промывки конструкции и регенерации мембран. В результате вращения валика жидкость, находящаяся в мембране (цилиндре), под действием центробежной силы отбрасывается к внутренней стенке мембраны, что приводит к дополнительному давлению  $P_{изб}$  в порах мембраны. У внешней стенки создается разрежение, отсюда имеет место перепад давления обратного характера, который приведет к очищению засорившихся пор.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Саркисов П.Д. Проблемы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии // Химическая промышленность. – 2000, №1. С. 20...27.
2. Абиев Р.Ш. Пульсационные аппараты нового поколения – энерго- и ресурсосберегающее оборудование химических производств // Химическая промышленность сегодня. – 2008, №4. С. 46...54.
3. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий.

– М.: Институт компл. исслед.; НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2011.

4. *Абиев Р.Ш.* Интенсификация очистки промышленных сточных вод в пульсационном аппарате проточного типа // Изв. СПбГТИ(ТУ). – 2012, №13 (39). С. 82...86.

5. *Азимов А.М., Абиев Р.Ш., Шакиров Б.С., Жантасов К.Т., Сатаева Л.М.* Эффективность использования оборотных систем водопотребления на текстильных предприятиях // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 6. С. 149...153.

6. *Абиев Р.Ш., Азимов А.М., Шакиров Б.С.* Пути совершенствования очистки сточной воды с использованием тонкослойных отстойников // Химическая промышленность. – 2013, т. 90, №6. С. 286...290.

7. *Азимов А.М., Абиев Р.Ш., Шакиров Б.С., Жантасов К.Т.* Очистка водных потоков в мембранном аппарате пульсационного типа // Изв. СПбГТИ(ТУ). – 2014, №23 (49). С. 62...65.

8. *Абиев Р.Ш., Васильев М.П., Доильницын В.А.* Исследование процесса вакуумной дегазации воды при помощи вихревого струйного аппарата // Изв. СПбГТИ(ТУ). – 2015, №28 (54). С. 64...69.

9. *Азимов А.М., Абиев Р.Ш., Жантасов К.Т., Сатаева Л.М., Азимова Н.Б., Зерхатбек М.М.* Моделирование пульсационного мембранного аппарата для обессоливания природных и промышленных вод с периодической выгрузкой сгущенного осадка // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, №1. С. 132...138.

#### REFERENCES

1. Sarkisov P.D. Problemy jenergo- i resursosberezhenija v himicheskoj tehnologii, neftehimii i biotehnologii // Himicheskaja promyshlennost'. – 2000, №1. S. 20...27.

2. Abiev R.Sh. Pul'sacionnye apparaty novogo pokolenija – jenergo- i resursosberegajushhee obo-

rudovanie himicheskikh proizvodstv // Himicheskaja promyshlennostt' segodnja. – 2008, №4. S. 46...54.

3. Ganiev R.F., Ukrainskij L.E. Nelinejnaja volnovaja mehanika i tehnologii. Volnovye i kolebatel'nye javlenija v osnove vysokih tehnologij. – М.: Institut kompl. issled.; NIC "Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika", 2011.

4. Abiev R.Sh. Intensifikacija ochistki promyshlennyh stochnyh vod v pul'sacionnom apparate protochnogo tipa // Izv. SPbGTI(TU). – 2012, №13 (39). S. 82...86.

5. Azimov A.M., Abiev R.Sh., Shakirov B.S., Zhantasov K.T., Sataeva L.M. Jefferektivnost' ispol'zovanija oborotnyh sistem vodopotreblenija na tekstil'nyh predpriyatijah // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2013, № 6. S. 149...153.

6. Abiev R.Sh., Azimov A.M., Shakirov B.S. Puti sovershenstvovanija ochistki stochnoj vody s ispol'zovaniem tonkoslojnyh otstojnikov // Himicheskaja promyshlennost'. – 2013, t. 90, №6. S.286...290.

7. Azimov A.M., Abiev R.Sh., Shakirov B.S., Zhantasov K.T. Ochistka vodnyh potokov v membranном apparate pul'sacionnogo tipa // Izv. SPbGTI(TU). – 2014, №23 (49). S. 62...65.

8. Abiev R.Sh., Vasil'ev M.P., Doil'nicyn V.A. Issledovanie processa vakuumnoj degazacii vody pri pomoshhi vihrevogo strujnogo apparata // Izv. SPbGTI(TU). – 2015, №28 (54). S. 64...69.

9. Azimov A.M., Abiev R.Sh., Zhantasov K.T., Sataeva L.M., Azimova N.B., Zerhatbek M.M. Modelirovanie pul'sacionnogo membranного apparata dlja obessolivanija prirodnyh i promyshlennyh vod s periodicheskoj vyguzkoj sgushhennogo osadka // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2015, №1. S. 132...138.

Рекомендована кафедрой химической технологии неорганических веществ. Поступила 08.04.16.