

(УДК) 629.7.048

Экспериментальная эксплуатация мембранного фильтра-разделителя (МФР) на международной космической станции

Л.С. Бобе, А.А. Солянкина, В.Б. Астафьев, В.Ф. Стерин, П.О. Андрейчук, Е.Д. Запрягайло.

Аннотация

Дано описание мембранного фильтра-разделителя и принципа разделения газожидкостного потока с помощью полупроницаемых перегородок и влагоудерживающих материалов, на основании которого в ОАО «НИИХиммаш» разработана двухступенчатая схема сепарации для систем обеспечения жизнедеятельности космических станций. В качестве предварительной ступени сепарации работает мембранный фильтр-разделитель. Он создан для условий постоянно возрастающей загрязненности конденсата при длительных полетах и нестабильности его поступления в систему с целью увеличения ресурса второй ступени сепарации – разделителя на никелевых пористых трубках. В настоящее время мембранный фильтр-разделитель успешно работает на МКС с 1 сентября 2009 года. Отечественные системы регенерации с двухступенчатыми статическими сепараторами превосходят зарубежные по ресурсу, надежности, энергопотреблению, качеству отсепарированного конденсата.

Ключевые слова

система водообеспечения; мембранная технологи,; влагопоглощение; сепарация жидкости; статическая сепарация; гидрофильная мембрана..

Водообеспечение космических станций осуществляется за счет извлечения воды из жидких продуктов жизнедеятельности экипажа и ее возврата в цикл потребления. Недостаток воды восполняется путем доставки с Земли. На международной космической станции (МКС) эксплуатируется разработанная в ОАО «НИИХиммаш» система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги (СРВ-К2М), которая очищает конденсат до уровня питьевой воды и обеспечивает 65% потребности станции в питьевой воде. Для регенерации воды используется сорбционно-каталитический метод с последующей минерализацией, консервацией ионным серебром и пастеризацией очищенной воды [1, 2].

Конденсат образуется из паров воды, выделяемых космонавтами. Пары конденсируются в системе кондиционирования воздуха станции и транспортируются в

систему регенерации воды СРВ-К2М в виде газожидкостной (конденсатовоздушной) смеси. Поэтому в состав системы регенерации должен входить аппарат для отделения жидкости от транспортного воздуха в условиях динамической невесомости. Процесс разделения смеси может происходить с использованием сил поверхностного натяжения жидкости. Сепараторы такого типа часто называют статическими. Их отличает высокая надежность, малое энергопотребление, простота в управлении, хорошее качество отсепарированного конденсата. Основным их недостатком особенно при разделении газожидкостных смесей, содержащих загрязненные и биогенные жидкости, является сравнительно небольшой ресурс в связи с забивкой пор капиллярно-пористых перегородок при фильтровании и за счет интенсивного развития микрофлоры. Однако существует ряд способов, позволяющих успешно справиться с этим недостатком, т.е. значительно увеличить ресурс статических сепараторов. Один из способов увеличения ресурса использован в настоящей работе.

На станции «Мир» и на МКС до сентября 2009 года в системе СРВ-К2М эксплуатировался одноступенчатый статический сепаратор. Сепаратор представляет собой миниатюрный кожухотрубчатый аппарат с двумя трубными решетками. В качестве труб используются полупроницаемые (непроницаемые по газу до определенного перепада давления) элементы с капиллярно-пористыми стенками, спеченные из металлического порошка. Газожидкостной поток проходит внутри трубок, структура потока – пробковая, с переходом к кольцевой. Межтрубное пространство заполнено жидкостью, находящейся при пониженном давлении по отношению к трубному пространству. За счет перепада давления жидкость проходит через пористую стенку в межтрубное пространство, откуда отводится для дальнейшей очистки. После отвода из трубок жидкости в них остается только газ, который не может попасть в водяную полость межтрубного пространства, т.к. перепад давления на стенке трубок, создаваемый специальным устройством, меньше критического давления

$$\Delta P_{кр} = \frac{2\sigma \cos \Theta}{r}, (1)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости (конденсата атмосферной влаги); Θ – угол смачивания; r – радиус поры.

Проведенными исследованиями было установлено, что пористые элементы из никеля, титана и коррозионно-стойкой стали являются гидрофильными, т.е. угол смачивания у них является минимальным. Металлическим элементам не требуется специальной гидрофилизации поверхности пор, а их гидрофобизация – уменьшение величины $\Delta P_{кр}$ – возможна только при высушивании элементов после их нахождения в загрязненной воде.

Рабочая поверхность пористых металлических элементов подвержена биообрастанию, что приводит к уменьшению ресурса сепаратора. В связи с этим целесообразно использовать двухступенчатую схему сепарации с мембранной технологией очистки конденсата в первой ступени сепарации. Требованием к первой ступени сепарации является не только отделение жидкости от газа и отделение газа от жидкости, но и частичная аккумуляция подаваемой жидкости с одновременным подавлением развития микрофлоры. В качестве второй ступени сепарации может использоваться штатный разделитель с пористыми металлическими элементами.

Таким образом, необходимо организовать в одном аппарате процессы накопления жидкости посеребренным пористым материалом и ее удаления с помощью селективной мембраны. При этом посеребренный пористый материал распределяет влагу вдоль всей поверхности сепарации и угнетает развитие микрофлоры, а полупроницаемая гидрофильная мембрана обеспечивает сепарацию жидкости от воздуха. Принципиальная схема сепарации приведена на рисунке 1. При использовании мембран с небольшим размером пор (меньше 1,0 мкм) возможен унос жидкости в виде отдельных капель. Поэтому необходимо иметь вторую ступень сепарации, а именно штатный разделитель с пористыми никелевыми трубками.

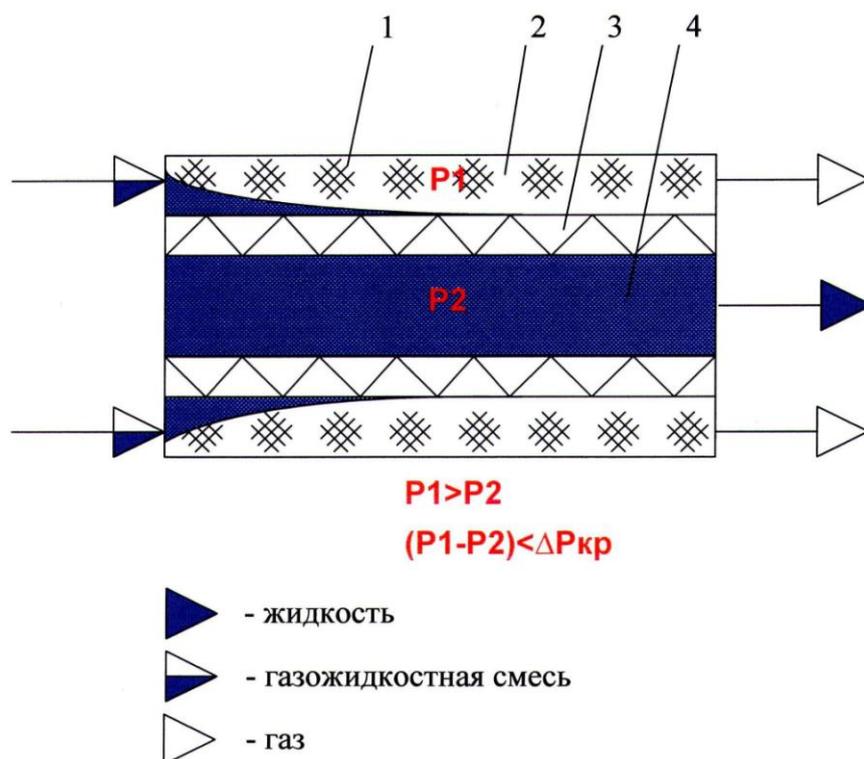
В работе были испытаны мембраны из ацетата целлюлозы, нитрата целлюлозы, полиэфирсульфона, капрона и гидрофилизированного фторопласта. По результатам испытаний был выбран элемент патронный мембранный с гофрированной двухслойной мембраной из гидрофилизированного фторопласта с размерами пор $6,5 \cdot 10^{-7}$ м и $4,5 \cdot 10^{-7}$ м производства ООО НПП «Технофильтр». Эта мембрана имела максимальное значение критического перепада давления $\Delta P_{кр} = 0,08$ МПа.

Вариант гидрофобных материалов был отвергнут, так как исследования показали, что гидрофобные материалы довольно быстро утрачивают свою способность задерживать жидкость.

На основе элемента патронного мембранного с двухслойной мембраной из гидрофилизированного фторопласта в ОАО «НИИхиммаш» был разработан мембранный фильтр-разделитель (МФР) [3, 4, 5]. В мембранном фильтре-разделителе реализуется способ сепарации жидкости из газожидкостного потока в условиях невесомости, основанный на использовании капиллярных сил. МФР, схема которого приведена на рисунке 2, состоит из наружного цилиндрического корпуса, элемента, образующего кольцевой канал, и влагопоглощающего и влагоудерживающего материала в виде кубиков размером 5x5x5 мм в канале.

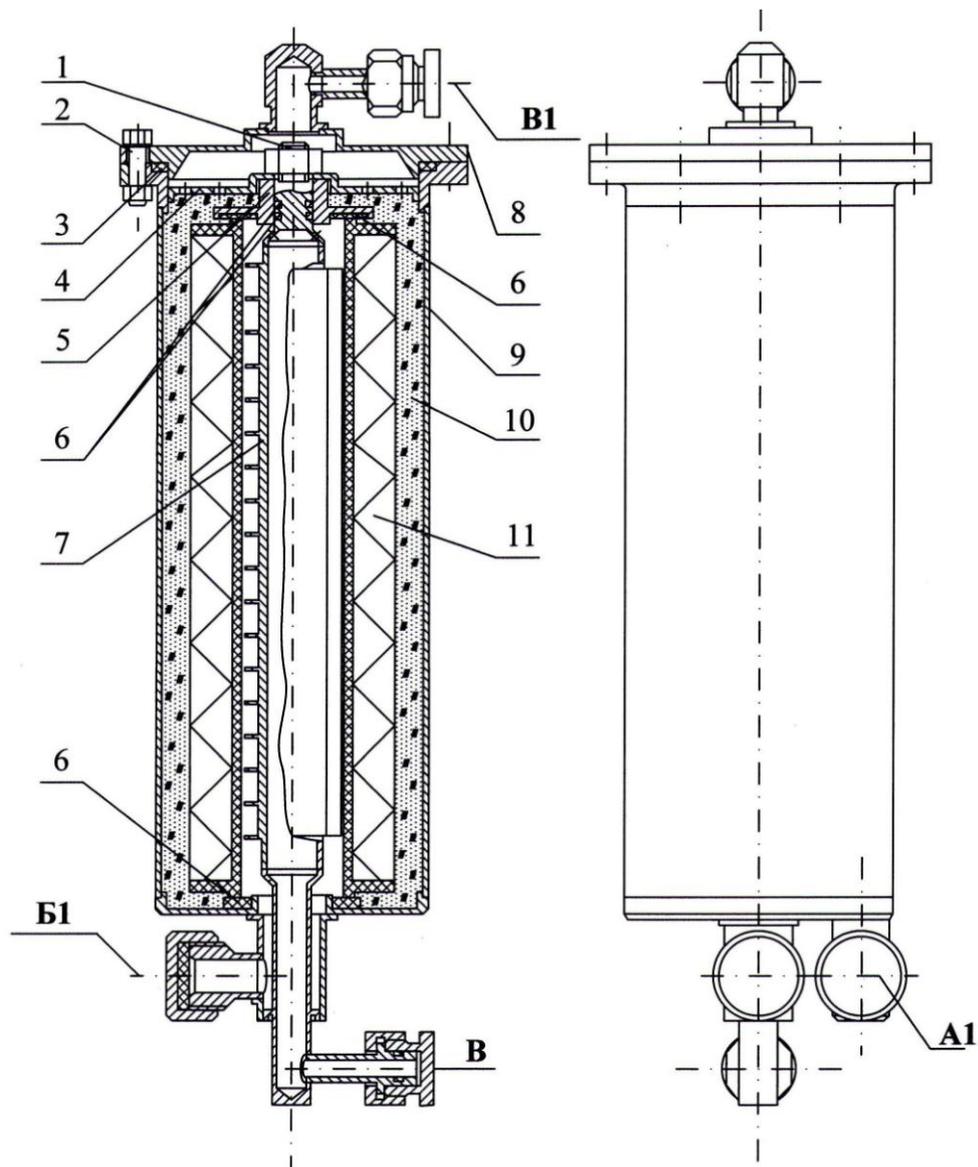
Газожидкостная смесь поступает в кольцевой канал МФР. Жидкость в канале поглощается, удерживается и транспортируется к мембранному элементу пористым эластичным материалом. Под действием перепада давления жидкость отсасывается через мембрану в специальную емкость, откуда отводится для очистки. Воздух с возможным небольшим количеством капельной жидкости направляют во вторую ступень сепарации. В качестве влагопоглощающего и влагоудерживающего материала используется поливинилформаль пористый (ПВФП). Для предотвращения развития микрофлоры ПВФП посеребрен.

Таким образом, в МФР одновременно осуществляются аккумуляция жидкости во влагопоглощающем и влагоудерживающем пористом материале, ее транспорт пористым материалом к гидрофильной мембране и отсос жидкости за счет перепада давления на мембране, не превышающего критический.



- 1 – насыпка из поливинилформалья пористого (ПВФП),
 2 – внешняя полость МФР, 3 – элемент патронный мембранный, 4 – внутренняя полость МФР.

Рисунок 1 – Принципиальная схема сепарации



1 – гайка, 2 – болты, 3 – прокладка, 4 – решетка, 5 – втулка, 6 – кольца уплотнительные, 7 – стержень, 8 – крышка, 9 – корпус, 10 – засыпка из поливинилформалия пористого, 11 – элемент патронный мембранный.

A1 – вход газожидкостной смеси, **B1** – выход жидкости, **B1** – выход воздуха, **B** – технологический штуцер.

Рисунок 2 – Схема мембранного фильтра-разделителя

Жидкость подается в МФР периодически. Следовательно, отвод жидкости через мембрану осуществляется в квазистатическом режиме, что позволяет значительно увеличить время сепарации и ресурс работы по сравнению с сепаратором, работающим в динамическом режиме. Кроме сепарации жидкости происходит ее очистка от различных примесей и обеззараживание.

При сепарации (фильтровании) жидкости с помощью полупроницаемых перегородок реализуется течение однофазной среды через пористый элемент при ламинарном режиме, которое описывается уравнением Дарси

$$Q = \frac{K_{\phi} S \Delta P}{H}, \quad (2)$$

где Q – пропускная способность элемента, K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, S – площадь элемента, ΔP – перепад давления на элементе, H – толщина элемента.

Загрязнения в жидкостях имеют полидисперсный характер, поэтому фильтрование может сопровождаться полным или частичным закупориванием пор, образованием над входом в поры рыхлых структур или образованием осадка на поверхности элемента. Независимо от схемы задержки частиц на фильтрующем элементе процесс фильтрования при постоянном давлении ($\Delta P = \text{const}$) описывается следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{dR}{dV} = K_m R^b, \quad (3)$$

где R – общее гидравлическое сопротивление фильтрующего элемента (с учетом загрязнений), V – удельный объем жидкости, прошедшей через элемент, K_m – коэффициент, характеризующий интенсивность уменьшения скорости фильтрования или увеличения сопротивления элемента в процессе фильтрования; b – показатель, зависящий от схемы улавливания загрязнений.

Максимальное увеличение гидравлического сопротивления на фильтрующем элементе в единицу времени наблюдается при полном закупоривании его пор ($b=2$), минимальное – при отложении осадка на его поверхности ($b=0$). Когда процесс фильтрования протекает одновременно по двум или нескольким из рассмотренных схем, значение показателя будет отличаться от приведенных, оставаясь в интервале $0 \leq b \leq 2$.

При различных схемах улавливания загрязнений в процессе фильтрования зависимости между переменными, характеризующими этот процесс, имеют различный характер, однако для каждого случая можно получить зависимость, которая выражает связь только между двумя переменными. Эти зависимости графически изображаются для соответствующей схемы фильтрования прямой линией, что позволяет установить, по какой схеме протекает процесс фильтрования в конкретных условиях. [6]

В ОАО «НИИхиммаш» разработана методика определения безразмерной постоянной фильтрования для разделителя с пористыми никелевыми трубками. При составлении методики было принято, что фильтрование конденсата атмосферной влаги осуществляется

по схеме улавливания загрязнений промежуточного типа. Для обобщения результатов находятся безразмерные переменные фильтрования, в координатах которых строится прямая, характеризующая процесс фильтрования. Величины A и T являются безразмерными переменными фильтрования:

$$A = \frac{\tau}{q} W_{нач}, \quad (4)$$

где τ – время от начала фильтрования, q – удельное количество жидкости (на единицу поверхности), $W_{нач}$ – начальная скорость фильтрования,

$$T = \frac{W_{нач}}{d_{нач}} \tau, \quad (5)$$

где $d_{нач}$ – среднеэффективный диаметр пор, определяемый по $W_{нач}$.

Безразмерная постоянная фильтрования X определяется графически по углу наклона прямой к оси абсцисс и численно равна тангенсу указанного угла.

Определение постоянной фильтрования позволяет рассчитать ресурс $Q_{рес}$ разделителя при сепарации (фильтровании) жидкости постоянного качества. Величина ресурса обратно-пропорциональна значению постоянной фильтрования:

$$Q_{рес} = \frac{d_{нач}}{X} S. \quad (6)$$

Применение разработанной методики определения безразмерной постоянной фильтрования для расчета мембранного фильтра-разделителя является затруднительным, т.к. здесь процесс фильтрования протекает одновременно по нескольким схемам. В этом случае рекомендуется применять более точный метод графического корригирования, который заключается в нахождении на построенных графиках прямых участков, для которых определяются постоянные фильтрования. Однако при этом не учитывается последовательный переход от одной схемы задержания загрязнений к другой. Поэтому на данный момент исследуется механизм задерживания загрязнений в МФР и одновременно проводится экспериментальная эксплуатация аппарата на борту МКС, целью которой является определение ресурса в реальных условиях работы.

В августе 2009 года на борт МКС были доставлены 2 МФР (внешний вид МФР приведен на рисунке 3). Аппараты доставляются на МКС полностью заправленными дистиллированной водой с содержанием ионов серебра 10 мг/л. Подобная подготовка предотвращает развитие микрофлоры во время транспортировки и хранения на борту.

С 1 сентября 2009 года в качестве экспериментального изделия МФР начал работу на борту МКС в качестве предварительной ступени сепарации, аппарат установлен перед

блоком разделения и перекачки конденсата системы регенерации воды из конденсата атмосферной влаги. Схема узла сепарации, реализованная на борту с введением мембранного фильтра разделителя, приведена на рисунке 4.

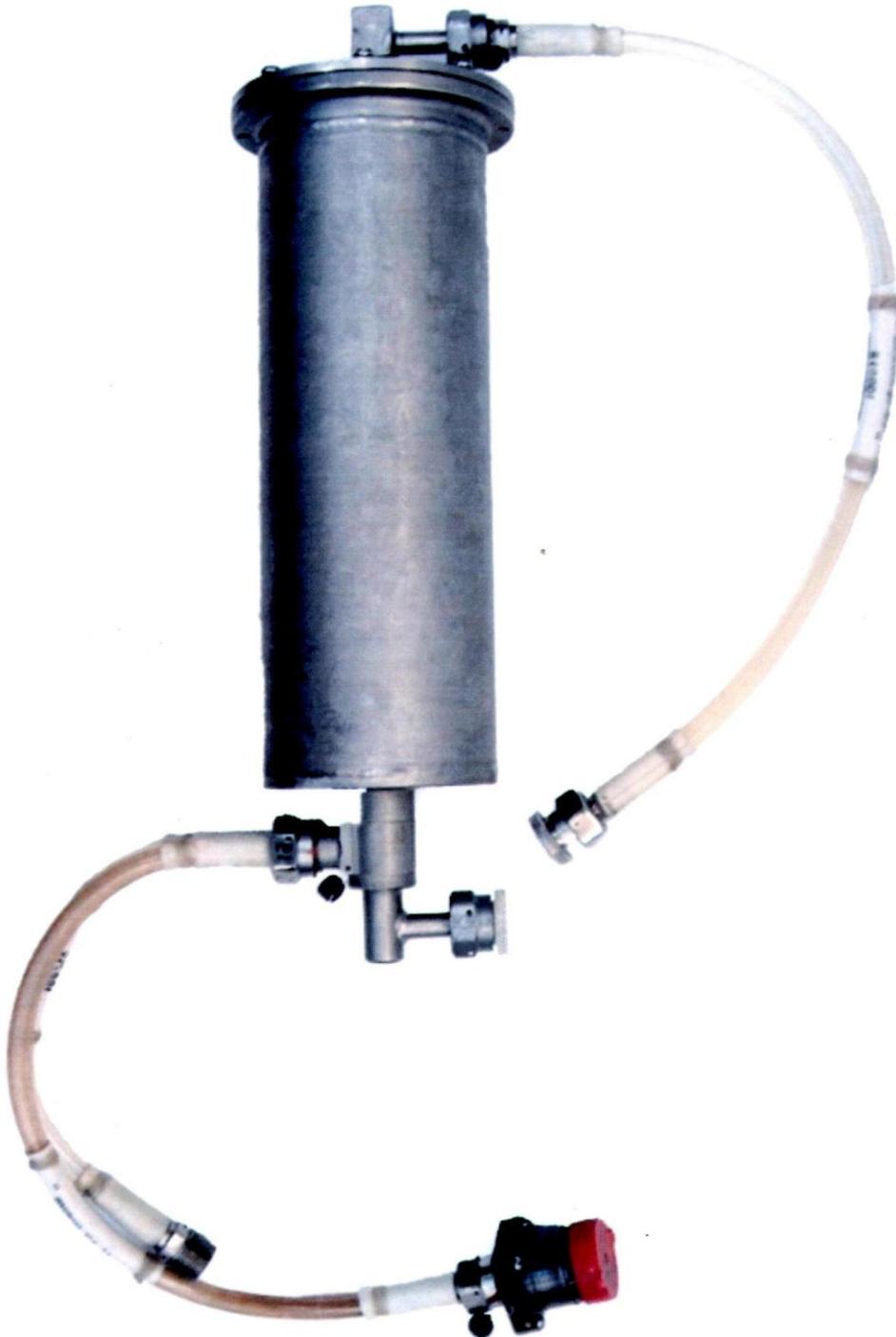


Рисунок 3 – Внешний вид мембранного фильтра-разделителя

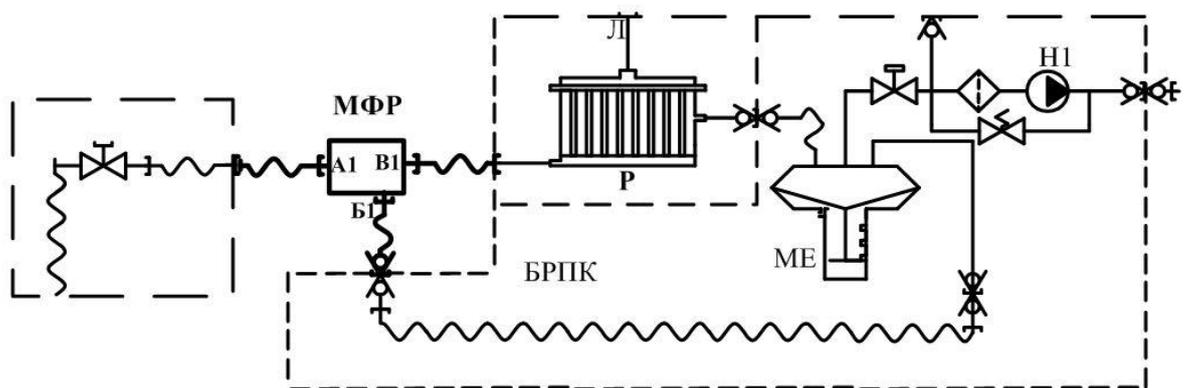
Аппараты поставляются на борт с заправленными жидкостью внутренней и внешней полостями. Внешняя полость МФР подключается к линии подачи газожидкостной смеси, из

внутренней полости жидкость откачивается мембранным насосом и подается в блок колонок очистки. Воздух, отводимый из внешней полости, поступает в трубное пространство разделителя с никелевыми трубками (вторая ступень разделения).

При включении аппарата в схему СРВ-К2М подача конденсата начинается только после 3-х срабатываний мембранного насоса. Объем жидкости, откачиваемой за один цикл срабатывания мембранного насоса, составляет около 180 мл, таким образом, за три срабатывания удаляется свободная жидкость из внешней полости МФР (объем внешней полости без учета насыпки из поливинилформалья пористого составляет около 700 мл). После такой подготовки внутренняя полость аппарата остается заполненной водой, что обеспечивает необходимое разрежение на мембране, а насыпка из поливинилформалья пористого готова аккумулировать поступающую порцию жидкости, космонавты включают перекачку конденсата.

При регулярном контроле космонавтами узла сепарации подтверждена 100% сепарация жидкости от газа и газа от жидкости.

По итогам работы на борту мембранного фильтра-разделителя можно сделать вывод о том, что ресурс системы СРВ-К2М по разделению газожидкостной смеси значительно увеличился. Нарботка узла сепарации до замены выработавшего ресурс оборудования составляет около 1400 л по отсепарированному конденсату (почти 1 год непрерывной работы на борту) при собственной массе 8 кг.



МФР – мембранный фильтр-разделитель, БРПК – блок разделения и перекачки конденсата, Р – разделитель с пористыми никелевыми трубками, МЕ – мембранная емкость, Л – выход воздуха в кабину, Н1 – мембранный насос.

Рисунок 4 – Схема узла двухступенчатой статической сепарации

В настоящее время ведутся работы по подбору более гидрофильных полимерных мембран, которые обеспечат надежную сепарацию и одновременно большой ресурс МФР, и разрабатывается методика расчета постоянной фильтрации для МФР.

Библиографический список

1 Самсонов Н.М., Бобе Л.С., Гаврилов Л.И., Кочетков А.А., Курмазенко Э.А., Романов С.Ю., Железняков А.Г., Баранов В.М., Синяк Ю.Е. Регенерационные системы жизнеобеспечения экипажей космических станций // Известия РАН. Энергетика. 2009, с.61-68.

2 Бобе Л.С., Самсонов Н.М., Новиков В.М., Кочетков А.А., Солоухин В.А., Телегин А.А., Андрейчук П.О., Протасов Н.Н., Синяк Ю.Е. Перспективы развития систем регенерации воды обитаемых космических станций // Известия РАН. Энергетика. 2009, с.69-78.

3 Бобе Л.С., Солянкина А.А., Астафьев В.Б., Камилавочников И.А., Стерин В.Ф.

«Использование мембранных патронных элементов для сепарации конденсата атмосферной влаги в системах регенерации воды». 7-ая международная конференция «Авиация и космонавтика-2008»: Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008, с.131-132.

4 Солянкина А.А. «Сепарация газожидкостной смеси на основе гидрофильных мембранных элементов». 2-я Всероссийская конференция ученых, молодых специалистов и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2009», 20-24 апреля 2009 г., Москва. Тезисы докладов. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009, с.79.

5 Бобе Л.С., Солянкина А.А., Астафьев В.Б., Стерин В.Ф. «Исследование аккумулирующего разделителя на основе мембранных патронных элементов для сепарации конденсата атмосферной влаги в системах регенерации воды». Системный анализ, управление и навигация: Сборник тезисов докладов. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009, с.144-145.

6 Жужиков В.А. Фильтрация. М., «Химия», 1971, 440 с.

Сведения об авторах:

Бобе Леонид Сергеевич профессор ОАО «НИИХиммаш», д.т.н., Ул. Б.Новодмитровская, 14, Москва, 127015; тел.: (495) 685-02-33; e-mail: L_bobe@niichimmash.ru

Солянкина Анна Александровна, инженер ОАО «НИИХиммаш». Ул. Б.Новодмитровская, 14, Москва, 127015; тел.: (495) 685-18-69; e-mail: anna.solyankina@gmail.com

Астафьев Валерий Борисович, ОАО «НИИХиммаш», к.т.н., Ул. Б.Новодмитровская, 14,

Москва, 127015; тел.: (495) 685-04-86.

Стерин Владимир Фридрихович, старший научный сотрудник ОАО «НИИхиммаш», к.т.н.
Ул. Б.Новодмитровская, 14, Москва, 127015; тел.: (495) 685-18-69; e-mail: vfsterin@rambler.ru

Андрейчук Петр Олегович, начальник сектора РКК «Энергия». Ул. Б.Новодмитровская, 14,
Москва, 127015; тел.: (495) 685-02-33; e-mail: Lssd@niichimmash.ru Ул. Б.Новодмитровская,
14, Москва, 127015; тел.: (495) 685-02-33; e-mail: Lssd@niichimmash.ru

Запрягайло Елена Дмитриевна главный инженер РКК "Энергия" Ул. Б.Новодмитровская, 14,
Москва, 127015; тел.: (495) 685-02-33; e-mail: Lssd@niichimmash.ru