

На правах рукописи

СТАРИКОВ Сергей Евгеньевич

**РЕГЕНЕРАЦИЯ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКОЙ ВОДЫ НА  
ОСНОВЕ БАРОМЕМБРАННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ  
ДЛИТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕДИЦИЙ**

Специальность: 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях  
(Авиационная и ракетно-космическая техника, технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в **Государственном научном центре Российской Федерации – Институте медико-биологических проблем Российской Академии Наук.**

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор **Синяк Юрий Емельянович**

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор **Бобе Леонид Сергеевич**

Кандидат технических наук, доцент **Свитцов Алексей Александрович**

Ведущая организация: **ОАО «НИИхиммаш»**

Защита состоится «\_\_»\_\_\_\_\_2009 г. в\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 002.111.02 при Государственном научном центре Российской Федерации – Институте медико-биологических проблем РАН (123007, Москва, Д-7, Хорошевское шоссе, 76-а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного центра Российской Федерации – Институте медико-биологических проблем РАН (ГНЦ РФ – ИМБП РАН).

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.111.02, доктор биологических наук **Назаров Н. М.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В условиях длительных межпланетных экспедиций, когда доставка одежды и белья с Земли невозможна, а масса и объем запасов становятся слишком большими, целесообразно многократно использовать текстильные материалы, периодически подвергая их гигиенической обработке. На современном этапе развития пилотируемой космонавтики большое внимание уделяется проектам освоения ближайших к Земле космических тел – Луны и Марса. Их реализация возможна лишь при использовании высокотехнологичных систем жизнеобеспечения, способных надежно работать в течение нескольких лет в отрыве от земных ресурсов. В связи с этим появляется необходимость в разработке как можно более замкнутых и универсальных систем жизнеобеспечения. Среди них особое место занимает система водообеспечения, так как именно за счет организации круговорота воды можно достичь наибольшего снижения стартового веса космических кораблей. В качестве влагосодержащих отходов на борту пилотируемого космического аппарата можно выделить конденсат атмосферной влаги, мочу, санитарно-гигиеническую воду (СГВ), конденсат электрохимических генераторов и продукт разложения перекиси водорода. Максимальный вклад в объем влагосодержащих отходов дает СГВ. При содержании воды до 99%, в СГВ загрязнения имеют различную природу: это и макрочастицы (волосы, нитки, частицы эпидермиса и пр.), и органические вещества (белки, жиры, ПАВ), и неорганические соединения (в основном, соли), а также бактерии и другие микроорганизмы. Целесообразность использования системы регенерации воды (СРВ) определяется, кроме прочего, низкой эквивалентной массой, что достигается базированием данной системы на высокопроизводительных и малоэнергоёмких процессах регенерации воды с высокими ресурсными характеристиками. К ним относятся, в первую очередь, баромембранные

процессы: микрофильтрация, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос.

Поскольку регенерация СГВ до сих пор считается актуальной лишь для длительных космических экспедиций, этому вопросу посвящено небольшое количество работ. Так, в некоторых работах предлагались обратный осмос, либо нанофильтрация. В последнее время в промышленности наблюдается интенсивное использование ультрафильтрации на полых волокнах как для предварительной обработки исходной воды, так и для финишной очистки сточных вод перед их сбросом или повторным использованием. Также неуклонно расширяется область применения обратного осмоса. В первую очередь это связано с разработкой композитных мембран, с повышенной селективностью по таким, например, компонентам как хлористый натрий и мочевины. Одновременно с этим постоянно снижается рабочее давление и увеличивается производительность мембранных элементов.

Таким образом, выбор системы регенерации воды, основанной на баромембранных процессах, представляется закономерным и обоснованным.

В качестве основных принципов построения модели системы регенерации в данной работе были приняты следующие:

1. Система регенерации должна быть максимально надежной и рассчитанной на весь срок полета (например, до Марса и обратно).
2. Качество получаемой воды должно соответствовать требованиям, предъявляемым к воде для санитарно-гигиенических целей по ГОСТ Р 50804-95 “Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования.”
3. Степень извлечения чистой воды из исходной должна быть максимально возможной для данных условий.
4. Масса системы должна быть минимизирована.

**Цель работы:** разработка технологической схемы регенерации санитарно-гигиенической воды на основе баромембранных процессов применительно к длительным космическим полетам.

Для достижения этой цели в диссертации решались следующие задачи:

1. Разработка математической модели работы системы регенерации воды на основе процесса обратного осмоса.

2. Оценка возможности ультрафильтрации как предварительной подготовки санитарно-гигиенической воды.

3. Экспериментальная проверка адекватности представленной модели при работе на модельных растворах и реальной санитарно-гигиенической воде из гермокамерного эксперимента, полученной при обработке текстильных материалов.

**Научная новизна.** Впервые для условий длительных космических экспедиций предложена схема узла регенерации санитарно-гигиенической воды на основе комплекса баромембранных методов: предварительная обработка – ультрафильтрация на полых волокнах, основная – обратный осмос на рулонном мембранном элементе.

Для данной схемы разработана математическая модель функционирования узла регенерации с учетом длительной работы и факторов изменения качества очищенной воды при простоях оборудования.

Из принятой гипотезы о диффузии растворенного вещества через поры получена зависимость выравнивания концентраций по обе стороны обратноосмотической мембраны от времени простоя аппарата.

**Практическая значимость.** Разработана методика получения кривых диффузии растворенного вещества через композитную многослойную мембрану, расчета на их основе величин потенциалов взаимодействия поверхности пор с растворенным веществом и селективности обратноосмотических мембран в рабочем режиме.

Представленная программа позволяет прогнозировать поведение системы водообеспечения при длительной эксплуатации мембранной установки. Это может найти применение как при проектировании систем регенерации воды для пилотируемых космических аппаратов, так и для промышленных систем оборотного водоснабжения.

**Личный вклад автора** заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку теоретических моделей, методик экспериментальных исследований, проведение исследований, анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

**В работе защищаются:**

- схема регенерации санитарно-гигиенической воды на основе баромембранных методов – ультрафильтрации и обратного осмоса, позволяющая получать очищенную воду стабильного качества в течение длительного времени, соответствующую ГОСТ Р 50804-95, без замены комплектующих;

- физико-математическая модель изменения концентрации по обе стороны обратноосмотической мембраны от времени простоя аппарата;

- модель работы баромембранного узла регенерации санитарно-гигиенической воды, позволяющая рассчитать его для условий длительной эксплуатации;

- методика снятия кривых диффузии растворенного вещества через многослойную мембрану, расчета потенциала взаимодействия и селективности обратноосмотических мембран.

**Апробация работы.**

Результаты и положения, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. Доклад на VI Конференции молодых учёных и специалистов, аспирантов и студентов, посвящённой Дню космонавтики, Москва, 10 апреля 2007 г.

2. Доклад на Международной конференции "Системы жизнеобеспечения как средство освоения человеком дальнего космоса ", Москва, 24-27 сентября 2008 г.

3. Доклад на XVIII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, Королев, 24-28 ноября 2008 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 2 статьи в реферируемых журналах РАН, а также 2 тезисов докладов.

**Объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, приложения, и содержит 142 страницы, включает 13 таблиц, 37 рисунков; список литературы включает 93 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность работы, указаны ее цель и научная новизна, излагаются ее основные научные положения.

**В первой главе** дан обзор предыдущих исследований по теме работы [Поляков, 1982], [Шумилина и др., 1999] и приведен аналитический обзор литературы, касающихся источников регенерируемой воды на борту ПКА. Основной акцент сделан на санитарно-гигиеническую обработку текстильных материалов, показана необходимость такой обработки. Также приведен обзор методов регенерации санитарно-гигиенической воды. Показано, что наиболее перспективными для этой цели являются баромембранные методы. Детально рассмотрены теоретические основы баромембранных процессов разделения жидких сред.

На основе литературных данных высказано предположение, что наиболее эффективным методом регенерации СГВ является обратный

осмос. Однако, для продления ресурса обратноосмотических мембранных элементов требуется предварительная обработка СГВ методом ультрафильтрации.

Подробно разобран с технологической и теоретической точек зрения процесс ультрафильтрации. Показано, что наибольший интерес для регенерации СГВ представляют полуволоконные элементы.

Представлена теория обратного осмоса, впервые предложенная Н.В. Чураевым [Чураев, 1990], которая основана на предположении о наличии тонких пор в обратноосмотических мембранах и объясняющая процесс разделения жидких сред посредством введения потенциала взаимодействия молекул растворенного вещества с поверхностью пор мембраны.

В конце главы представлены выводы из обзора литературы.

Вторая глава посвящена описанию методик проведенных исследований, мембран, жидкостей и экспериментальных установок.

Диффузионный процесс во время простоя оборудования исследовали на плоскорамной электрохимической ячейке, схема которой представлена на рис. 1. В работе использовали три полупроницаемые мембраны: МГА-100П, ESPA-1 и Desal AG.

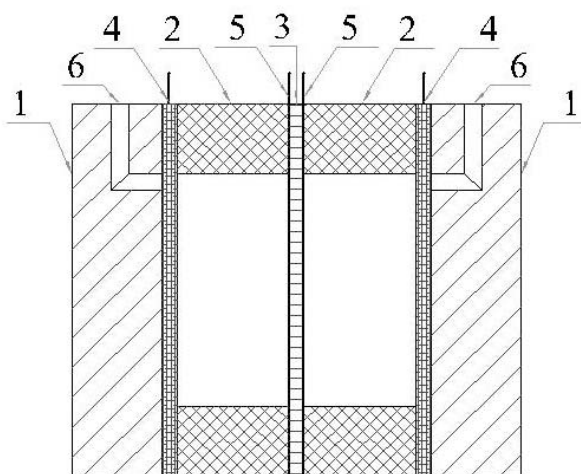


Рис. 1. Электрохимическая ячейка  
*1 – крышки, 2 – резиновые прокладки, 3 – мембрана,  
4, 5 – электроды, 6 - штуцеры*



Исследование процесса обратного осмоса на модельных растворах проводили на установке с плоскорулонной ячейкой, схема которой представлена на рис. 2. Использовались те же мембраны, что и для исследования процесса диффузии.

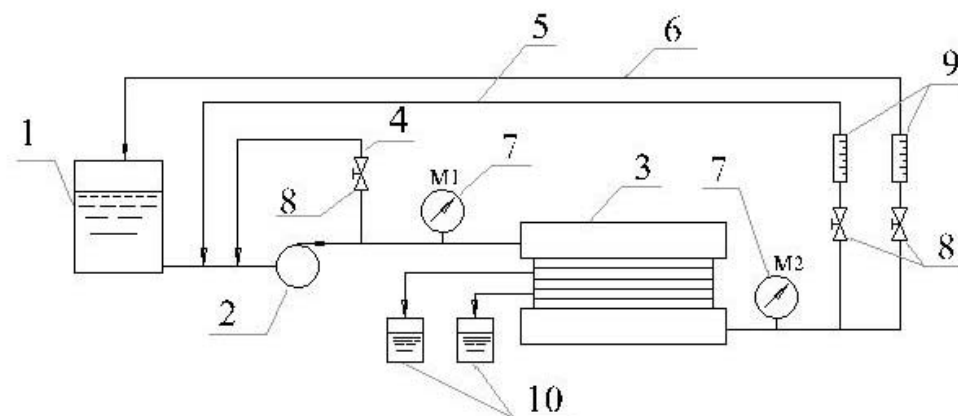


Рис. 2. Схема экспериментальной установки с плоскорулонной ячейкой для исследования процесса обратного осмоса. 1 - емкость исходной воды, 2 - насос, 3 - ячейка, 4 - байпасная линия, 5 - линия рецикла концентрата, 6 - линия сброса концентрата, 7 - манометры, 8 - вентили регулировочные, 9 - ротаметры, 10 - емкости для сбора пермеата.

Регенерацию реальной СГВ проводили на макете системы регенерации СГВ, состоящем из связанных между собой установок ультрафильтрации и обратного осмоса.

Изучение процесса ультрафильтрации, а также предварительную очистку натуральной СГВ перед обратноосмотическим элементом, проводили на установке с полуволоконным ультрафильтрационным элементом Membrana Medica D200. Фильтрацию проводили в тангенциальном режиме с периодическими обратными промывками.

Обработка предварительно осветленной ультрафильтрацией СГВ проводилась на обратноосмотической установке с рулонным мембранным

элементом Desal AG 2521TF. Полученный концентрат использовали при обратной промывке ультрафильтрационного элемента.

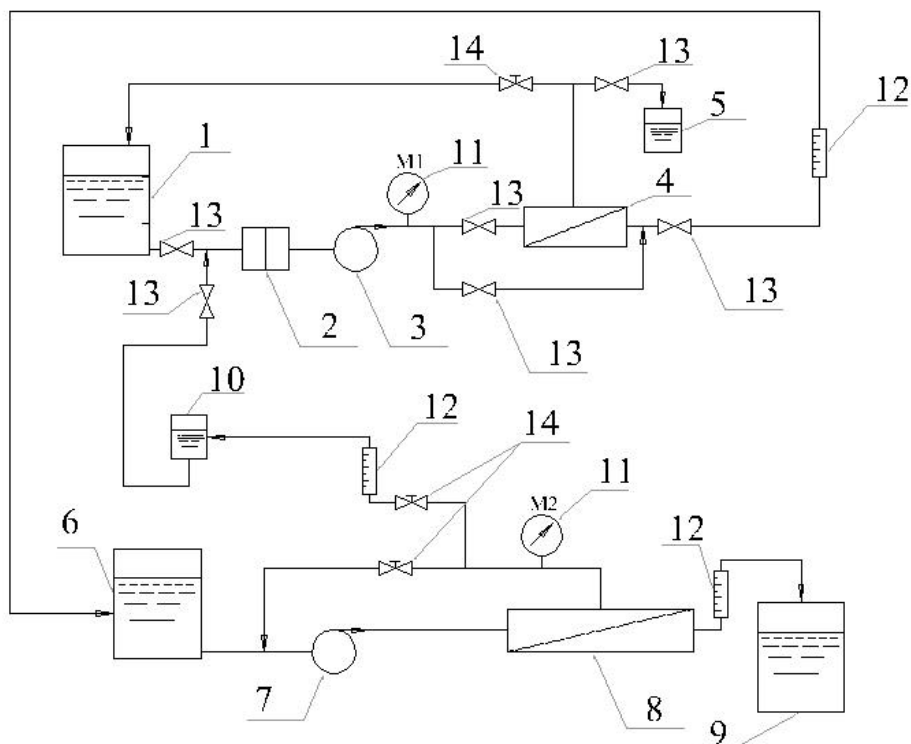


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для регенерации СГВ. 1 - бак исходной воды; 2 - сетчатый фильтр; 3 - насос; 4 - ультрафильтрационный модуль; 5 - бак ультрафильтрационного концентрата; 6 - бак ультрафильтрационного фильтрата; 7 - роторно-пластинчатый насос Procon 113A100F31BA250; 8 - рулонный элемент Desal AG 2521TF; 9 - бак сбора пермеата; 10 - емкость сбора обратноосмотического концентрата; 11 - манометры; 12 - ротаметры; 13 - вентили запорные; 14 - вентили регулировочные.

В третьей главе представлена математическая модель работы системы регенерации СГВ в условиях длительных космических экспедиций. На рис. 4 показана принципиальная схема работы такой системы.

Даны подробные математические описания рабочего цикла и простой системы. Особое внимание уделено используемым в модели приближениям. Так неоднородность раствора вдоль плоскости мембраны учитывается введением дополнительного коэффициента  $\xi = C_c / \langle C_2(x) \rangle$  и параметра  $\delta$ , характеризующего толщину слоя концентрационной поляризации (КП).

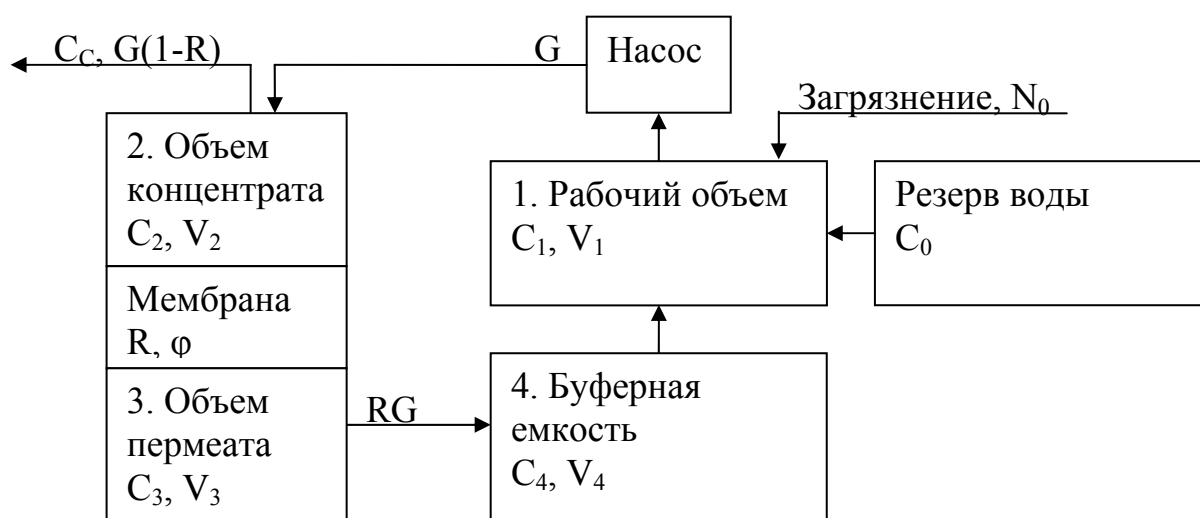


Рис. 4. Схема установки для регенерации воды.

Для изменения КП в нестационарных условиях определены характерные времена релаксации к стационарному режиму. Для исследования нестационарных эффектов предложено использовать приближение, предполагающее, что время установления локального распределения концентрации вследствие диффузии вдоль направления потока много меньше времени, характеризующего изменение концентрации в системе. Ввиду того, что в большинстве реальных систем фильтрации характерные продольные размеры мембраны всегда много больше высоты канала концентрата  $a$ , сделано также дополнительное допущение. А именно, что объем концентрата можно разбить на слабо взаимодействующие

области, с пренебрежимо малым изменением концентрации раствора внутри каждой из них. То есть каждая область характеризуется своей (локальной) средней концентрацией и скоростью потока вдоль мембраны, но вид концентрационного профиля перпендикулярно плоскости мембраны одинаков для всех областей. Отметим, что в приближении полного перемешивания это разбиение сводится к одной области.

Исходя из указанных предположений получены следующие уравнения, описывающие изменения концентраций в рабочем режиме в объеме.

Для объема концентрата:

$$C_2(t) = (C_2^0 - d^{-1}C_1) \exp\left(-\frac{Gd}{V_2}t\right) + d^{-1}C_1, \quad (1)$$

где

$$d = (1-R)\xi + R(1-\varphi)a[a - \delta + (1-\varphi)\delta + \frac{\varphi D_0}{v}(\exp(\frac{va}{D_0}) - 1)]^{-1}.$$

Для объема пермеата:

$$C_3(t) = Aw_2 \frac{\exp(-wt) - \exp(-w_2t)}{w - w_2} + C_3^0 \exp(-w_2t) + B[1 - \exp(-w_2t)], \quad (2)$$

где

$$A = b^{-1}(1-\varphi)(C_2^0 - d^{-1}C_1);$$

$$B = (1-\varphi)b^{-1}d^{-1}C_1;$$

$$w = \frac{Gd}{V_2}; \quad w_2 = \frac{RG}{V_3}.$$

Для объема буферной емкости:

$$C_4(t) = t^{-1} \left\{ Aw_2 \frac{w^{-1}[1 - \exp(-wt)] - w_2^{-1}[1 - \exp(-w_2t)]}{w - w_2} + C_3^0 w_2^{-1}[1 - \exp(-w_2t)] + B[t - w_2^{-1}(1 - \exp(-w_2t))] \right\} \quad (3)$$

Здесь  $C_i^0$  - начальная концентрация,  $G$  - поток,  $V$  - объем,  $R$  - степень извлечения,  $\varphi$  - селективность,  $a$  - высота канала,  $\delta$  - толщина слоя

концентрационной поляризации,  $D$  – коэффициент диффузии,  $v$  – скорость потока через мембрану.

Изложена физико-математическая модель, описывающая изменение концентрации по обе стороны обратноосмотической мембраны в зависимости от времени простоя аппарата. Модель основана на предположении о диффузии растворенного вещества через мембрану во время простоя аппарата.

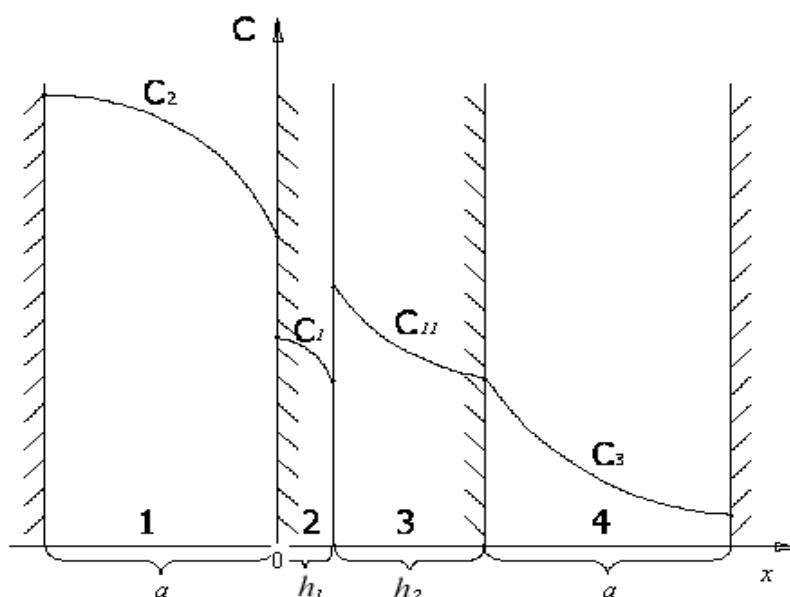


Рис. 5. Диаграмма распределения концентраций в процессе диффузии растворенного вещества через двухслойную мембрану

Уравнения диффузии:

$$D_0 \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} = \frac{\partial C_2}{\partial \tau}; \quad (4) \quad D_m m_2 \frac{\partial^2 C_I}{\partial x^2} = \frac{\partial C_I}{\partial \tau}; \quad (5)$$

$$D_0 m_3 \frac{\partial^2 C_{II}}{\partial x^2} = \frac{\partial C_{II}}{\partial \tau}; \quad (6) \quad D_0 \frac{\partial^2 C_3}{\partial x^2} = \frac{\partial C_3}{\partial \tau}. \quad (7)$$

Граничные условия:

$$x = -a: \quad \frac{\partial C_2}{\partial x} = 0;$$

$$x = 0: \quad D_0 \frac{\partial C_2}{\partial x} = m_2 D_m \frac{\partial C_I}{\partial x}; \quad C_2 = C_I e^{\Phi_0};$$

$$x = h_1: D_m m_2 \frac{\partial C_{II}}{\partial x} = m_3 D_0 \frac{\partial C_{II}}{\partial x}; \quad C_I e^{\Phi_0} = C_{II};$$

$$x = h_1 + h_2: m_3 D_0 \frac{\partial C_{II}}{\partial x} = D_0 \frac{\partial C_3}{\partial x}; \quad C_{II} = C_3;$$

$$x = h_1 + h_2 + a: \frac{\partial C_3}{\partial x} = 0.$$

Начальные условия:

$$C_2 = C_2^0; \quad C_I = C_I^0; \quad C_{II} = C_{II}^0; \quad C_3 = C_3^0; \quad C_I^0 = C_{II}^0 = C_3^0.$$

Здесь  $m_2$  – пористость селективного (активного) слоя;  $m_3$  – пористость микропористого слоя (подложки).

С помощью преобразования Лапласа найдены следующие решения системы уравнений (4-7) совместно с граничными и начальными условиями для средней концентрации растворенного вещества в области 4 обратноосмотического аппарата.

Для сравнительно малых времен простоя  $t \sim q/K$

$$C_{3cp} = \frac{(C_2^0 - C_3^0)}{K} \left[ t + \frac{q}{K} \left( e^{-\frac{K}{q}t} - 1 \right) \right] + C_3^0, \quad (8)$$

где

$$K = \frac{ah_2}{D_0 m_3} + \frac{ah_1 e^{\Phi_0}}{D_m m_2};$$

$$q = \frac{ah_2^2}{D_0 m_3} \left( \frac{h_2}{6D_0 m_3} + \frac{h_1 e^{\Phi_0}}{2D_m m_2} \right).$$

Для больших времен простоя  $t \gg q/K$

$$C_3(t) = \frac{C_2^0 + C_3^0}{2} - S \exp\left(-\frac{K}{q}t\right). \quad (9)$$

Константа  $S$  находится посредством «гладкой сшивки» (8) и (9). В частности, если пренебречь отклонением от линейности в (8) на больших временах, получаем:

$$\frac{C_2^0 - C_3^0}{K} t_0 + C_3^0 \approx \frac{C_2^0 + C_3^0}{2} - S \exp\left(-\frac{K}{q}t_0\right); \quad (10)$$

$$\frac{C_2^0 - C_3^0}{K} \approx S \frac{K}{q} \exp\left(-\frac{K}{q} t_0\right). \quad (11)$$

Решая (7, 8) относительно времени «сшивки»  $t_0$  и  $S$ , находим:

$$t_0 = \frac{K}{2} - \frac{q}{K}; \quad S = (C_2^0 - C_3^0) \frac{q}{K^2} \exp\left(\frac{K}{q} t_0\right). \quad (12)$$

Таким образом, при  $t \leq t_0$  концентрация  $C_3(t)$  рассчитывается с помощью выражения (8), при  $t > t_0$  с помощью выражения (9), где константы  $S$ ,  $t_0$  определяются соотношениями (12). Среднюю по объему концентрацию  $C_2(t)$  можно оценить как  $C_2(t) \approx C_2^0 + C_3^0 - C_3(t)$ , что соответствует пренебрежению общим объемом мембраны по сравнению с объемами пермеата и концентрата.

Для описания режима простоя с помощью выражений (8-12) необходимо знать целый ряд параметров:  $a$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $D_0$ ,  $D_m$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $\Phi_0$ , что часто оказывается затруднительным. Поэтому, в ряде случаев удобнее характеризовать свойства мембраны в режиме простоя двумя феноменологическими параметрами –  $K$  и  $q$ . В отличие от перечисленных выше восьми параметров константы  $K$  и  $q$  могут быть легко оценены экспериментально посредством измерений временной зависимости концентраций в объемах пермеата и концентрата при простое системы.

Полученные решения, а также экспериментальные данные позволили разработать программу, моделирующую циклическую работу системы регенерации.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов и их обсуждение.

С помощью экспериментальной электрохимической ячейки (рис. 2) были получены зависимости концентрации по обе стороны мембраны от времени простоя. Характерные кривые представлены на рис. 6.

Характер диффузионных кривых описывается уравнениями, полученными в третьей главе. После аппроксимации экспериментальных

данных, представленных в табл. 1, были вычислены значения коэффициентов  $K$  и  $q$ , а затем с помощью уравнения (8) – потенциалы взаимодействия растворенного вещества для трех мембран (табл. 2). Расчетная величина селективности по  $NaCl$  оказалась достаточно близкой к паспортным данным и результатам, полученным на ячейке с плоским каналом (табл. 3).

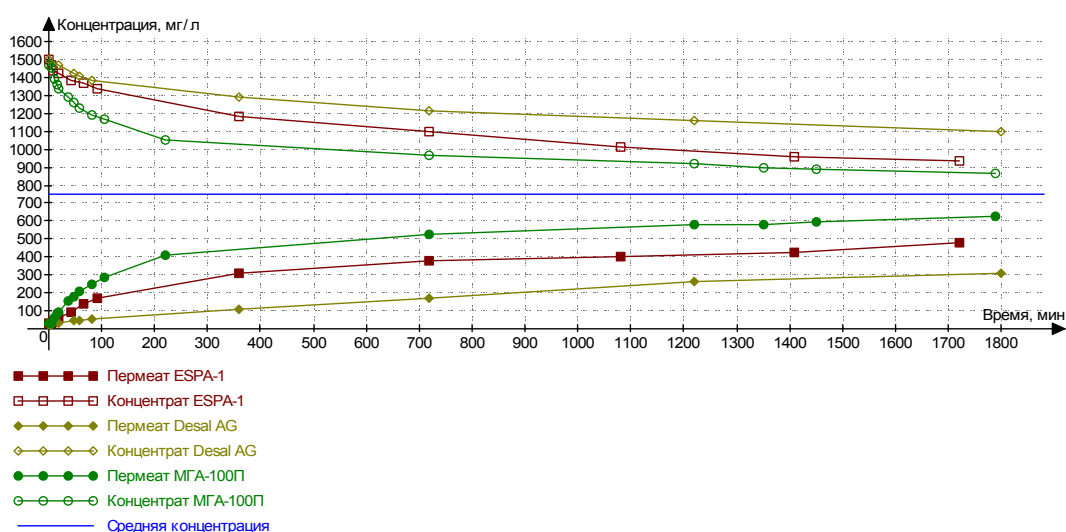


Рис. 6. Экспериментальные зависимости концентрации по обе стороны мембраны от времени

Затем аппроксимировали эти данные по уравнению (9) и находили значения  $S$  и  $q/K$ . Из соотношений (10) и (11) находили «время сшивки»  $t_0$ , то есть то время, при котором решения уравнений (8) и (9) совпадают. В этой точке находили значение тангенса угла наклона прямого участка графика к оси  $x$ , которое соответствовало значению  $\frac{C_2^0 - C_3^0}{K}$ . Затем из полученных данных находили значения  $q$ ,  $K$  и  $\Phi_0$ . Селективность рассчитывали по формуле

$$\varphi \approx 1 - \frac{1}{\exp \Phi_0}. \quad (13)$$



Таблица 1. Параметры аппроксимации экспериментальных данных

Мембрана	$\frac{C_2^0 + C_3^0}{2}$	$C_3^0$	S	$q/K$ , мин	$t_0$ , мин
МГА 100	639	103	518	140	~150
ESPA-1	400	34	360	350	~100
Desal AG	569	54	456	586	~400

Таблица 2. Коэффициенты K, q, потенциал  $\Phi_0$  и расчетная селективность  $\varphi$  для каждой из мембран

Мембрана	$\Phi_0$	K, мин	$q$ , мин <sup>2</sup>	$\varphi$ , %
МГА 100	4.64	592	82880	99
ESPA-1	5.36	946	331100	99,5
Desal AG	6.04	2287	1340182	99,8

Таблица 3. Экспериментальные значения селективности  $\varphi$  и производительности исследуемых мембран по раствору хлористого натрия с концентрацией концентрата 1500 мг/л

Мембрана	$\varphi$ , %	Производительность, л/ м <sup>2</sup> ·ч
МГА 100	97,8	19,2
ESPA-1	99,4	33,2
Desal AG	99,5	33,8

Дальнейшие эксперименты были посвящены получению рабочих характеристик – зависимости производительности мембран от времени работы и температуры. В результате была подтверждена линейная характеристика производительности от температуры в интервале 15 – 25 °С.

За 140 дней работы получены данные снижения удельной производительности мембран (табл. 4).

Таблица 4. Снижение удельной производительности мембран в ходе эксперимента

Мембрана	Снижение удельной производительности, л/м <sup>2</sup> ·ч	
	Первые 10 дней	Последние 10 дней
ESPA-1	1,415	0,012
Desal AG	0,72	0,005
МГА-100П	0,565	0,005

Из полученных данных видно, что мембрана Desal AG имеет наибольшую селективность и средний показатель проницаемости, падение удельной производительности составляет не более 0,0054% на каждые 1000 литров после первичной усадки мембраны.

Для подтверждения правильности выбранной схемы регенерации СГВ и проверки зависимостей, полученных в третьей главе проведены натурные испытания макета баромембранной системы регенерации СГВ.

Были проведены циклы регенерации воды после стирки белья, полученного в гермокамерном эксперименте с участием человека (для последующей стирки). Всего за время эксперимента было очищено 100 литров СГВ (по 20 литров за цикл). Для первой стирки, а также для восполнения потерь использовался обратноосмотический пермеат водопроводной воды, полученный на той же установке, которая использовалась для эксперимента. Общая степень извлечения чистой воды из исходной составила 80%.

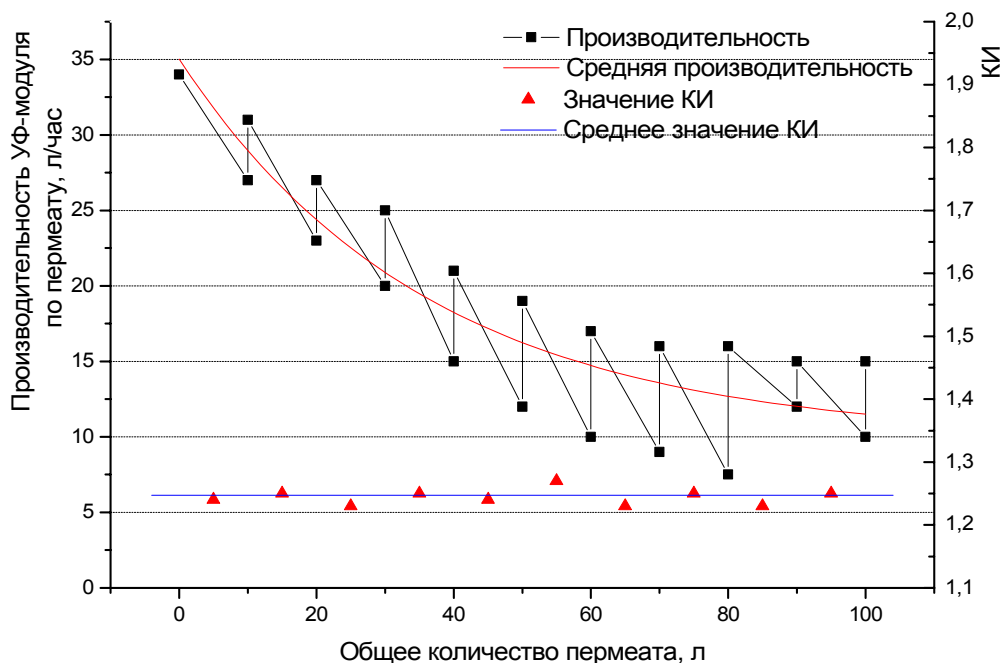


Рис. 7. Зависимость производительности ультрафильтрационного модуля и коллоидного индекса (КИ) от количества полученного пермеата с учетом обратных промывок

На рис. 8 видно, что после первых двух циклов концентрация растворенных веществ в пермеате стабилизируется и не имеет тенденции к росту. Это происходит в связи с понижением концентрации в исходной воде за счет добавления в нее недостающих 20% объема из запасного резервуара. Таким образом, экспериментально показано, что изменение качества пермеата происходит в основном за счет диффузии растворенных веществ из концентрата в пермеат во время длительных простоев оборудования.

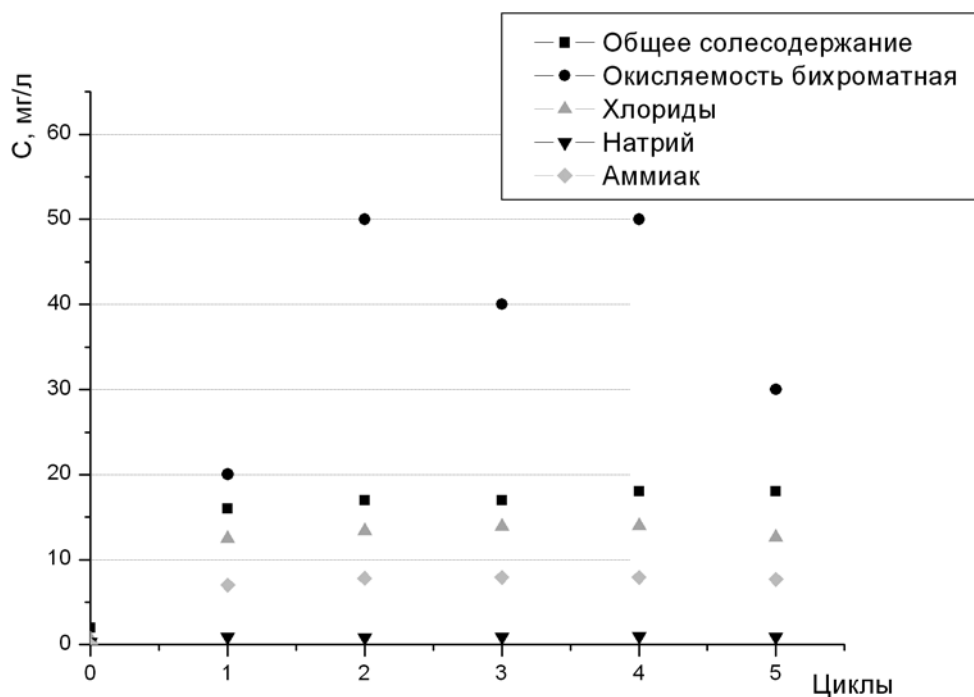


Рис. 8. Изменение концентрации растворенных веществ в воде, прошедшей через систему очистки

В конце главы представлена программа для моделирования работы системы в различных режимах, общий вид которой приведен на рис. 9. Расчет изменения концентраций для режима фильтрации и режима простоя осуществляется в программе на основе соотношений, полученных в Главе 3. Переход между режимами осуществляется посредством модификации соответствующих граничных условий для средних концентраций. Деградация мембраны учитывается в виде изменения селективности и производительности при каждом запуске системы. Установить значения этих параметров можно, заполнив соответствующие ячейки в диалоговом окне программы, показанном на рис. 9.

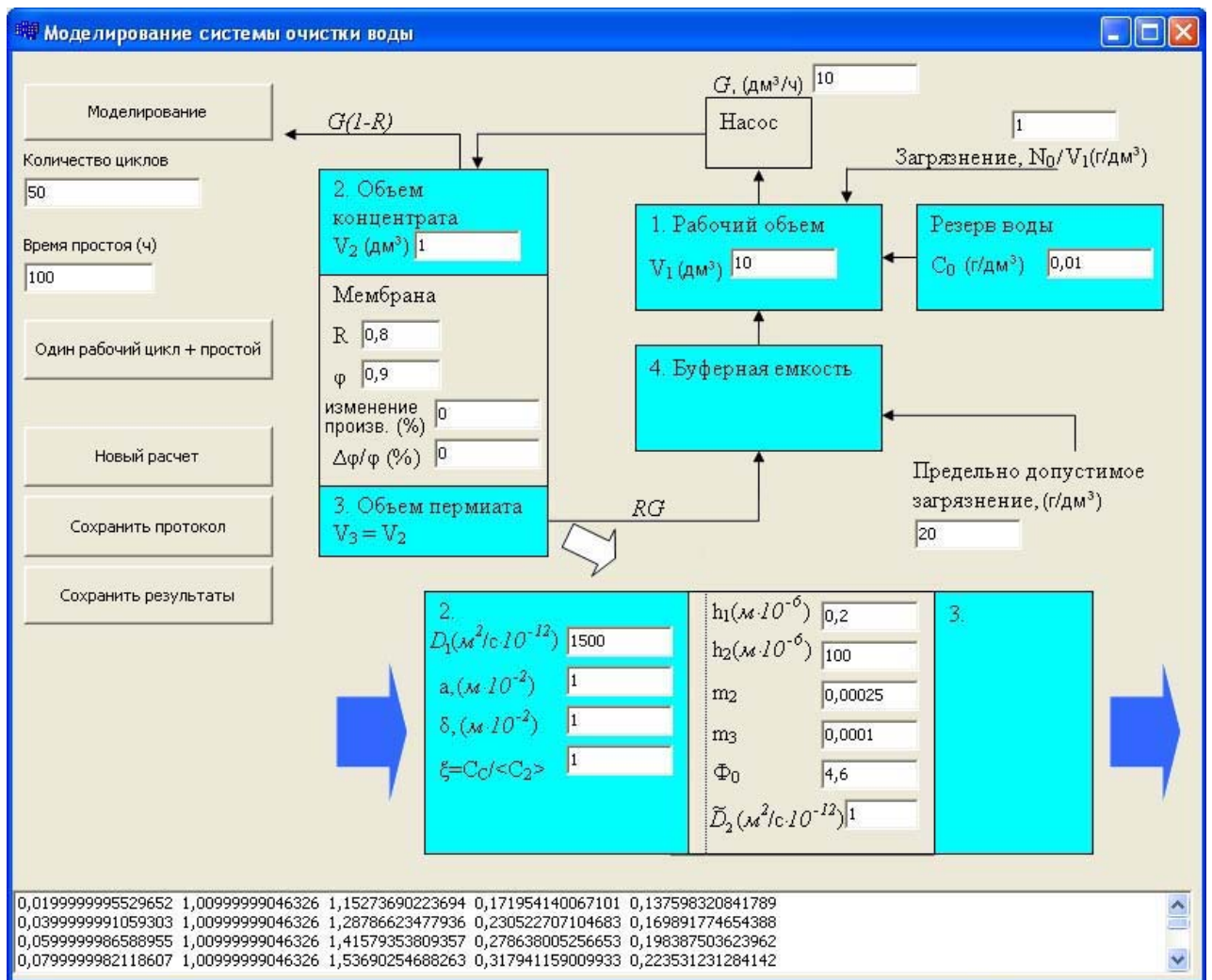


Рис. 9. Диалоговое окно программы, используемой для моделирования.

Программа позволяет сделать прогноз поведения системы в зависимости от количества рабочих циклов и различных параметров (рис. 10, 11).

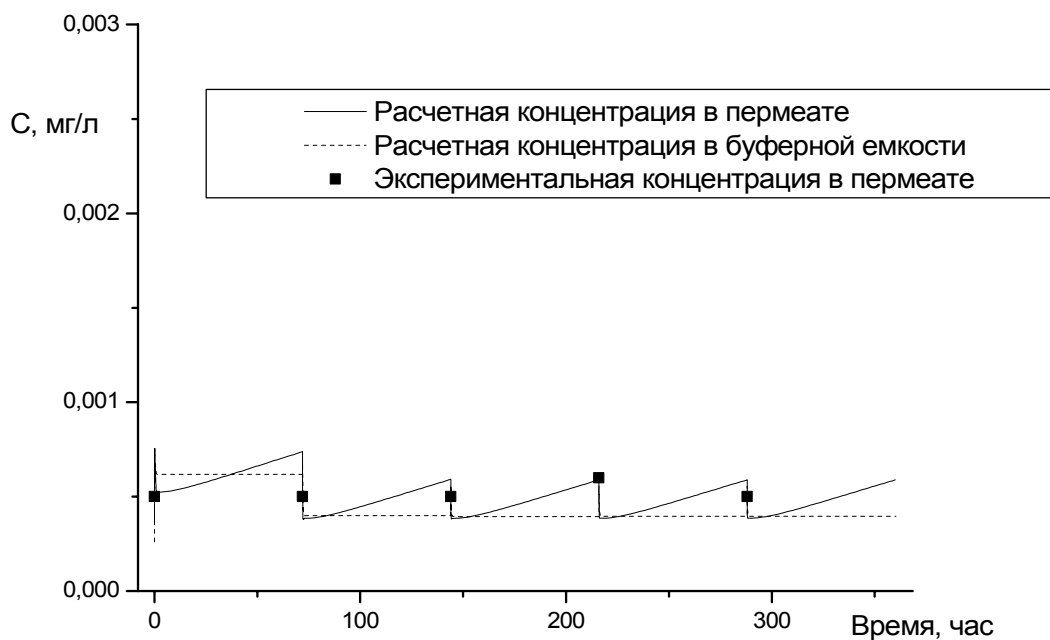


Рис. 10. Зависимости изменения концентраций ионов натрия в пермеате и буферной емкости от времени работы установки

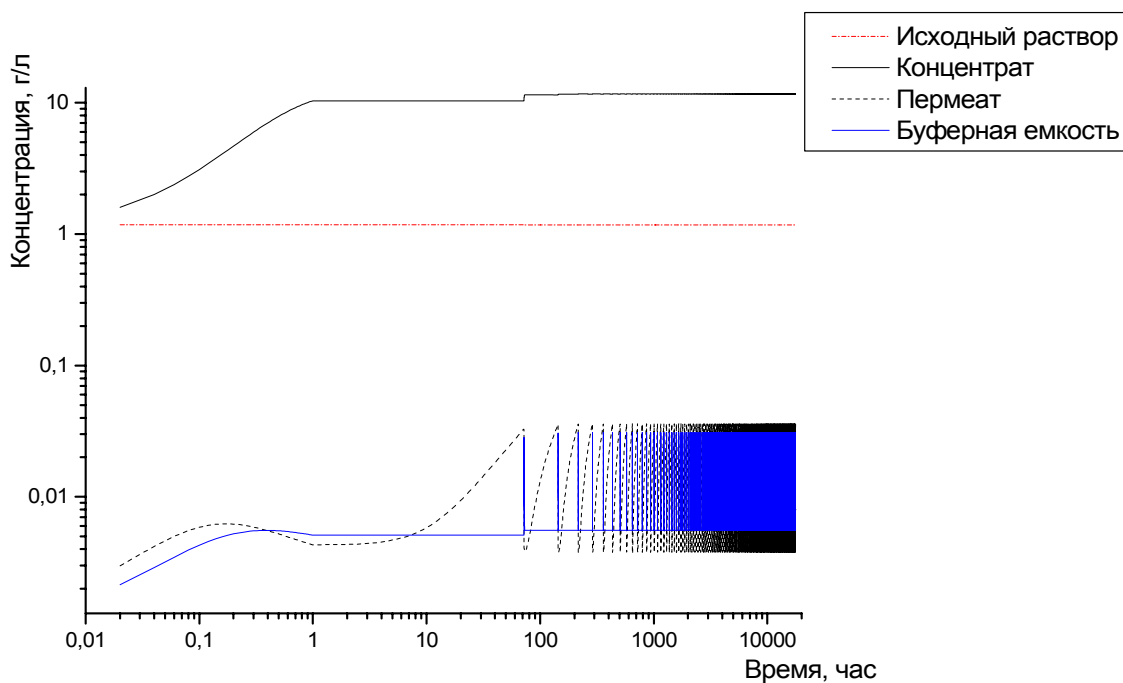


Рис. 11. Зависимость общего солесодержания в системе регенерации воды от времени работы, рассчитанная на два года. Результаты математического моделирования предлагаемой системы регенерации воды.

В пятой главе оценены массо-энергетические характеристики предлагаемой схемы регенерации СГВ. Для оценки массоэнергетических характеристик обратноосмотической системы взята за основу система СРВ-СГ. Принимается, что система, построенная на баромембранных процессах (ультрафильтрации и обратном осмосе) отличается лишь присутствием мембранных модулей и конструкцией блока подачи раствора. При этом считается, что разница в эквивалентных массах систем определяется лишь этими различиями.

В таблице 5 приведена сравнительная оценка эквивалентной массы оборудования, которое обеспечивает очистку СГВ в баромембранной и сорбционной системах. Для двухгодичного автономного полета принят общий объем требуемой воды для санитарно-гигиенических нужд и стирки белья 90 м<sup>3</sup>.

Таблица 5. Сравнительная оценка эквивалентной массы оборудования очистки СГВ

Объем регенерированной воды, м <sup>3</sup>	Эквивалентная масса оборудования, кг	
	СРВ-СГ	Баромембранная СРВ
10	459	705,35
50	3571	3313,35
90	6423	5921,35

Показано, что система регенерации СГВ, основанная на баромембранных процессах, в условиях двухлетнего космического полета (например, на Марс) имеет преимущество по массе перед системой СРВ-СГ. Преимущество же перед системой, основанной на запасах воды, составит на один полет более 80000 кг.

Несмотря на небольшой выигрыш предлагаемой нами схемы по массовым характеристикам системе СРВ-СГ, основанной только на механической фильтрации и сорбции, такая схема имеет ряд неоспоримых преимуществ, а именно:

- за счет введения узла ультрафильтрации многократно повышается ресурс всей системы в целом, а также происходит обеззараживание системы и, как следствие, обеспечивается микробиологическая чистота регенерированной воды;

- схема, основанная на баромембранных процессах, обладает способностью к задержанию большего спектра примесей, чем система, основанная исключительно на сорбции;

- повышается универсальность системы, то есть возможна регенерация воды, полученной из различных источников (стирка белья, душ, умывальное устройство и прочие).

## **ВЫВОДЫ**

1. Впервые для условий длительных космических экспедиций предложена схема регенерации СГВ на основе двух последовательных баромембранных процессов: предварительная обработка – ультрафильтрация на полых волокнах, основная – обратный осмос на рулонных мембранных элементах с частичным использованием концентрата для обратной промывки полых волокон. Такой узел регенерации имеет низкую эквивалентную массу, большую универсальность и селективность по загрязняющим компонентам.

2. Получена теоретическая зависимость выравнивания концентраций по обе стороны мембраны при простом аппарата из предположения о диффузии растворенного вещества через мембрану. Совпадение характера теоретических и экспериментальных диффузионных кривых, а также потенциалов взаимодействия поверхности пор активного слоя композитных



мембран с растворенным веществом подтверждает правильность полученных решений.

3. В развитие теории обратноосмотического разделения растворов и в соответствии с предложенной схемой разработана математическая модель работы узла регенерации воды из СГВ, позволяющая рассчитывать поведение системы оборотного водоснабжения с подпиткой водой, при ее длительной эксплуатации. С помощью полученных экспериментальных данных и представленной модели возможно рассчитывать основные характеристики системы регенерации: необходимый объем и качество воды запасов, производительность и сменность мембранных элементов и т. п., в зависимости, например, от требований к СГВ.

4. Разработана методика снятия диффузионной кривой и ее обработки с целью нахождения потенциала взаимодействия мембраны с растворенным веществом. Из экспериментальных диффузионных кривых по хлориду натрия для трех различных мембран вычислены соответствующие потенциалы и значения максимальной селективности. Полученные результаты разделяющей способности с точностью до 2% совпали с паспортными данными и экспериментальными рабочими характеристиками исследованных мембран.

5. Проведена многократная обработка нательного белья, полученного в гермокамерном эксперименте с участием человека, и регенерация полученной воды с последующим ее использованием. Анализ полученных данных показал высокую работоспособность предложенной схемы узла регенерации без заметного снижения производительности и селективности, а также соответствие качества регенерированной воды требованиям ГОСТ Р 50804-95 «Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования.» по измеренным показателям.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Стариков С. Е. Исследование возможности обеззараживающей ультрафильтрации на полых волокнах.// Материалы VI конференции молодых ученых и специалистов, аспирантов и студентов, посвященной Дню космонавтики. – М.: ГНЦ РФ ИМБП РАН, 2006. с. 51

2. Стариков С. Е., Короткова Т. П., Григорьева Е. Г. Разработка технологии регенерации санитарно-гигиенической воды на борту межпланетных космических кораблей.// Материалы конференции «Системы жизнеобеспечения как средство освоения человеком дальнего космоса». – М.: ГНЦ РФ ИМБП РАН, 2008. с. 93-94

3. Стариков С. Е., Сияк Ю. Е., Стариков Е. Н. Об изменении качества пермеата после длительных простоев мембранных аппаратов в замкнутых системах оборотного водоснабжения.// Критические технологии. Мембраны. № 4 (40), 2008. с. 20-24

4. Стариков С. Е., Короткова Т. П., Григорьева Е. Г. Разработка системы регенерации санитарно-гигиенической воды на основе баромембранных процессов для использования на борту межпланетных космических кораблей.// Авиакосмическая и экологическая медицина. № 6/1, 2008. с. 72-74

## Список цитированных литературных источников

1. Поляков С. В. Регенерация санитарно-гигиенической воды методом обратного осмоса применительно к системам регенерации воды космических кораблей. Дисс. на соискание ученой степени канд. технич. наук. – М.: ИМБП, 1982.

2. Шумилина И. В., Кривобок С. М., Шумилина Г. А. Использование нанофльтрации для регенерации различных видов санитарно-гигиенических вод, полученных в герметизированном объекте // Авиакосм. и эколог. мед. 1999. Т. 33. № 3. – С. 47-51

3. Чураев Н. В. Физикохимия массопереноса в пористых телах. – М.: Химия, 1990. 272 с.