

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННОГО МЕМБРАННОГО АППАРАТА ДЛЯ ОБЕССОЛИВАНИЯ ПРИРОДНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОД С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ВЫГРУЗКОЙ СГУЩЕННОГО ОСАДКА

MODELING OF OSCILLATORY MEMBRANOUS APPARATUS FOR DEMINERALIZATION OF NATURAL AND INDUSTRIAL WATERS WITH REPETITIVE DISCHARGE OF DENSIFIED SLUDGE

А.М. АЗИМОВ, Р.Ш. АБИЕВ, К.Т. ЖАНТАСОВ, Л.М. САТАЕВА, Н.Б. АЗИМОВА, М.М. ЗЕРХАТБЕК
A.M. AZIMOV, R.SH. ABIEV, K.T. ZHANTASOV, L.M. SATAYEVA, N.B. AZIMOVA, M.M. ZERHATBEK

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

Дано описание принципа действия нового мембранного аппарата для обессоливания природных и промышленных вод с периодической выгрузкой сгущенного осадка, построена его математическая модель, позволяющая рассчитать основные технологические параметры аппарата. Особенностью мембранного аппарата является использование для регенерации фильтровальной перегородки потенциальной энергии суспензии, накопленной сжатым газом в пульсационной камере. Эксперименты, проведенные на лабораторной модели мембранного аппарата, позволяют рекомендовать построенную математическую модель для практического использования.

The article gives description of operating principle of a new membranous apparatus for demineralization of natural and industrial waters with repetitive discharge of densified sludge. Its mathematical model allowing to calculate basic technological parameters of the apparatus was constructed. Characteristic of the membranous apparatus is its application for regeneration of filter compartment of a suspension's potential energy, accumulated by the pressure gas in a pulse chamber. The experiments carried out on the membranous apparatus laboratory model allow recommend the constructed mathematical model for practical use.

Ключевые слова: обессоливание, мембранная технология, мембранный аппарат, фильтрование, математическая модель.

Keywords: demineralization, membranous technology, membranous apparatus, filtering, mathematical model.

Мембранные аппараты для разделения жидких сред с помощью полупроницаемых мембран могут быть использованы в технологических процессах обессоливания природных и промышленных вод, химической, текстильной, пищевой, микробиологической отраслях промышленности, а также в медицине.

Кроме того, возможно сочетание процесса фильтрования с другими технологическими процессами: пропиткой пористых частиц, промывкой, сорбцией, ионным обменом, гетерогенными каталитическими реакциями. При использовании соответствующих фильтровальных перегородок

возможно проведение в нем микро-, ультра- и нанофильтрации.

Описанный в данной работе мембранный аппарат следует рекомендовать для применения в случаях налипающих, уплотняющихся, трудно отделяемых от перегородки осадков, когда традиционные типы фильтров перестают функционировать.

В работе описан принцип действия нового энергосберегающего пульсационного мембранного аппарата для обессоливания природных и промышленных вод с автоматизированной периодической выгрузкой сгущенного осадка, проведено его теоретическое и экспериментальное исследование.

Рассмотрим конструкцию и принцип действия мембранного аппарата для обессоливания природных и промышленных вод.

Разработанный нами ранее мембранный аппарат [1] для обессоливания природных и промышленных вод состоит из корпуса 1, имеющего цилиндрическую форму с эллиптическим днищем 2, патрубка 3 для ввода разделяемой жидкости, патрубка 4 для вывода сгущенного осадка, патрубка 5 для вывода пермеата и крышки 6. Он имеет мембранные элементы 8, состоящие из двух симметрично расположенных перфорированных прямоугольных пластин 9 с продольным сечением синусоидальной формы, размещенными между пластинами 9 распорными ребрами 10 и закрепленных на поверхности пластин полупроницаемых мембран 11, причем под мембранным блоком размещено внутреннее коническое днище 12, нижняя часть которого сопряжена с патрубком 4 слива сгущенного осадка, находящимся в днище 2 аппарата с образованием кольцевого зазора 13 между нижней частью конического днища 12 и патрубком слива 4 сгущенного осадка, а на поверхности конического днища 12 установлен вибратор 14, соединенный с генератором колебаний 15. Соседние мембранные элементы 8, состоящие из двух симметрично расположенных перфорированных прямоугольных пластин

9 с продольным сечением синусоидальной формы, образуют каналы 16 с периодически изменяющимся вдоль направления потока сечением.

В данной работе проведено исследование лабораторной модели описанного выше аппарата, дополненного низкочастотной системой импульсной очистки поверхности мембран при помощи потенциальной энергии, накопленной в пульсационной камере. Эту энергию накапливает газ, сжимающийся при подаче насосом суспензии. При переключении клапанов запасенная газом потенциальная энергия трансформируется в кинетическую энергию потока фильтрата (пермеата), выдавливаемого в направлении, обратном направлению фильтрации, в результате чего происходит смыв осадка с поверхности мембран.

На рис. 1 схематически изображен продольный разрез аппарата; на рис. 2 – вид А; на рис. 3 – представлен поперечный разрез Б-Б.

В начале процесса фильтрации пермеат поступает через трубопровод 19 и открытый клапан 30 в пульсационную камеру 20, постепенно сжимая находящийся там газ (воздух). Затем – собственно при фильтрации – пермеат отводится из аппарата через трубопровод 17 и клапан 18. Сгущенный осадок (концентрат) отводится из аппарата через трубопровод 21 и клапан 22. Суспензия подается через трубопровод 23 и клапан 24. Особенностью предлагаемого аппарата является автоматическое управление процессом открывания клапанов 18, 22, 24 и 30 по сигналам от датчика давления 25 блоком управления – контроллером 26. Датчик 27 двухуровневый, то есть имеет нижний и верхний пороги срабатывания. Система управления процессом удаления осадка с конического днища 12 включает в себя датчик толщины слоя осадка 28 и блок управления 29, сигнал с которого подается на генератор колебаний 15, соединенный с вибратором 14.

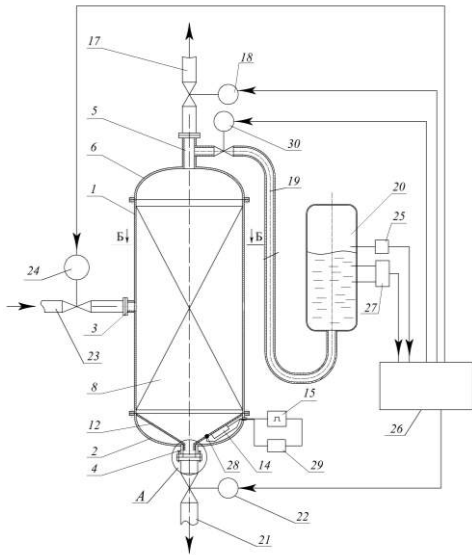


Рис. 1

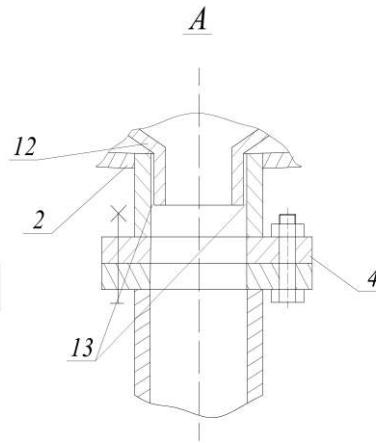


Рис. 2

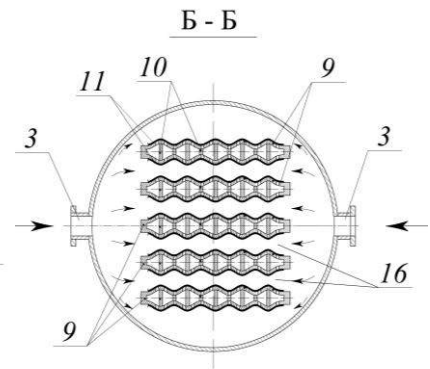


Рис. 3

Мембранный аппарат работает циклически: стадии фильтрования чередуется со стадиями регенерации.

1). Стадия фильтрования. Процесс начинается при закрытых клапанах 18 и 22 и открытых клапанах 24 и 30. Поскольку на фильтровальной перегородке еще не образовался слой осадка, фильтрующаяся жидкость быстро поступает в пульсационную камеру 20, создавая в ней избыточное давление газа. При достижении установленного давления, регистрируемого датчиком 25, клапан 30 закрывается по команде с контроллера 26, а сразу за этим открывается клапан 18, и пермеат начинает поступать в трубопровод 17.

При закрытых клапанах 22 и 30, открытых клапанах 18 и 24 разделяемая смесь через трубопровод 23 и по патрубку 3, расположенному в корпусе 1, имеющем цилиндрическую форму, поступает в мембранный блок и направляется в пространство между мембранными элементами 8. Перемещаясь вдоль мембранных элементов 8, разделяемая смесь под давлением фильтруется через мембраны 11 и перфорированные пластины 9, а затем выводится через патрубок 5 и клапан 18 по трубопроводу 17. При прохождении разделяемой смеси между мембранными элементами 8 по каналам 16 в потоке очищаемой жидкости помимо турбулизации возникают пульсации давления, обусловленные пери-

одически изменяющимся по направлению потока сечением каналов 16. За счет возникновения крупномасштабных пульсаций давления и турбулентных касательных напряжений в потоке обеспечивается снижение уровня концентрационной поляризации, что, в свою очередь, ведет к увеличению производительности мембранного аппарата и эффективности очистки жидкостей и/или концентрирования растворов. Одна часть фильтрата отводится из аппарата через трубопровод 17 и клапан 18, а другая часть поступает через трубопровод 19 в пульсационную камеру 20, постепенно сжимая находящийся там газ (воздух). Таким образом, давление в пульсационной камере 20 постепенно возрастает, а сжимающийся газ накапливает потенциальную энергию. Пульсации давления, подводимые к системе через патрубок 5 от генератора пульсаций (на рис. 1 условно не показан), способствуют периодическому разрушению осадка, образующегося на мембране 11, и разрушению связей между частицами осадка. Благодаря этому улучшаются условия фильтрования жидкости через слой осадка, и увеличивается продолжительность работы аппарата до регенерации. Одновременно с процессом фильтрования в аппарате могут протекать указанные выше реакционные и массообменные процессы.

2). Стадия регенерации.

Осадок может накапливаться на поверхности мембранных элементов. Сгущенный осадок (концентрат) также накапливается, поступая в коническое днище 12 для вывода из аппарата через патрубок 4. Рассмотрим работу системы в этих двух случаях.

По мере накопления осадка гидравлическое сопротивление мембранного фильтра достигает предельно допустимого значения, что регистрируется датчиком давления, установленном в рабочей камере корпуса 1 аппарата (на рис. 1 условно не показан), соединенным с контроллером 26. В этот момент клапаны 18 и 24 закрываются, клапан 22 на время очистки открывают, после чего клапан 30 резко открывается. Под действием разности давлений между пульсационной камерой 20 и давлением на выходе из патрубка 4 (в трубе 21) жидкость из пульсационной камеры 20 и трубопровода 19 движется через поры мембран 11, импульсно (в режиме гидравлического удара) проникая через слой осадка, и, разрушая связи между частицами в осадке, поступает в коническое днище 12. При этом происходит некоторое разбавление слоя частиц осадка порцией жидкости, поступившей из-под мембраны 11 (что улучшает подвижность осадка), а сгущенная суспензия под давлением выбрасывается через клапан 22 и патрубок 4 в сборник (на рис. 1 условно не показан). Так реализуется регенерация поверхности мембраны 11. После этого клапан 22 закрывается, и начинается следующий цикл работы аппарата. Таким образом, накопленная сжатым газом потенциальная энергия преобразуется в кинетическую энергию движения жидкости, взаимодействия с частицами осадка, что способствует разрушению плотной структуры осадка.

Особенностью предлагаемого аппарата является автоматическое управление процессом открывания клапанов 18, 22, 24, 30 по сигналам от датчика 25 и системой управления 26.

Таким образом, образованию плотного осадка препятствуют как пульсации, со-

здаваемые на стадии фильтрования, так и импульсный сброс части фильтрата на стадии регенерации, а также предлагаемый мембранный аппарат обеспечивает повышение производительности и эффективности очистки жидкостей и/или концентрирования растворов, а также увеличение межремонтной наработки аппарата за счет снижения уровня концентрационной поляризации. Этот эффект, в свою очередь, обеспечивается крупномасштабными пульсациями давления, генерируемыми потоком жидкости при обтекании мембранных элементов с продольным сечением синусоидальной формы, а также турбулизацией жидкости в каналах между мембранными элементами. Кроме того, предлагаемый нами мембранный аппарат обеспечивает возможность работы при высоких давлениях за счет цилиндрической формы корпуса и эллиптической формы крышки и днища.

Математическая модель пульсационного мембранного аппарата, принцип действия которого во многом аналогичен принципу действия рассматриваемого здесь фильтра, описана в работе [2]. Особенностью работы мембранного аппарата, отличающей его от экстрактора периодического действия, является нестационарный процесс накопления осадка; описанию этого процесса здесь и уделено основное внимание.

Рассмотрим стадию фильтрования. В произвольный момент времени расход фильтрата через фильтровальную перегородку с осадком

$$Q_{\phi}(t) = \frac{\Delta p}{r_{\phi n} + r_{oc}}. \quad (1)$$

Расход суспензии, подаваемой в фильтр, и расход содержащейся в ней твердой фазы соответственно равны:

$$Q_c = \frac{Q_{\phi}}{1 - \varepsilon_c}, \quad (2)$$

$$Q_T = Q_c \varepsilon_c. \quad (3)$$

Приращения объемов в течение малого промежутка времени Δt :

- твердой фазы

$$\Delta V_T = Q_T \Delta t, \quad (4)$$

- осадка (включающего твердые частицы и поры между ними):

$$\Delta V_{oc} = \frac{Q_T \Delta t}{\varepsilon_{oc}}, \quad (5)$$

- жидкости, содержащейся в порах осадка:

$$\Delta V_{пор} = \frac{1 - \varepsilon_{oc}}{\varepsilon_{oc}} Q_T \Delta t, \quad (6)$$

- жидкости под фильтровальной перегородкой (фильтрат за вычетом жидкости в порах) равен уменьшению объема газа в камере накопления фильтрата и пульсационной камере 20 (рис. 1):

$$\Delta V_r = Q_\phi \Delta t - \Delta V_{пор}. \quad (7)$$

Приращение высоты осадка в течение малого промежутка времени Δt :

$$\Delta h = \frac{\Delta V_{oc}}{F}. \quad (8)$$

Учитывая малую скорость фильтрации, закон изменения давления в пульсационной камере принимали изотермическим:

$$p_2(t) = \frac{p_{20} V_{20}}{V_2(t)}, \quad (9)$$

а сопротивление слоя осадка, приведенное к сечению фильтра, принимали ламинарным и рассчитывали через константу фильтрации Дарси [3]:

$$r_{oc}(t) = \frac{2\mu\zeta^2 S^2 (1 - \varepsilon_{oc})^2}{\varepsilon_{oc}^3 F} h(t). \quad (10)$$

Построенная модель может быть сведена к интегральному уравнению Вольтерра второго рода для расчета расхода фильтрата:

$$Q_\phi(t) = \frac{1}{r_{\phi n} + A \int_0^t Q_\phi(\tau) d\tau} \left(p_1 - \frac{p_2 V_{20}}{V_{20} - B \int_0^t Q_\phi(\tau) d\tau} \right), \quad (11)$$

где использованы константы:

$$A = \frac{2\mu\zeta^2 S^2 (1 - \varepsilon_{oc})^2 \varepsilon_c}{\varepsilon_{oc}^4 F^2 (1 - \varepsilon_c)}, \quad (12)$$

$$B = 1 - \frac{(1 - \varepsilon_{oc}) \varepsilon_c}{\varepsilon_{oc} (1 - \varepsilon_c)}.$$

Система уравнений (1)...(12) решалась методом Эйлера; расчетные зависимости важнейших технологических параметров аппарата от времени для условий, при которых проводился эксперимент, представлены на рис. 4 (зависимости от времени (t , с) высоты осадка h , расхода фильтрата Q_ϕ , объема газа V_2 и давления газа p_2 в пульсационной камере. Горизонтальная штриховая линия соответствует снижению расхода фильтрата в 5 раз по сравнению с начальным. Расчетные параметры: $F = 5,027 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $p_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (абс.); $p_{20} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (абс.); $\varepsilon_c = 0,05$; $\varepsilon_{oc} = 0,69$; $\mu = 1,186 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $S = 1,307 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$; $\zeta = 1,177$. Точки – опытные данные).

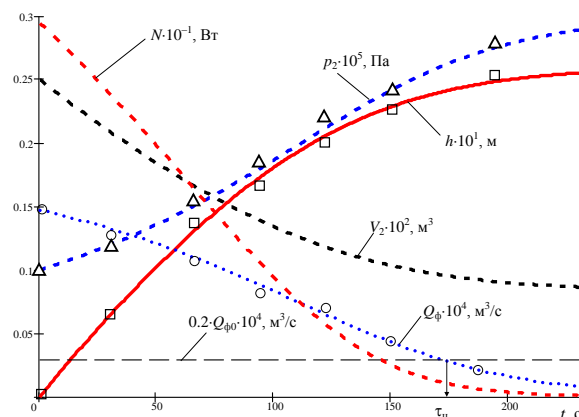


Рис. 4

Полученные зависимости позволяют определить длительность цикла $\tau_{ц}$ обессоливания, в течение которой достигается минимально допустимый расход фильтрата (на рис. 2 он принят равным 0,2 от начального расхода фильтрата, чему соответствует $\tau_{ц} = 171$ с), после которого целесообразно проводить регенерацию фильтровальной перегородки.

Экспериментальные задачи исследования состояли в следующем:

– проверка работоспособности установки на стадиях фильтрования и регенерации;

– опытная проверка построенной математической модели.

В качестве элемента, моделирующего мембрану, была использована фильтровальная перегородка 4, состоявшая из трех слоев: тканого слоя, зажатого между металлической сеткой и фторопластовой решеткой. Найденное опытным путем сопротивление составило $r_{фп} = 1,36 \cdot 10^{10}$ Па·с/м³.

В качестве среды, моделирующей загрязненную воду, использовалась водная суспензия мела. Опыты проводили при концентрации твердой фазы в суспензии $\varepsilon_c = 0,015; 0,020$ и $0,032$. Давление над поверхностью суспензии варьировали в диапазоне от 0,208 до 0,384 МПа.

В опытах измеряли высоту слоя осадка, объема фильтрата и сгущенной суспензии, а также продолжительность процесса фильтрования. Регенерация происходила практически мгновенно (примерно за 0,2...0,3 с).

В ходе многократных экспериментов была подтверждена принципиальная работоспособность установки не только на стадии фильтрования, но и на стадии регенерации – за счет накопленной в системе потенциальной энергии сжатого воздуха.

Полученные нами опытные данные удовлетворительно согласуются с результатами расчета. В качестве примера на рис. 4 показаны опытные точки для расхода фильтрата (кружки), высоты осадка (квадраты) и давления в пульсационной камере (треугольники).

В статье были приняты следующие условные обозначения: F – площадь

фильтра, м²; h – высота слоя осадка, м; N – мощность, затрачиваемая на фильтрацию жидкости через слой осадка, Вт; p_1 – давление подаваемой суспензии, Па; p_2 – давление в пульсационной камере, Па; Δp – перепад давлений на фильтре, Па; $Q_{ф}$ – расход фильтрата, м³/с; $r_{ос}$ – сопротивление слоя осадка, приведенное к сечению фильтра, Па·с/м³; $r_{фп}$ – сопротивление фильтровальной перегородки, приведенное к сечению фильтра, Па·с/м³; S – удельная поверхность частиц в осадке, м⁻¹; V_2 – объем газа в пульсационной камере, м³; ε_c – объемная концентрация твердой фазы в суспензии, отн. ед.; $\varepsilon_{ос}$ – объемная концентрация твердой фазы в осадке, отн. ед.; ζ – коэффициент извилистости осадка, отн. ед.

Индексы: 0 – начальное значение; 1 – параметры над слоем осадка; 2 – параметры под фильтровальной перегородкой; г – газ; ос – осадок на фильтровальной перегородке; пор – поры в осадке; с – суспензия; т – твердая фаза; ф – фильтрат; фп – фильтровальная перегородка.

В Ы В О Д Ы

1. Построенная математическая модель позволяет рассчитывать основные технологические параметры мембранного аппарата и удовлетворительно согласуется с опытными данными.

2. Опытные испытания фильтра диаметром 80 мм показали, что разработанный нами мембранный аппарат с регенерацией фильтровальной перегородки обратным током фильтрата при помощи пульсации может быть успешно использован в промышленных условиях.

3. Описанный в данной работе мембранный аппарат может быть рекомендован как для обессоливания природных и промышленных вод, так и для обработки суспензий с низкой концентрацией (не более 3...4%) в качестве фильтра-сгустителя, а также для непрерывного осуществления массообменных процессов (промывки, пропитки).

ЛИТЕРАТУРА

1. Заключение о выдаче инновационного патента Республики Казахстан на изобретение. / Азимов А.М., Абиев Р.Ш., Шакиров Б.С., Сатаев М.И., Жантасов К.Т., Зерхатбек М.М.; регистрационный номер № 2014/0022.1. от 03.10.2014, исходящий номер №25477. ■

2. *Абиев Р.Ш.* Моделирование пульсационного экстрактора U-образного типа // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2000, №8. С.11...14.

3. *Аэров М.Э., Тодес О.М.* Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968.

4. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1987.

Рекомендована кафедрой химической технологии неорганических веществ. Поступила 03.02.15.
