

(УДК) 629.7.048

Механизм фильтрования в мембранном фильтре-разделителе системы СРВ-К2М

Л.С. Бобе, В.Б. Астафьев, А.А. Капица, В.Ф. Стерин.

Аннотация

На Международной космической станции (МКС) в системе регенерации воды из конденсата атмосферной влаги проходит экспериментальную эксплуатацию мембранный фильтр-разделитель. Мембранный фильтр-разделитель (МФР) играет роль предварительной ступени сепарации в блоке разделения и перекачки конденсата атмосферной влаги. Помимо сепарации конденсата из конденсато-воздушного потока мембранный фильтр-разделитель обеспечивает предварительную очистку жидкости путем ее фильтрования через микропористые мембраны. Принцип работы МФР и его устройство описаны в работе [1]. В статье рассмотрены результаты исследования механизма фильтрования в мембранном фильтре-разделителе. Показано, что процесс фильтрования в МФР проходит с образованием осадка на поверхности мембраны. Для разработки методики расчета ресурса аппарата были проведены специальные исследования. На основании полученных данных предложена методика расчета ресурса МФР. Расчетные данные согласуются с данными, полученными в процессе экспериментальной эксплуатации мембранного фильтра-разделителя на борту МКС.

Ключевые слова:

система водообеспечения; мембранная технология; сепарация жидкости; статическая сепарация; гидрофильная мембрана; ресурс микропористой мембраны; механизм фильтрования.

В российском сегменте МКС эксплуатируется разработанная в ОАО «НИИХиммаш» система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги (СРВ-К2М), которая очищает конденсат до уровня питьевой воды и обеспечивает до 65% потребности станции в питьевой воде [2, 3]. Конденсат образуется из паров воды, выделяемых космонавтами, эти пары конденсируются в системе кондиционирования воздуха станции и транспортируются в

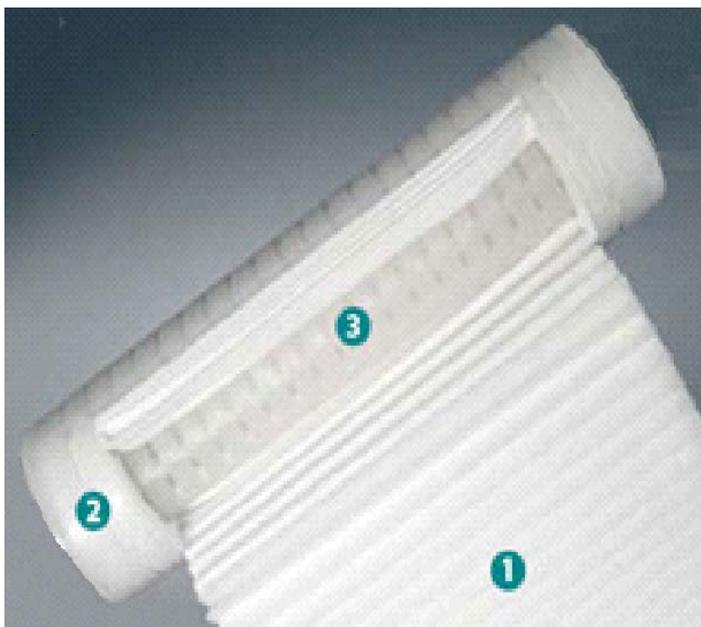
систему регенерации воды в виде газожидкостной смеси. После предварительной очистки конденсата в газожидкостном потоке в системе предусмотрена сепарация конденсата от транспортного воздуха, т.к. остальные технологические процессы регенерации воды осуществляются в жидкой фазе.

До 2009 года сепарация жидкости из газожидкостного потока в системе СРВ-К2М осуществлялась с помощью разделителя с пористыми металлокерамическими элементами (ПМЭ) с диаметром пор 15 мкм. Ресурс разделителя зависит от загрязненности (фильтруемости) поступающего конденсата и определяется забивкой капиллярно-пористой перегородки при фильтровании жидкости. С течением времени при эксплуатации станции фильтруемость конденсата ухудшается в связи с развитием микрофлоры в трубопроводах и узлах системы кондиционирования воздуха. По отношению к начальному ресурсу 2000 л ресурс разделителя с ПМЭ уменьшился в 15-20 раз.

Для восстановления ресурса узла разделения была предложена и с сентября 2009 года реализована на борту МКС двухступенчатая схема сепарации конденсата из конденсато-воздушного потока. В качестве первой ступени сепарации работает мембранный фильтр-разделитель [1], в качестве второй ступени сепарации используется разделитель с ПМЭ.

Мембранный фильтр-разделитель разработан в ОАО «НИИхиммаш» на основе элемента патронного мембранного (ЭПМ) с двухслойной мембраной из гидрофилизированного фторопласта (рисунок 1) [4, 5, 6, 7]. Несмотря на развитую поверхность сепарации ($0,6\text{ м}^2$, по сравнению с площадью сепарации разделителя с ПМЭ $\sim 0,1\text{ м}^2$), МФР является довольно компактным аппаратом. Масса МФР в заправленном состоянии составляет не более 3,0 кг (масса разделителя с ПМЭ составляет около 4,6 кг) при следующих габаритах: высота – не более 400 мм, диаметр – не более 120 мм. Ресурс ЭПМ по сепарации жидкости из газожидкостного потока и ее фильтрации определяет ресурс аппарата в целом. Двухслойная мембрана из гидрофилизированного фторопласта, применяемая в ЭПМ, имеет размеры пор 0,65 и 0,45 мкм, т.е. относится к микрофильтрационным мембранам.

Для разработки методики расчета мембранного фильтра-разделителя необходимо установить механизм фильтрования, реализующийся в нем при фильтровании жидкостей различной степени загрязненности (жидкости различной фильтруемости). В основе метода расчета ресурса мембранного фильтра-разделителя лежит анализ параметров фильтрования, которые зависят как от свойств фильтрующего материала, так и от степени загрязненности фильтруемой жидкости.



1 – двухслойная мембрана из гидрофилизированного фторопласта, расположенная между двумя слоями нетканого дренажного полотна, 2 – внешний перфорированный опорный корпус, 3 – внутренний перфорированный опорный корпус

Рисунок 1 – Элемент патронный мембранный

Наиболее распространенными загрязнениями в жидкости являются суспендированные частицы с размерами 0,1-20 мкм. Поэтому в микрофильтрационных мембранах с наибольшей вероятностью реализуется механизм фильтрации с образованием осадка на поверхности мембраны, что было подтверждено экспериментально.

Для проведения исследований механизма фильтрации использовалась модель мембранного фильтра-разделителя. При создании модели МФР был проанализирован состав аппарата с точки зрения реализации процесса фильтрации жидкости. Существенную роль в очистке конденсата играет насыпка из поливинилформаль пористого, которая является одновременно аккумулирующим веществом и глубинным фильтром, позволяющим проводить сепарацию и фильтрацию жидкости в квазистатическом режиме, и частично снимает нагрузку с мембраны при фильтрации жидкости. Ресурс мембранного фильтра-разделителя определяет мембрана из гидрофилизированного фторопласта с размером пор 0,65 мкм. Т.е. механизм фильтрации, реализуемый при фильтрации жидкости через микропористую мембрану из гидрофилизированного фторопласта с размером пор 0,65 мкм, определяет характер выработки ресурса МФР. В ОАО «НИИхиммаш» были проведены исследования процесса фильтрации через указанную мембрану. Исследуемая мембрана закреплялась в фильтродержателе с рабочим диаметром 4,5 см. Перепад давлений на мембране оставался постоянным на уровне 0,005 МПа. Заранее подготовленная жидкость (с

выжимкой из отработанного поливинилформала пористого) профильтровывалась через мембрану и собиралась в мерную емкость. Замерялось количество прошедшей жидкости и время фильтрования. Схема испытаний приведена на рисунке 2.

Полученные экспериментальные данные анализировались на соответствие различным законам фильтрования. Известно, что 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 характерными переменными. Эти зависимости графически изображаются для соответствующей схемы фильтрования прямой линией, что позволяет установить, по какой схеме протекает процесс фильтрования в конкретных условиях. При этом тангенс угла наклона прямой будет являться постоянной фильтрования для данного типа фильтрования [8]. В частности, для механизма фильтрования с образованием осадка реализуется зависимость

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{нач}} + k \cdot q \quad (1),$$

где $W = \frac{q}{S \cdot t}$ - удельная текущая скорость фильтрования, см/мин;

q – удельный текущий расход жидкости, см;

S – площадь поверхности фильтровальной перегородки, см²;

t – интервал времени, при котором определяются q и W , мин;

$W_{нач}$ – удельная скорость фильтрования в начальный период, см/мин;

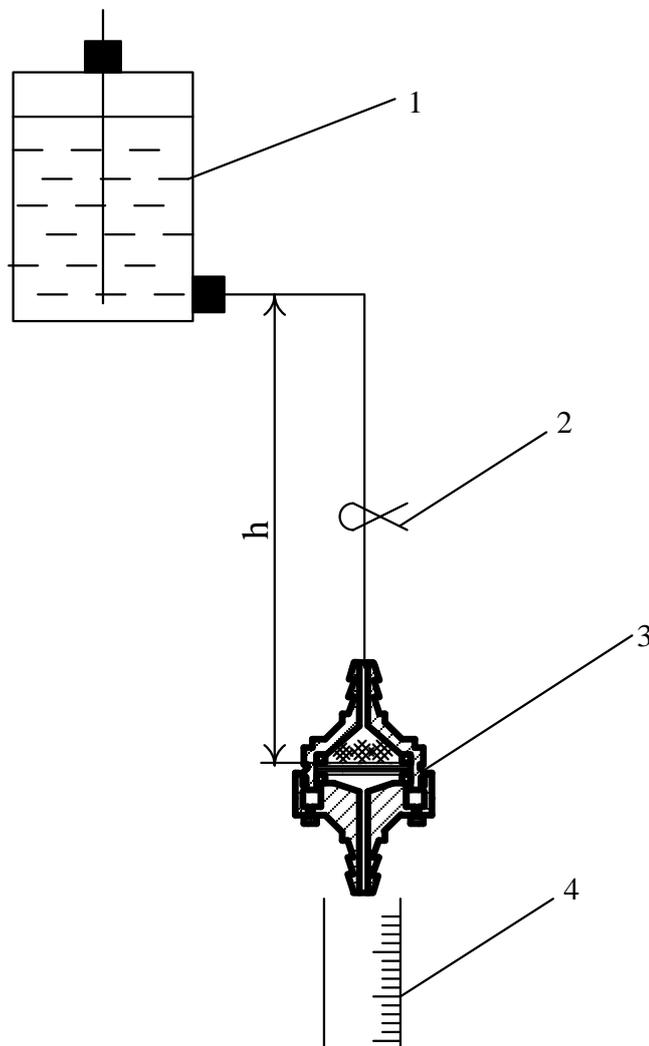
k – константа фильтрования, мин/см².

На основании анализа графического представления результатов (рисунок 3) был сделан вывод о том, что, как и предполагалось, в микропористой мембране из гидрофилизированного фторопласта с размером пор 0,65 мкм реализуется механизм фильтрования с образованием осадка на поверхности, что является наиболее благоприятным условием для обеспечения длительного ресурса работы и соответствует литературным данным по механизму фильтрования через микропористые мембраны. Аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов.

После того, как был определен механизм фильтрования через мембрану из гидрофилизированного фторопласта с размером пор 0,65 мкм, необходимо было убедиться, что этот же механизм фильтрования сохраняется и для всего фильтровального пакета МФР, который включает в себя насыпку из поливинилформала пористого в виде нарезки кубиками с гранями 0,3-0,5 см и мембраны из гидрофилизированного фторопласта с размером пор

0,65 мкм и 0,45 мкм, расположенные между двумя дренажными слоями из нетканого полипропилена [4]. Внешний вид фильтродержателя и порядок расположения всех составляющих фильтропакета мембранного фильтра-разделителя представлены на рисунке 4.

Анализ графического представления результатов фильтрования жидкостей через модель МФР в виде функции $\frac{1}{W} = f(Q)$, где Q – удельный общий объем фильтрата, показал, что при фильтровании через модель МФР сохраняется механизм фильтрования жидкости через микропористую мембрану из гидрофилизированного фторопласта – механизм фильтрования с образованием осадка на поверхности мембраны. Графическое представление экспериментальных данных приведено на рисунке 5. Следует отметить, что характер фильтрования сохраняется для жидкостей с различной фильтруемостью.



1 – емкость с исходной жидкостью, 2 – быстрозъемный зажим Кохера, 3 – фильтровальная ячейка, 4 – мерная емкость, $h=500$ мм

Рисунок 2– Схема испытаний

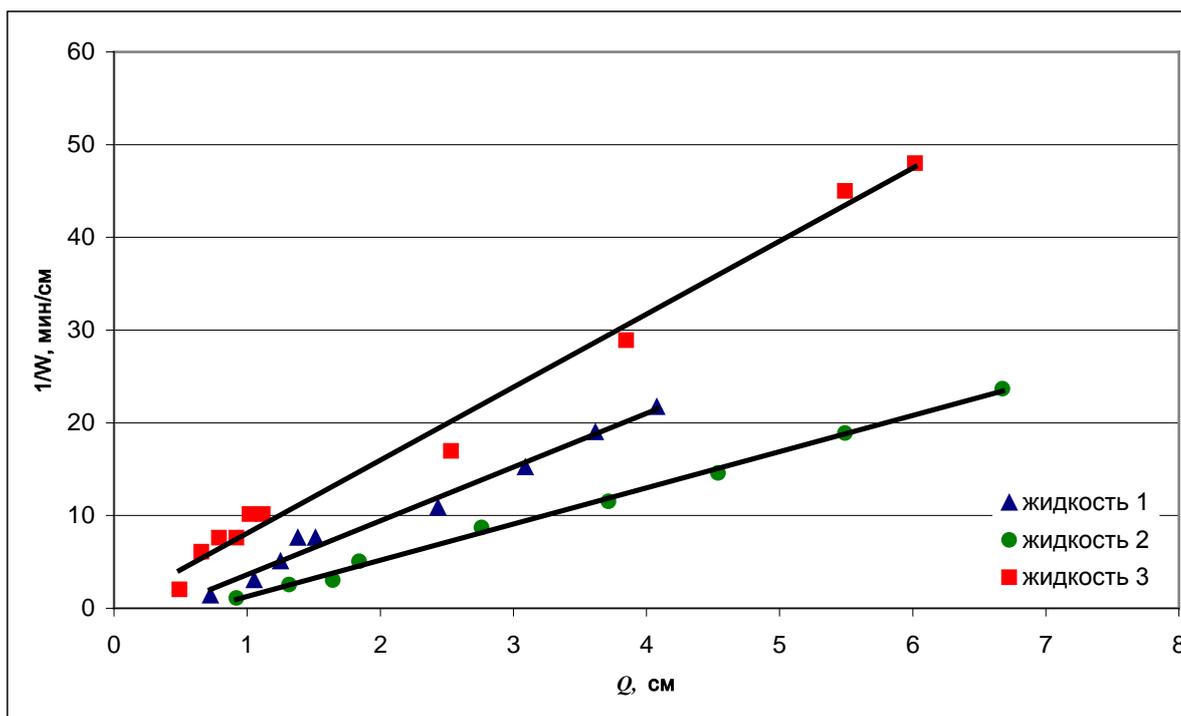
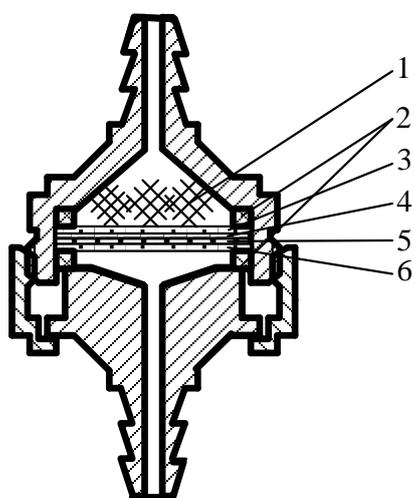


Рисунок 3 – Графическое представление данных по фильтрованию через микропористую мембрану из гидрофилизированного фторопласта



1 – насыпка из поливинилформаль пористого ПВФП-3, 2 – уплотнения, 3– дренажный слой из нетканого полипропилена, 4– мембрана из гидрофилизированного фторопласта с размером пор 0,65 мкм, 5- мембрана из гидрофилизированного фторопласта с размером пор 0,45 мкм, 6– дренажный слой из нетканого полипропилена.

Рисунок 4 – Фильтровальная ячейка (модель МФР)

На основании определенного механизма фильтрования можно выработать методику определения ресурса аппарата. Применение методики, разработанной для определения безразмерной постоянной фильтрования $K_{ПМЭ}$ для разделителя с ПМЭ, оказалось

некорректным в случае работы МФР. Это связано с тем, что при работе разделителя с ПМЭ реализуется другой механизм фильтрации - механизм фильтрации с постепенным закупориванием пор. Исследования показали, что при одинаковых показателях постоянной фильтрации $K_{ПМЭ}$ интенсивность загрязнения мембран в МФР существенно различалась.

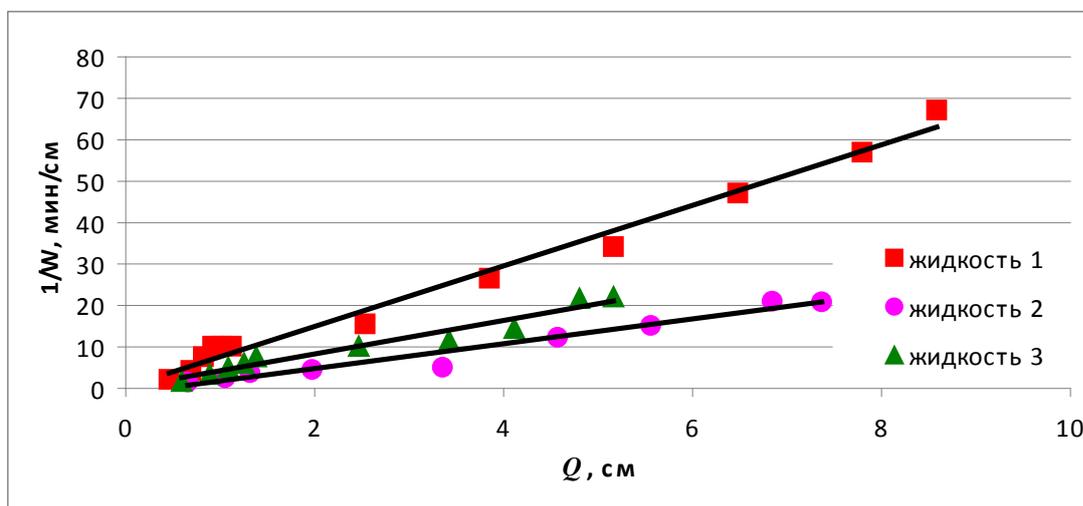


Рисунок 5 – Графическое представление данных по фильтрованию через модель МФР

Для нашего случая начальная скорость фильтрования $W_{нач}$ гораздо выше, чем критическая скорость фильтрования $W_{кр}$, при достижении которой ресурс мембраны считается выработанным, поэтому в зависимости (1) для расчета ресурса можно принять

$$\frac{1}{W_{нач}} = 0. \text{ Тогда}$$

$$Q_{рес}^{МФР} = F_{МФР} \frac{1}{W_{кр} k} \quad (2),$$

где $F_{МФР}$ – площадь фильтрования мембранного фильтра-разделителя ($F_{МФР}=6000\text{см}^2$).

Для определения ресурса мембранного фильтра-разделителя были проанализированы результаты фильтрования через модель МФР имитатора конденсата атмосферной влаги. Графически результаты представлены на рисунке 6. Тангенс угла наклона прямой составил 0,16, т.е. $k=0,16 \text{ мин/см}^2$.

При расчете ресурса мембранного фильтра-разделителя необходимо задаться значением критической удельной скорости фильтрования. Исходя из условий работы МФР на борту МКС, критическая удельная скорость фильтрования в аппарате составляет $W_{кр}=0,0167 \text{ см/мин}$, что соответствует расходу жидкости $100 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Тогда ресурс мембранного фильтра-разделителя составит около 2200 л.

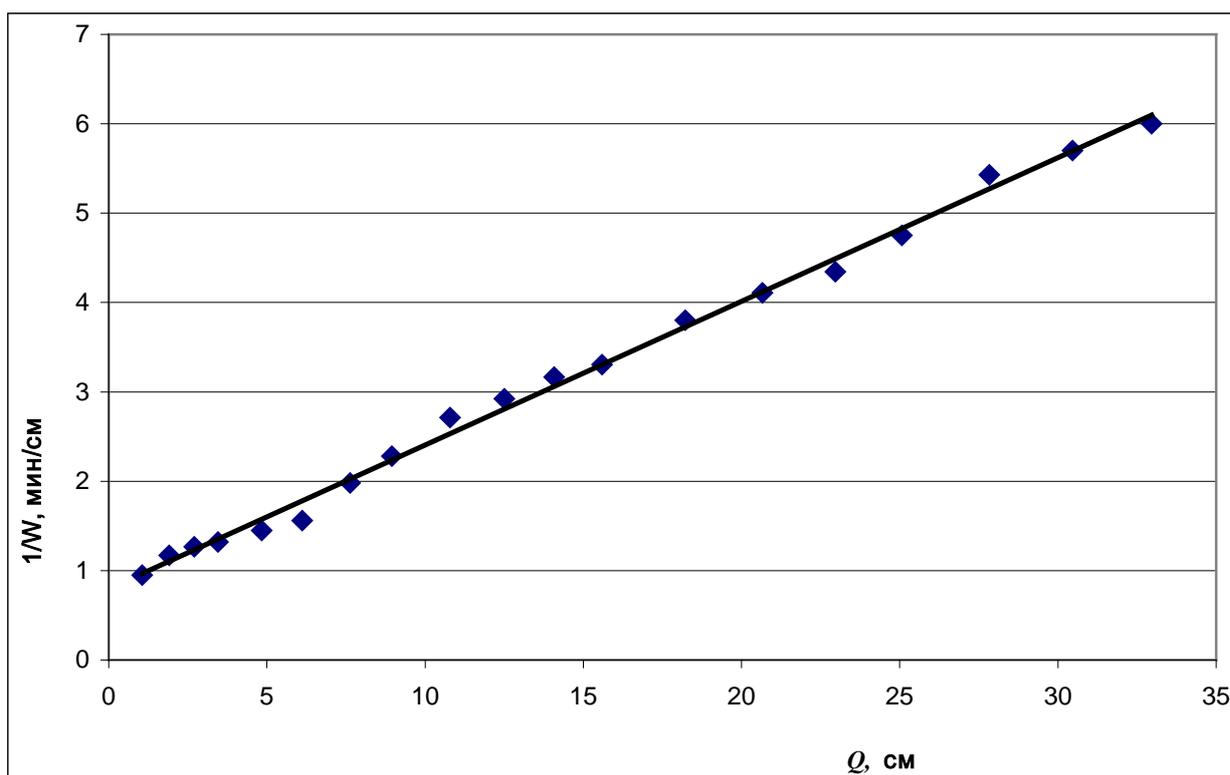


Рисунок 6 – Результаты фильтрации имитатора конденсата атмосферной влаги через модель МФР

Расчетный ресурс мембранного фильтра-разделителя является ориентировочным в связи с тем, что качество конденсата атмосферной влаги на борту МКС зависит от многих факторов и не является постоянной характеристикой. Тем не менее, полученный расчетным путем ресурс МФР соответствует данным о реальной наработке аппарата в составе системы регенерации воды из конденсата атмосферной влаги. На основании экспериментальной эксплуатации и расчета ресурса мембранного фильтра-разделителя можно назначить ресурс МФР не менее 1500 л по количеству отсепарированного конденсата.

Исследования процесса фильтрации через микропористую мембрану из гидрофилизированного фторопласта и в модели мембранного фильтра-разделителя показали, что в МФР осуществляется механизм фильтрации с образованием осадка на поверхности мембраны, что является наиболее благоприятным случаем фильтрации через пористые перегородки, так как при этом наблюдается минимальное возрастание гидравлического сопротивления на перегородке. Продолжается экспериментальная эксплуатация мембранного фильтра-разделителя на борту МКС, что позволяет проверять достоверность методики расчета ресурса. Для уточнения методики расчета ресурса необходимо продолжать

работы по исследованию механизма сепарации и фильтрования в мембранном фильтре-разделителе.

Библиографический список

1 Бобе Л.С., Солянкина А.А., Астафьев В.Б., Стерин В.Ф., Андрейчук П.О., Запрягайло Е.Д. Экспериментальная эксплуатация мембранного фильтра-разделителя (МФР) на орбитальной космической станции, «Труды МАИ», выпуск №43, <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24719>

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 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.

4 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.

5 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.

6 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.

7 Устройство для сепарации жидкости из газожидкостного потока в гермообъекте; №103095; Российская Федерация; заявка №2010132894 06 августа 2010, 27 марта 2011, RU 103095 U1, стр.1-2.

8 Жужиков В.А. Фильтрование. М., «Химия», 1971, 440 с.

Сведения об авторах:

БОБЕ Леонид Сергеевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), начальник лаборатории ОАО «НИИхиммаш», д.т.н., тел.: (495) 685-02-33; e-mail: L_bobe@niichimmash.ru

АСТАФЬЕВ Валерий Борисович, начальник сектора ОАО «НИИхиммаш», к.т.н., старший научный сотрудник, тел.: (495) 685-04-86.

КАПИЦА Анна Александровна, научный сотрудник ОАО «НИИхиммаш» тел.: (495) 685-18-69; e-mail: anna.kapitsa@gmail.com

СТЕРИН Владимир Фридрихович, старший научный сотрудник ОАО «НИИхиммаш», к.т.н., тел.: (495) 685-18-69; e-mail: vfsterin@rambler.ru