

УДК 626.16.06

*к.т.н. Чебан В. Г.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР),  
д.т.н. Зубков В. Е.,  
д.т.н. Шаповалов В. И.  
(г. Луганск, ЛНР)*

## МЕМБРАННЫЙ АППАРАТ С КЛИНООБРАЗНЫМИ НАПОРНЫМИ КАНАЛАМИ

*Проанализирована работа плоскоканальных мембранных аппаратов. Выявлены их основные достоинства и недостатки. Предложена принципиально новая конструкция мембранного аппарата с клинообразными напорными каналами. Обеспечение постоянной скорости течения очищаемой жидкости позволяет существенно повысить эффективность работы данного аппарата.*

*Ключевые слова:* мембранный аппарат, напорный канал, фильтрат, концентрат, мембрана.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Использование части потока очищаемой жидкости для непрерывной регенерации фильтрующей поверхности широко известно в практике очистки жидкостей от механических загрязнений. Обычно данный способ называют тангенциальной очисткой. Реализуется он широко в гидродинамических очистителях, но ещё шире — в мембранных аппаратах [1]. Значительное многообразие форм напорных каналов в гидродинамических очистителях свидетельствует о поиске путей повышения эффективности гидродинамической очистки и расширения возможностей её реализации. При этом в мембранных аппаратах число использованных форм напорных каналов ограничено пока единицами.

Общеизвестно, что наивысшая эффективность очистки жидкости от твёрдых загрязнений или, как говорят специалисты по мембранам, разделения её на фильтрат и концентрат может быть достигнута в напорном канале, обеспечивающем равномерный поток жидкости от входа в него к его выходу по всей ширине канала. И это вполне возможно, если в таком напорном канале в том же направлении ширина проницаемой поверхности имеет постоянное значение, а высота его, т. е. расстояние между образующими напорный канал по-

верхностями, линейно изменяется. Эффективность конкретного случая разделения жидкости заключается в том, что в таком канале сопротивление движению жидкости и потери её энергии минимальны, застойные зоны в нём отсутствуют, а разделение жидкости происходит равномерно по всей площади проницаемой поверхности. Причём в напорных каналах мембранных аппаратов в этом случае концентрационная поляризация наступает значительно позже или вообще не наступает. Вполне очевидно, что для достижения упоминаемой равномерности потока жидкости по всей ширине напорного канала нужно обеспечить как её равномерную подачу на всю ширину его входа, так и равномерный отвод сливаемой её части в виде концентрата также по всей ширине его выхода.

Исследования показали, что теоретически на данный момент существуют три идеальных напорных канала с соответствующими им условиями подачи жидкости и отвода концентрата. Первый из них образован двумя цилиндрическими поверхностями, одна из которых выполнена в виде непроницаемого кругового цилиндра, и назван он серпообразным [2]. Вторым выполнен двумя плоскими поверхностями в виде одностороннего клина, в котором непроницаемая поверхность расположена под острым углом к проницаемой поверхности, и

назван он клинообразным [3]. Третий представляет собой последовательное сочетание клинообразного и серпообразного напорных каналов [4]. В гидродинамических фильтрах все они конструктивно и практически реализуемы, а в мембранных аппаратах применим только один из них — клинообразный напорный канал. Связано это с тем, что эффективность мембранного разделения в значительной степени зависит от выхода напорного канала, и она повышается с уменьшением его высоты, которая, в свою очередь, зависит от качества подготовки разделяемой жидкости по гранулометрическому составу и технических возможностей исполнения.

Авторы работы [3], используя самый простой в изготовлении идеальный напорный канал в виде одностороннего клина, не обеспечили конструктивно упоминаемых выше условий подачи жидкости на вход напорного канала и отвода концентрата из него через выход, что привело к срыву равномерности потока жидкости в канале и снижению эффективности разделения. Подача разделяемой жидкости на вход напорного канала осуществляется через множество вертикальных подводящих жидкость отверстий, расположенных перед ним в ряд на расстоянии друг от друга, а отвод из него концентрата — через расположенные в ряд после выхода канала вертикальные отводящие отверстия. Такой подвод и отвод жидкости не могут обеспечить формирование потока разделяемой жидкости с одинаковой скоростью как вдоль, так и по всей ширине проницаемой поверхности. Причём потоки разделяемой жидкости в каждой паре соседних напорных каналов имеют противоположное направление и вынужденно конструктивно смещены в противоположные стороны от продольной оси пакета каналов, что обусловлено Z-образной формой образующих их опорных плит и необходимостью обеспечить все напорные каналы упоминаемыми отверстиями. Напорные каналы с такими потоками характеризуются наличием застойных зон как цен-

тров концентрационной поляризации и неравномерностью разделения жидкости по всей поверхности мембран. В связи с этим страдает эффективность их использования, увеличивается потребность в их обслуживании, появляется необходимость замены мембран. Обращает на себя внимание и тот факт, что отводу фильтрата из дренажного канала вообще не уделено должного внимания, хотя он также играет важную роль в поведении жидкости при её движении в напорном канале вдоль перфорированной поверхности и образовании на ней застойных зон. Об этом свидетельствует предусмотренный отвод фильтрата из каждого напорного канала через одно отверстие, причём расположенное на длинной, т. е. боковой, стороне мембранного элемента.

Дальнейший анализ исследуемого аппарата показал, что одной из причин появления подводящих, отводящих и сливных отверстий является отказ авторов от цельного корпуса и заимствование ими пакетированного, составленного из значительного количества опорных рамок с прокладками между ними, широко используемого в плоскокамерных мембранных аппаратах. С точки зрения современности выбор такой схемы аппарата в годы его разработки авторами был обоснован острой необходимостью замены плоских мембран, имеющих в то время худшие технологические и прочностные характеристики, чем нынешние. Это подтверждается дальнейшим отказом некоторых фирм от пакетированного корпуса и переводом конструкции аппарата на цельный цилиндрический корпус [5, 6]. К сожалению, в нём собственно напорные каналы не имеют признаков идеального напорного канала для разделения жидкости, так как по длине они постоянной высоты, но обращает на себя особое внимание тот факт, что условия подачи разделяемой жидкости и отвода концентрата соответствуют идеальному напорному каналу. Причём, как в клинообразном [3], так и в плоскокамерном [5] напорных каналах жидкость движется вдоль длинной стороны по-

верхности плоских мембран, в то время как в рулонном [6] — вдоль короткой. Поэтому в последнем случае вполне очевидно, что при одинаковой высоте выходов этих напорных каналов и скорости отвода концентрата через них в рулонном напорном канале требуется увеличение объёма слива концентрата во столько раз, во сколько длинная сторона мембраны больше короткой. Для условий же, когда ширина мембраны равна 0,9 м, а длина — более 3 м [6], такое увеличение составляет более чем в три раза и явно не в пользу широко используемого рулонного модуля. Если учесть сказанное, то использование рулонного модуля может быть рациональным только в мембранных аппаратах низкой производительности.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является разработка принципиально новой конструкции мембранного аппарата с постоянной скоростью течения очищаемой жидкости.

**Изложение материала и его результаты.** Общеизвестно, что в последние годы качественные характеристики плоских мембран резко возросли, уделено достаточное внимание предварительной подготовке жидкости к разделению в каждом конкретном случае и разработано множество эффективных способов регенерации мембранных элементов и почти полного их восстановления без разборки корпусов. Это, в свою очередь, является гарантией того, что именно при рациональном ведении процесса разделения жидкости, которое возможно только в мембранном аппарате с идеальными напорными каналами и соответствующими им условиями подачи разделяемой жидкости, отвода концентрата и фильтрата, замена мембран окончательно перестаёт быть определяющей в надёжной и непрерывной работе мембранных аппаратов. Поэтому необходимость в пакетированных корпусах отпадёт.

В рассматриваемом случае при наличии в исследуемом аппарате [3] напорного канала в виде одностороннего клина для достижения наивысшей эффективности

его работы достаточно конструктивно обеспечить рациональные условия подачи разделяемой жидкости и отвода концентрата в напорном канале, а также отвода фильтрата из дренажного канала. В результате проведённых исследований стало очевидным, что это возможно в мембранном аппарате, один из вариантов которого представлен на рисунке 1.

Мембранный аппарат содержит вертикальный корпус 1 с горизонтальными перегородками 2 и 3, между которыми зажат пакет 4. Пакет сложен из последовательно расположенных в ряд дренажных 5, промежуточных 6 элементов и расположенных между ними прямоугольных плоских мембран 7, торцевые концы которых заведены в полости прямоугольных рамок 8 и 9, присоединённых к противоположным торцам стяжных плит 10 и 11 с возможностью стягивания составляющих ряд элементов в пакет 4. При этом концы дренажных элементов 5, если они выполнены в виде сетки или проницаемого иного материала, загерметизированы до толщины материала или заменены непроницаемыми полосами той же толщины, к которым приклеены только поверхности торцевых концов мембран 7, поверхности боковых торцов которых приклеены только к боковым концам промежуточных элементов 6, выполненных каждый в виде пластины, толщина которой на ширине контакта её с жидкостью меньше её общей толщины, то есть в месте склеивания её с мембраной 7, и клинообразна по длине с вершиной клина на входе в напорный канал. Благодаря этому образованы два соседних напорных канала 12 с одинаковым направлением потоков жидкости в них, расположенных между двумя дренажными каналами 13, в первом из которых вход для жидкости и выход для концентрата выполнены на всю ширину  $B$  напорного канала, а вторые выполнены каждый с двумя боковыми выходами для фильтрата на всю длину  $L$  дренажного канала. Клинообразная форма менее тонкой части промежуточного элемента 6 обеспечивает линейное

изменение высоты напорного канала 12 по всей его длине и ширине, как и в исследуемом аппарате. Горизонтальные перегородки 2 и 3 разделяют корпус 1 на три части. Первая из них расположена перед пакетом 4, то есть перед входами в напорные каналы 12, и играет роль подводящего коллектора 14 жидкости. Вторая из них распо-

ложена после пакета 4, то есть после выходов из напорных каналов 12, и играет роль сливного коллектора 15 концентрата, а третья часть — вокруг пакета 4 и играет роль отводящего коллектора 16 филтрата, при этом каналы 12 и 13 непосредственно соединены с полостями соответствующих им коллекторов.

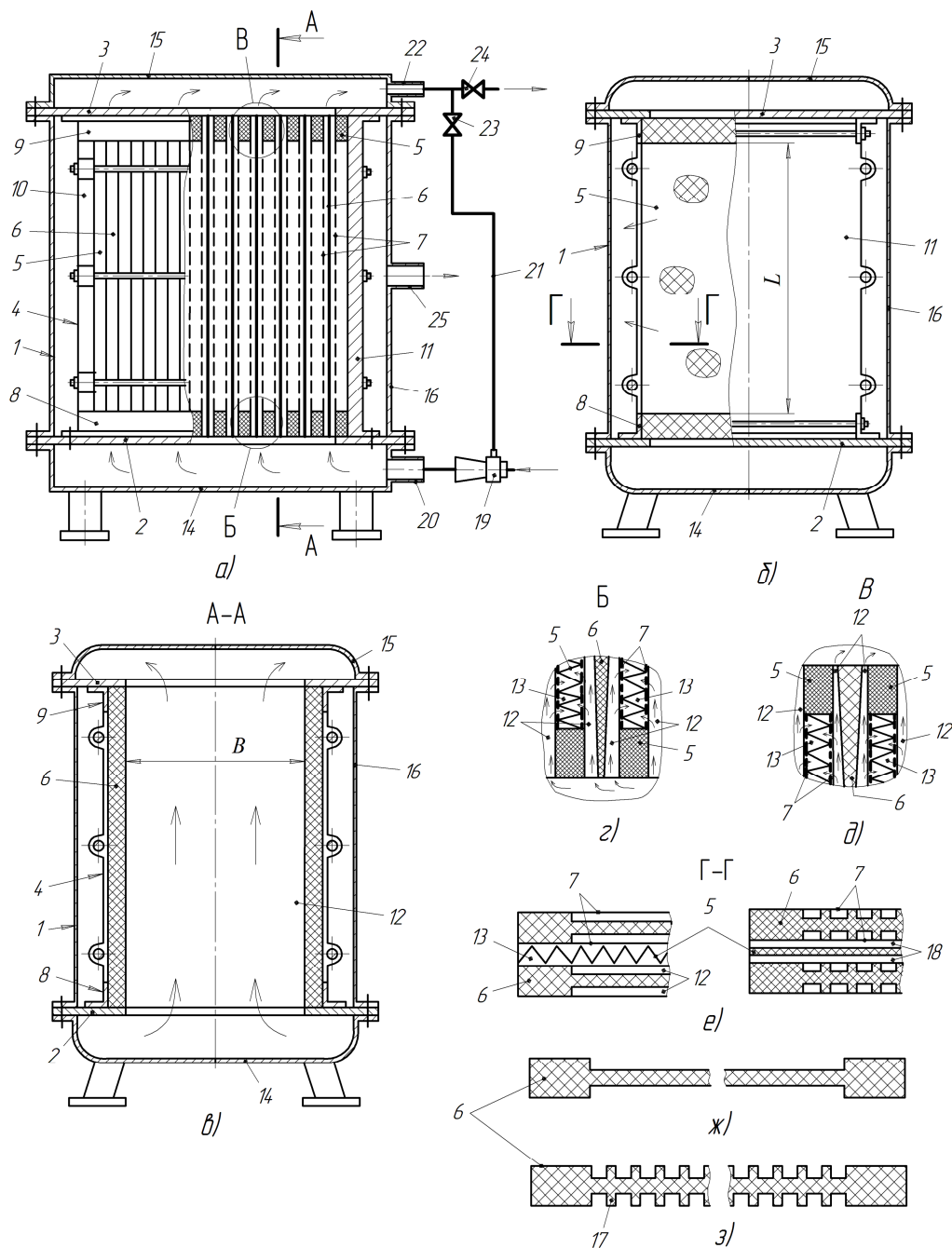


Рисунок 1 Мембранный аппарат с клинообразными напорными каналами

Выполнение напорных каналов 12 без подкладок (рис. 1, *з*) ухудшает или делает невозможной обратную промывку мембран фильтратом, поэтому промежуточные элементы 6 могут быть выполнены с продольными рёбрами 17 (рис. 1, *з*). С целью же расширения возможности изготовления дренажных каналов 13 дренажные элементы 5 могут быть выполнены в виде пластин с канавками 18 на длине канала 13, расположенными накрест рёбрам 17 промежуточных элементов 5 (рис. 1, *е*).

Известно, что высота известных напорных каналов в мембранных аппаратах лежит в пределах  $0,5 \div 5$  мм, причём чем меньше высота напорного канала, тем выше показатели аппарата, но тем хуже условия исполнения таких каналов. Следовательно, для облегчения изготовления возможной высоты канала нужно увеличение сливаемой части концентрата без снижения производительности аппарата по фильтрату. С этой целью мембранный аппарат оборудуют дополнительным циркуляционным насосом или, по возможности, эжектором 19, установленным перед патрубком 20 подводящего коллектора 14 жидкости, камера пониженного давления которого с помощью циркуляционного трубопровода 21 сообщена с полостью патрубка 22 сливного коллектора 15 концентрата.

Мембранный аппарат работает следующим образом.

Жидкость, подлежащую разделению на фильтрат и концентрат, непрерывным потоком и под давлением подают в эжектор 19, откуда она через патрубок 20 сначала поступает в подводящий коллектор 14, а затем непосредственно и одновременно во все напорные каналы 12. Здесь она движется вдоль плоских мембран 7, причём с постоянной скоростью по всей их ширине, и разделяется на фильтрат и концентрат. Первый из них проникает через мембраны и сначала поступает в дренажные каналы 13, затем из них выходит непосредственно в отводящий коллектор 16 и оставляет аппарат через патру-

бок 25. Второй же продолжает движение вдоль напорного канала 12 и через его выход сначала попадает непосредственно в сливной коллектор 15, а затем покидает корпус 1 через сливной патрубок 22, откуда посредством дросселей 23 и 24 часть его сливается из аппарата, а часть поступает в циркуляционный трубопровод 21. Далее под действием разряжения, создаваемого в камере пониженного давления работающего эжектора 19, концентрат из циркуляционного трубопровода 21 поступает в эжектор 19, а затем в смеси с основной разделяемой жидкостью движется по выше описанному пути.

Процесс разделения жидкости продолжается до заранее установленной степени засорения мембран 7, после чего аппарат без его разборки останавливают на регенерацию одним из известных способов. Если напорные каналы 12 выполнены без подкладок под мембраны 7, то желательной является их промывка в прямом направлении повышенным расходом жидкости. Более эффективным способом регенерации мембран 7 является промывка их с повышенным расходом фильтрата в обратном направлении, что возможно только при наличии в напорных каналах 12 под мембранами 7 подкладок. Не исключены и случаи комбинированных способов регенерации мембран.

Изготовление каждого из промежуточных элементов 6 из прямоугольной пластины, контактирующая в напорном канале 12 с жидкостью часть которой имеет меньшую толщину, чем общая, и выполнена в виде клина с вершиной на входе и основанием на выходе напорного канала, обеспечивает получение в одном элементе двух напорных каналов 12 с одинаковым направлением потока жидкости в них, что вместе с другими мерами упрощает решение вопроса рациональной подачи и такого же слива жидкости в виде концентрата из напорного канала. Так, расположение разделяющего жидкость пакета 4 в корпусе 1 между горизонтальными перегородками 2

и 3 максимально приближает полости всех коллекторов к соответствующим входам и выходам каналов. Это вместе с наличием рамок 8 и 9, в свою очередь, обеспечивает выполнение ширины и высоты входа и выхода напорных каналов 12 такими же, как и их ширина и высота. В результате достигается равномерность подачи жидкости по всей площади поперечного сечения напорного канала 12 и слив её части в виде концентрата из него, что является гарантией максимально возможной равномерности движения жидкости по всей длине и ширине напорного канала 12, то есть мембран 7. Это же, как известно, вместе с высокой и равномерной по ширине скоростью жидкости в канале обеспечивает наилучшие условия разделения жидкости гидродинамическим способом, который имеет при этом место. Благодаря этому застойные зоны у поверхности мембран 7 отсутствуют, концентрационная поляризация на их поверхности наступает значительно позже, чем в исследуемом аппарате, или вообще не наступает, что способствует повышению производительности предложенного аппарата.

Максимальное приближение полостей всех коллекторов к входам и выходам из напорных каналов обеспечивает их непосредственное сообщение, то есть без всякого рода отверстий, что вместе с постоянной скоростью жидкости в каналах значительно снижает потери давления жидкости и фильтрата. Расположение пакета 4 в цельном корпусе 1 обеспечивает снижение давления на внешние поверхности составляющих его элементов, что, например, позволяет резко уменьшить толщину стяжных плит 10 и 11 и меньше беспокоиться о состоянии герметизации каналов. Наличие корпуса 1 обеспечивает высокую безопасность работы аппарата без принятия дополнительных защитных мер. В случае исполнения пакета 4 квадратной формы корпус 1 целесообразней выполнять цилиндрической формы как с технической, так и эстетической точек зрения.

Оценивая клинообразный напорный канал [3], выполненный одной проницаемой и одной непроницаемой поверхностями, с плоскокамерным напорным каналом [5, 6], образованным двумя проницаемыми поверхностями, становится очевидным, что при определённых условиях производительность последнего по фильтрату выше. Или при одинаковой производительности число напорных каналов в аппарате с идеальным каналом в форме одностороннего клина должно быть больше. Поэтому, чтобы избежать этого, следует идеальный напорный канал выполнить в виде двустороннего клина, образованного двумя проницаемыми поверхностями. Оказалось, что теоретически это вполне возможно, но с практической стороны исполнение идеального напорного канала со столь малой высотой выхода возможно не в мембранных аппаратах, а в фильтрах тонкой очистки с фильтрующей поверхностью в виде сеток со значительно большим живым сечением, чем у мембран.

Кроме того, более чем полувековая практика разработки и эксплуатации множества технологических агрегатов показывает, что эффективность работы каждого из них повышается с увеличением его производительности, что вряд ли является исключением для технологии разделения жидкости на фильтрат и концентрат. Имеющее же ныне место дробление её на несколько мелких однотипных процессов может носить только частный характер, например, при низкой производительности мембранного аппарата или установки.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Проведённые исследования показали, что эффективность работы мембранного аппарата зависит не только от формы напорного канала, но и от конструкции и расположения других элементов, обеспечивающих совместно оптимальные условия его работы. Это утверждение реализовано в предлагаемом в данной работе мембранном аппарате с клинообразными напорными каналами.

## Библиографический список

1. Список внедрённых установок по водоподготовке и очистке воды [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://epcs.ru/works>.
2. Чебан, В. Г. Практический расчёт фильтроэлемента с грушеобразным профилем фильтрующей поверхности очистителя маловязких жидкостей [Текст] / В. Г. Чебан // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2010. — Вып. 31. — С. 115–126.
3. А. с. 1017361 СССР, МПК В01Д 13/00. Мембранный аппарат / В. М. Гуцалюк, Р. К. Казимиров, В. Р. Кулинченко. — Опубл. 15.05.83, Бюл. № 18.
4. Чебан, В. Г. Одноканальный гидродинамический очиститель типа «Цилиндр в цилиндре» [Текст] / В. Г. Чебан, С. С. Антоненко // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. — Кременчук : КрНУ, 2012. — Вип. 3/2012 (74). — С. 98–101.
5. Плоский мембранный модуль фирмы Rochem. Фильтрующий пакет FM [Электронный ресурс]. — Режим доступа : [www.rochem.ru/1\\_3\\_3.php](http://www.rochem.ru/1_3_3.php).
6. Основы проектирования производств, использующих мембранное разделение. Основные типы мембранных модулей [Электронный ресурс] — Режим доступа : [www.membrane.msk.ru/books/?id\\_b=98id\\_bp=164](http://www.membrane.msk.ru/books/?id_b=98id_bp=164).

© Чебан В. Г.

© Зубков В. Е.

© Шаповалов В. И.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.,  
д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.*

Статья поступила в редакцию 01.11.19.

к.т.н. Чебан В. Г. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР), д.т.н. Зубков В. Е., д.т.н. Шаповалов В. И.  
(м. Луганськ, ЛНР)

**МЕМБРАННИЙ АПАРАТ З КЛИНОПОДІБНИМИ НАПІРНИМИ КАНАЛАМИ**

*Проаналізовано роботу плоскоканалних мембранних апаратів. Виявлено їх основні переваги та недоліки. Запропоновано принципово нову конструкцію мембранного апарата з клиноподібними напірними каналами. Забезпечення постійної швидкості течії очищеної рідини дозволяє суттєво підвищити ефективність його роботи.*

**Ключові слова:** мембранний апарат, напірний канал, фільтрат, концентрат, мембрана.

**PhD in Engineering Cheban V. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR), Doctor of Technical Sciences**

**Zubkov V. E., Doctor of Technical Sciences Shapovalov V. I. (Lugansk, LPR)**

**MEMBRANE APPARATUS WITH WEDGE-SHAPED PRESSURE CHANNELS**

*The operation of flat-channel membrane apparatus is analyzed. Their main advantages and disadvantages are revealed. A fundamentally new design of the membrane apparatus with wedge-shaped pressure channels is proposed. This apparatus allows significantly improve the efficiency of its operation by providing a constant flow rate of the treated liquid.*

**Key words:** membrane apparatus, pressure channel, filtrate, concentrate, membrane.