Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

На правах рукописи

louf

Сальников Николай Александрович

Мембранная очистка санитарно-гигиенической воды в замкнутой системе водообеспечения

05.17.08 Процессы и аппараты химических технологий

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Николайкина Наталья Евгеньевна

Оглавление

Вве	дение	4
Очи	стка сточных вод, содержащих низкомолекулярные органические	
вещ	ества	10
1.1	Особенности поведения жидкости в условиях микрогравитации	11
1.2	Замкнутое регенерационное водообеспечение на объектах	
	специального назначения (космических станциях)	12
1.3	Очистка сточных вод в промышленности и коммунальном	
	хозяйстве	20
1.4	Процесс и аппаратура обратноосмотической очистки	24
1.5	Состояние вопроса, задачи и объем работы	39
1.6	Выводы по главе 1	42
Ана	лиз особенностей процесса обратноосмотической очистки при	
исп	ользовании в системе регенерации санитарно-гигиенической воды	
2.1	Разработка способа и схемы очистки с коэффициентом извлечения	
	воды 97-98% и селективностью до 99%	43
2.2	Физическая модель процесса обратноосмотической очистки	48
2.3	Анализ процесса обратного осмоса	55
2.4	Применение аналогии между массообменом и теплообменом к	
	анализу процесса обратного осмоса	56
2.5	Определение перепада давлений на мембране в	
	обратноосмотическом аппарате	60
2.6	Оценка осмотического давления разделяемых жидкостей	62
2.7	Оценка ресурсных характеристик обратноосмотических модулей	64
2.8	Выводы по главе 2	65
Экс	периментальные исследования процесса обратноосмотической	
очи	СТКИ	
3.1	Экспериментальная установка, аппаратура и методики	
	исследований	67
	Очи вени 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 Ана испо 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 Экс очи	1.2 Замкнутое регенерационное водообеспечение на объектах специального назначения (космических станциях)

	3.2	Анализ и обсуждение результатов экспериментов	77
	3.3	Обобщение результатов и разработка методики расчета	
		обратноосмотического аппарата	92
	3.4	Оценка погрешностей измерений	95
	3.5	Выводы по главе 3	96
4	Исс	ледование процесса обратноосмотической очистки натурной	
	сані	итарно-гигиенической воды	
	4.1	Очистка воды после мытья рук	98
	4.2	Очистка воды после водных процедур в душевой кабине	103
	4.3	Очистка воды после стирки	107
	4.4	Анализ результатов и оценка ресурса обратноосмотических	
		модулей	112
	4.5	Выводы по главе 4	117
5	При	именение системы регенерации санитарно-гигиенической воды	
	5.1	Система регенерации санитарно-гигиенической воды для	
		космической станции	118
	5.2	Экономический эффект от регенерации санитарно-гигиенической	
		воды	119
	5.3	Использование обратноосмотических установок исследованного	
		типа в промышленности, коммунальном хозяйстве и в быту	122
	5.4	Выводы по главе 5	124
	Осн	овные результаты и выводы	125
	Спи	исок сокращений и условных обозначений	128
	Спи	исок литературы	129
	При	иложения	138

Введение

Актуальность работы. В настоящее время в химической и смежных отраслях промышленности остро стоит проблема ресурсосбережения. По законодательным и экономическим требованиям необходима минимизация отходов производства, в том числе сточных вод, которая может быть достигнута путем применения современных процессов и аппаратов. Особенно остро данная проблема стоит в химической и в использующих процессы и аппараты химической технологии смежных специальных отраслях промышленности, где требуется максимально возможный возврат ценных компонентов, например при организации замкнутых эколого-технических систем, обеспечивающих искусственную среду обитания.

условиях дефицита ресурсов ужесточения И природоохранного законодательства все бо́льшую актуальность приобретает организация максимально замкнутого водообеспечения на предприятиях, которая позволяет минимизировать образование сточных вод. В последнее время все большее распространение получают мембранные методы очистки воды, которые, в ряде случаев, являются более эффективными и экономичными по сравнению с традиционными методами и все чаще используются при водоподготовке, очистке сточных вод, для концентрирования ценных компонентов на предприятиях химической, нефтехимической, отраслей смежных промышленности, полигонах твердых коммунальных и промышленных отходов, на автокомбинатах и, в последнее время, в индивидуальных домовладениях [1].

В настоящей работе проведены исследования, позволяющие организовать замкнутый цикл водообеспечения при разделении растворов сложного состава, содержащих низкомолекулярные органические вещества, с применением метода обратного осмоса, реализуемого при значениях давления, не превышающих 1,5 МПа. В работе, в качестве примера, рассмотрено возможное использование разработанной технологической схемы на космических станциях при длительных

пилотируемых космических экспедициях, где водные ресурсы подвергаются многократной регенерации.

Степень разработанности темы. Детальные исследования применения мембранных процессов для промышленности начались в середине XX века и отражены в работах С. Лоеба, С. Соурираджана и получили дальнейшее развитие в работах Ю.И. Дытнерского, А.А. Ясминова, В.П. Дубяги, Ф.Н. Карелина, Е.Е. Каталевского, Р.Г. Кочарова, Н.И. Николаева и др. В конце XX века мембранные процессы применялись преимущественно для обессоливания воды, но в последнее время с появлением новых материалов и технологий изготовления диапазон применения мембранных процессов стремительно расширяется. Тем не менее имеются некоторые ограничения при использовании данных процессов. Так широко применяемая сегодня в промышленности обратноосмотическая аппаратура работает проточном режиме рекомендуемых И, при производителями режимах функционирования, имеет сравнительно небольшие коэффициенты извлечения чистой воды, которые колеблются в среднем от 30% до 85% [2-4] и в ряде случаев могут быть увеличены. Для этого необходимы параметров исследования определению особенностей ПО режимов, И функционирования обратноосмотической аппаратуры при повышенном коэффициенте извлечения (регенерации) воды.

В связи с тем, что процесс низконапорного обратного осмоса осуществляется при рабочем давлении в аппарате 0,7-1,5 МПа [5], важным является изучение влияния поляризационных явлений на движущую силу процесса очистки.

Цель работы — осуществить решение новой научно-технической задачи регенерации воды методом обратного осмоса с высоким коэффициентом извлечения (возврата) воды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1. Провести анализ проблемы мембранной регенерации воды из растворов сложного состава и предложенных технических решений; обосновать построение системы регенерации санитарно-гигиенической воды методом обратного осмоса с высоким коэффициентом извлечения чистой воды.
- 2. Разработать физическую модель процессов, происходящих в напорном канале обратноосмотического аппарата при очистке воды от примесей.
- 3. Провести экспериментальное исследование процесса обратноосмотического разделения низкомолекулярных многокомпонентных смесей сложного состава, имитирующих реальную разделяемую систему, и модельных растворов.
- 4. Разработать методику расчета обратноосмотического аппарата, учитывающую условия проведения процесса очистки и закономерности поведения системы «разделяемый раствор мембрана».
- 5. Разработать технологическую схему системы регенерации воды, обеспечивающую минимизацию размеров и массы оборудования и затрат энергии на проведение очистки. Разработать и апробировать прототип системы регенерации санитарно-гигиенической воды с высоким коэффициентом извлечения воды.

Научная новизна. При выполнении работы получены следующие новые научные результаты.

1. Предложены и апробированы режим и система регенерации воды из растворов низкомолекулярных органических веществ при ранее не исследованных рабочих давлениях (до 1 МПа) и степенях концентрирования загрязняющих органических компонентов в 50 раз с обеспечением степени извлечения (возврата) воды 97...98% при селективности разделения более 99%.

Способ и устройство обратноосмотической очистки санитарногигиенической воды защищены патентами РФ.

- 2. Выявлено, что при очистке воды от моющего средства осмотическое давление разделяемого раствора у поверхности мембраны определяется слоем связанных с мембраной компонентов моющего средства, что учтено при разработке физической модели процесса транспорта растворителя.
- 3. Показана ранее не исследованная возможность использования аналогии между массообменом и теплообменом при расчете внешнего массопереноса в каналах мембранной аппаратуры при числах Льюиса Le = 80...110, и определена поправка в виде функции $f(Le) = Le^n$, учитывающая различия коэффициентов переноса и, соответственно, диффузионного и теплового чисел Прандтля.
- 4. Разработана методика оценки осмотического давления раствора у поверхности мембраны и движущей силы процесса обратного осмоса, основанная на использовании паспортных характеристик мембраны (коэффициента проницаемости) и фактической производительности аппарата.

Теоретическая и практическая значимость работы

- 1. Показана эффективность применения низконапорного обратного осмоса для регенерации санитарно-гигиенической воды в условиях работы на космической станции при использовании общепринятых моющих средств.
- 2. Разработана методика расчета производительности обратноосмотического аппарата при высоких степенях извлечения воды и стремящейся к 100% селективности, основанная на использовании аналогии между массообменом и теплообменом и учитывающая взаимодействие разделяемого раствора с материалом мембраны. Разработанная методика принята АО «НИИхиммаш» к использованию при проектировании обратноосмотической аппаратуры.
- 3. Разработан и испытан прототип системы регенерации санитарногигиенической воды, образующейся при мытье рук, принятии душа и стирке одежды, который показал свою эффективность при высокой степени извлечения воды и малом энергопотреблении и является основой для проектирования перспективных систем регенерации санитарно-гигиенической воды.

Научная новизна, теоретическая, практическая значимость и основные выводы опубликованы работах [1, 16, 66, 75].

Методология и методы исследования. Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, были использованы общепринятые положения теории гидродинамики, тепло- и массообмена. Экспериментальные исследования проводились при использовании модельных растворов и реальной разделяемой среды. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием специальных программных комплексов.

Положения, выносимые на защиту:

- Основные результаты экспериментальных исследований обратноосмотического разделения модельных растворов и реальной санитарногигиенической воды.
- Физическая модель процесса массопереноса моющего средства в напорном канале обратноосмотического аппарата.
- Способ расчета диффузионного сопротивления переносу массы в напорном канале обратноосмотического аппарата, основанный на использовании аналогии между массообменом и теплообменом, и методика расчета производительности обратноосмотического аппарата.
- Способ и технологическая схема обратноосмотической регенерации санитарно-гигиенических вод со степенью извлечения воды 97-98%.

Степень достоверности и обоснованности научных положений и результатов исследования. Достоверность научных результатов обеспечивалась использованием современных научно-исследовательских методов и поверенных приборов. Обоснованность результатов исследований базировалась на соответствии данных, полученных в результате эксперимента, общепринятым теоретическим положениям. Обработка экспериментальных данных проводилась при помощи ЭВМ в среде MathCAD и с помощью программ, написанных на языке программирования Python. Оценка достоверности

результатов исследований проводилась с определением толерантного интервала погрешностей.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались обсуждались на XIII - XVIII Международных конференциях «Авиация и космонавтика», г. Москва 2014 - 2019 гг.; XX, XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, г. Королев, 2014, 2017 гг.; Научнопрактической конференции имени Л.А. Костандова, г. Москва, 2014, 2015 гг.; ХІ, XII, XIII Научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» Звездный городок, 2015, 2017 гг.; XVI Конференции по космической биологии и медицине с международным участием, г. Москва, 2016 г.; XXI Международной конференции «Системный научной анализ, управление И навигация» г. Евпатория, 2016 г.

Публикации. По материалам работы опубликовано 20 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК. Получены патенты на изобретение и полезную модель.

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, проведены на базе Научно-исследовательского и конструкторского института химического машиностроения (АО «НИИхиммаш») при научных консультациях доктора технических наук, профессора Леонида Сергеевича Бобе.

1 Очистка сточных вод, содержащих низкомолекулярные органические вещества

Среди сточных вод, образующихся на промышленных, коммерческих и прочих предприятиях, а также на объектах специального назначения и в быту, содержащие в своем составе низкомолекулярные можно выделить воды, вещества. К низкомолекулярным органическим органические относится широкая номенклатура веществ, среди которых можно выделить уротропин, глицерин, поверхностно-активные вещества. Значительное количество органических низкомолекулярных веществ содержится В санитарногигиенических или санитарно-бытовых водах. Под санитарно-гигиеническими водами (СГВ) мы будем понимать воды, образующиеся в результате санитарногигиенических водных процедур человека, стирки одежды, мытья посуды и т.д. Санитарно-гигиеническая вода преимущественно загрязнена поверхностноактивными веществами, прочими составляющими моющих средств (низкомолекулярные органические вещества, минеральные составляющие), загрязнениями органического и минерального происхождения, переходящими в загрязненные воды с волокон одежды и тела человека (белки, жиры и т.д.), механическими частицами (волосы, нитки, частицы эпидермиса) [6-10].

В соответствии с Федеральной космической программой на 2016-2025 гг. планируется отработка технологий и космических систем, необходимых для реализации программ пилотируемого освоения Луны и дальнего космоса [11]. Планируются длительные пилотируемые космические экспедиции, при которых невозможна доставка грузов с Земли, а требуемая масса и объем запасов слишком велики. Одной из требующих решения задач является организация автономного санитарно-гигиенического обеспечения экипажа. Наиболее рациональным считается введение водных процедур и стирки на борту пилотируемого космического аппарата с последующей регенерацией санитарно-гигиенической воды (СГВ) [12]. Приоритетной задачей является сведение к минимуму

количества запасов и отходов, поэтому требуется максимально возможный возврат воды в контур водообеспечения, а процесс регенерации воды должен проводиться с максимально возможной эффективностью и экономичностью методами, реализуемыми в условиях микрогравитации, и обеспечивать экологическую безопасность замкнутой эколого-технической системы. Поток СГВ превосходит все остальные потоки и составляет до 50% от общего потока воды в изолированном жилом объеме, поэтому принципиально достижение максимально возможного коэффициента возврата СГВ в цикл водообеспечения.

Для обеспечения качества водных процедур и стирки предполагается использование общепринятых моющих средств, в составе которых содержатся низкомолекулярные органические вещества. Вода после проведения водных процедур и стирки одежды загрязнена преимущественно компонентами моющих средств, механическими частицами и содержит значительное количество бактериальной микрофлоры [6]. Задача регенерации таких вод может быть решена путем применения ограниченного ряда физико-химических методов очистки, обеспечивающих наименьшую удельную массу оборудования и реализуемых в условиях микрогравитации.

1.1 Особенности поведения жидкости в условиях микрогравитации

На борту космической станции аппаратура систем жизнеобеспечения работает в условиях динамической невесомости. В таком состоянии силы гравитации уравновешиваются инерционными силами. Как правило, в таких условиях возникают проблемы c осуществлением эффективных гидродинамических и тепломассообменных процессов. Особенно это отражается на эффективности процессов В системах «газ-жидкость» процессов тепломассообмена, определяемых свободной конвекцией. Так при практически полном отсутствии внешних сил основное влияние на поведение границы раздела фаз межмолекулярные «газ-жидкость» оказывают силы поверхностного натяжения и смачивания [7]. При таких условиях функционирования при выборе

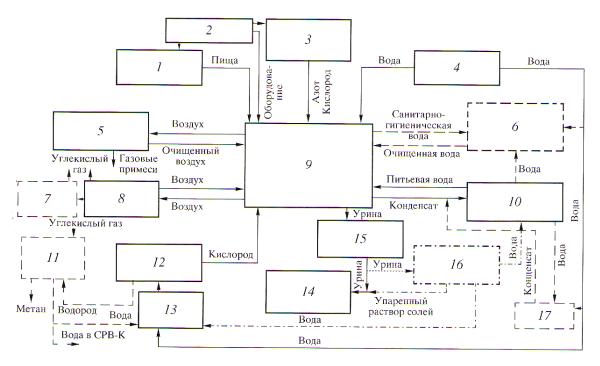
оборудования необходимо отдавать предпочтение реализации массообменных процессов в одной фазе без разрыва потока. В этом случае движущая сила практически не зависит от воздействия гравитационных сил, а массообменные процессы для условий микрогравитации могут быть рассчитаны на основе представленных в литературе теоретических положений.

1.2 Замкнутое регенерационное водообеспечение на объектах специального назначения (космических станциях)

На пилотируемых орбитальных станциях «Салют», «Мир» и в настоящее время на Международной космической станции (МКС) организован круговорот воды и кислорода аналогично происходящему в биосфере Земли. В настоящее время разработана и принята структура комплекса систем жизнеобеспечения, представленная на рисунке 1.1. При этом в связи с энергетическими, объемными, массовыми ограничениями и по соображениям безопасности в ближайшем будущем для регенерации воды и атмосферы будет продолжено использование искусственно организованных физико-химических процессов [13].

В настоящее время на борту российского сегмента Международной космической станции (МКС) функционируют следующие системы: усовершенствованная система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги (СРВ-К2М), система приема и консервации урины (СПК-УМ), система электролизного получения кислорода «Электрон-ВМ», система очистки от углекислого газа «Воздух», система очистки от микропримесей (СБМП) [13], проходит испытания и отработку система регенерации воды из урины (СРВ-У-РС) [14].

Условия космического полета формируют определенные требования к оборудованию регенерации воды, среди которых можно выделить возможность функционирования в условиях микрогравитации, максимально возможную степень возврата воды в цикл водообеспечения, минимальное энергопотребление, массу и габариты очистного оборудования.



1 - запасы пищи; 2 - доставляемые грузы; 3 - аварийный запас кислорода и азота; 4 - система запасов воды; 5 - система очистки атмосферы от вредных примесей; 6 - система регенерации санитарно-гигиенической воды; 7 - система концентрирования углекислого газа; 8 - система очистки атмосферы от углекислого газа «Воздух»; 9 - гермокабина с экипажем; 10 - система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги; 11 - система переработки углекислого газа; 12 - система генерации кислорода «Электрон-В(М)»; 13 - средства очистки воды; 14 - система сбора отходов; 15 - система приема и консервации урины; 16 - система регенерации воды из урины; 17 — оранжерея; пунктирной линией обозначены перспективные системы, не введенные в состав российского сегмента МКС

Рисунок 1.1 – Структура комплекса регенерационных систем жизнеобеспечения МКС [13]

На борту перспективных космических станций актуальной является проблема организации санитарно-гигиенического водообеспечения экипажа и регенерации загрязненной воды для ее повторного использования [12, 13]. Данная проблема особенно актуальна для длительных пилотируемых миссий, где невозможна доставка грузов.

По российской концепции [12] для организации санитарно-гигиенического обеспечения с водными процедурами на перспективных станциях предполагается организовать отдельный замкнутый контур санитарно-гигиенической воды (СГВ), а очистку воды проводить до требований к СГВ согласно ГОСТ Р 50804-95. Для обеспечения качества водных процедур и стирки предполагается использование общепринятых моющих средств, в составе которых содержится большое количество низкомолекулярных органических веществ. По требованиям нормативов [15] на проведение водных процедур одного космонавта ежесуточно требуется от 2,2 до 7 литров СГВ. При учете затрат воды на стирку текстильных материалов, ежесуточный расход воды на одного человека может составить до 9,2 литров [16]. В таблице 1.1 представлен суточный водный баланс для одного космонавта. Из баланса следует, что поток СГВ наиболее значительный и составляет до 50% от общего потока воды на станции. Именно поэтому принципиально достижение максимально возможного коэффициента извлечения санитарно-гигиенической воды. Повышение степени извлечения воды из СГВ на 1% приводит к экономии 0,1 кг в сутки на одного члена экипажа, что для Международной космической станции (МКС) в денежном эквиваленте превышает 2000 долларов США на одного члена экипажа в сутки.

Как будет показано далее, основными загрязняющими компонентами в воде, образующейся после санитарно-гигиенических операций, являются твердые механические частицы, компоненты моющего средства (низкомолекулярные органические вещества и минеральные составляющие), вещества, выделяющиеся с потом и другими секретами [17]. Содержание компонентов моющего средства преобладает над содержанием прочих компонентов, и они являются основными загрязнителями, от которых необходима очистка.

На орбитальной станции «Мир» проходило летные испытания оборудование для проведения водных процедур экипажа и система регенерации санитарно-гигиенической воды [16], принципиальная схема которой приведена на рисунке 1.2.

Таблица 1.1 – Баланс по воде для одного космонавта в сутки

II	Варианты потребления			ения	Источники	Варианты поступления			
Цели потребления воды,	воды				поступления воды,	воды			
л/чел. сутки	1	2.1	2.2	2.3	л/чел. сутки	1	2.1	2.2	2.3
Питьё и приготовление пищи	2,2	2,2	2,2	2,2	Конденсат атмосферной влаги 1,5+0,2 × 0,5*	1,6	1,6	1,6	1,6
Вода в рационе питания	0,5	0,5	0,5	0,5	Вода с рационом питания	0,5	0,5	0,5	0,5
Личная гигиена	0,2	0,2	0,2	0,2	Вода из смеси урины со смывной водой (1,3+0,3)×0,9**	1,44	1,44	1,44	1,44
Смыв в туалете	0,3	0,3	0,3	0,3	Вода из системы утилизации углекислого газа по методу Сабатье	0,45	0,45	0,45	0,45
Витаминная оранжерея		4,0	4,0	4,0	Конденсат транспирационной влаги из оранжереи		3,8	3,8	3,8
Мытье рук и лица (СГВ) Мытье тела и головы (СГВ) Стирка одежды (СГВ)		2,2	3,8	3,8	Регенерированная СГВ		2,15	5,88	9,02
Электролизное получение O_2	1,0	1,0	1,0	1,0	Доставляемая вода	0,21	0,46	0,53	0,59
Итого	4,2	10,4	14,2	17, 4		4,2	10,4	14,2	17,4
Степень возврата воды, %						83,1	90,8	92,8	93,7

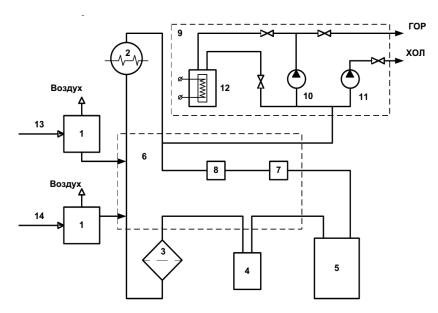
Вариант 1: На борту космической станции отсутствуют витаминная оранжерея и оборудование для осуществления водных процедур.

Вариант 2: На борт космической станции введена витаминная оранжерея, осуществляются водные процедуры с использованием устройства для мытья рук и лица (2.1), дополнительно используется устройство для мытья тела и головы (2.2), дополнительно осуществляется стирка текстильных материалов (2.3).

Источник: опубликована автором в работе [16].

^{* 0,5} л воды в сутки поступает с пищей

^{** 0,9 -} коэффициент извлечения воды из урины



1 — устройства для сепарации жидкости от транспортного воздуха; 2 — емкость для хранения загрязненной и регенерированной воды; 3 — фильтр; 4 — блок перекачки жидкости; 5 — блок сорбционной очистки; 6 — устройство контроля качества регенерированной воды; 8 — блок консервации регенерированной воды; 9 — блок выдачи воды на потребление; 10, 11 — насосы; 12 — водонагреватель; 13, 14 — потоки газожидкостной смеси душевой кабины и из рукомойника соответственно

Рисунок 1.2 – Принципиальная схема системы регенерации санитарногигиенической воды, проходившей летные испытания на орбитальной станции «Мир» [13]

Загрязненная СГВ из рукомойника и душевой кабины транспортировалась потоком воздуха в сепарационную аппаратуру. Отделенная от воздуха жидкость проходила стадии фильтрования и сорбционной очистки ионообменными смолами и активированным углем. После контроля качества регенерированная вода консервировалась ионами серебра блоке консервации транспортировалась на хранения. В блоке выдачи воды при необходимости осуществлялся нагрев воды с последующим транспортированием на потребление. Ключевым процессом регенерации СГВ на станции «Мир» была сорбция на ионообменных смолах. Регенерация воды в системе СРВ-СГ осуществлялась в квазистатическом режиме путем периодического вытеснения фиксированного

объема жидкости. Такая система работоспособна только при использовании диссоциирующих на ионы моющих средств [12], и не обеспечивает очистку от компонентов, содержащихся в бытовом мыле и шампунях.

Американские специалисты разрабатывали для космической станции «Фридом» и в дальнейшем для МКС интегрированную систему регенерации воды из конденсата атмосферной влаги, урины и санитарно-гигиенической воды, схема которой представлена на рисунке 1.3. На рисунке 1.4 приведена принципиальная схема питьевого процессора, в котором все потоки очищаются до качества питьевой воды [18, 19]. Вода вначале фильтруется, затем очищается от примесей В блоках мультифильтрации диссоциирующих на ионы ионообменными смолами, поступает в высокотемпературный каталитический реактор окисления органических примесей и очищается от продуктов реакции в блоке ионообменной очистки.

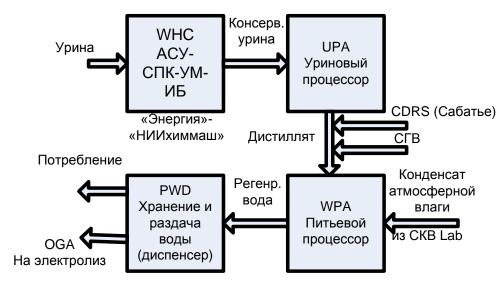
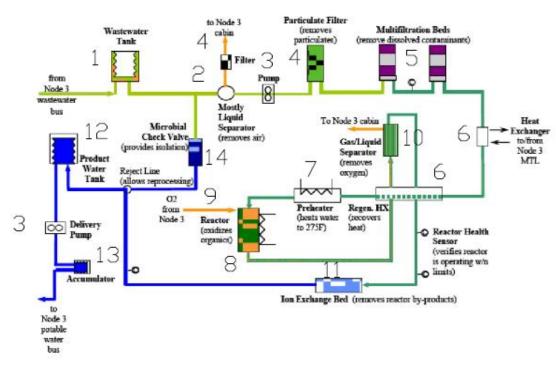


Рисунок 1.3 – Структурная схема регенерации воды американского сегмента МКС

Как видно, при принятой схеме большой поток санитарно-гигиенической воды, значительно более загрязненный (взвесями и моющими средствами), чем конденсат атмосферной влаги и дистиллят урины, проходит сложную систему очистки до показателей питьевой воды. Необходима тщательная предварительная

очистка СГВ. Такая схема представляется нерациональной. При автономном контуре СГВ процесс очистки значительно упрощается.



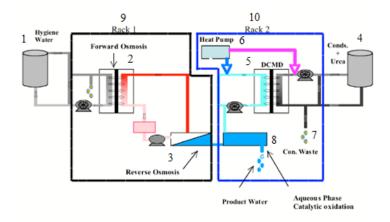
- 1 Емкость загрязнённой воды. 2 Центробежный сепаратор. 3 Насос.
- 4 Механический фильтр. 5 Блок мультифильтрации (ионообменной очистки).
- 6 Рекуператор. 7 Нагреватель. 8 Каталитический реактор. 9 Ввод кислорода.
- 10 Сепаратор кислорода. 11 Блок ионообменной очистки. 12 Емкость продуктовой воды.

Рисунок 1.4 – Принципиальная схема питьевого процессора WPA американского сегмента МКС

Другая группа специалистов, разрабатывающая альтернативные системы для новой станции и перспективных межпланетных полётов, проводит разработку и наземные испытания стендовых образцов комбинированной системы регенерации воды из смеси конденсата атмосферной влаги, урины и СГВ с использованием методов прямого и обратного осмоса [20].

Принципиальная схема системы приведена на рисунке 1.5. В системе организован дополнительный контур концентрированного раствора мочевины (по другим данным сахара).

В этот контур за счёт прямого осмоса отсасывается вода из санитарногигиенического потока, достижимый коэффициент извлечения неясен. За счет обратного осмоса эта вода поступает в контур продуктовой воды. В этот же контур поступает дистиллят, образующийся при дистилляции смеси конденсата атмосферной влаги и урины. Используются мембранный дистиллятор с тепловым насосом. Предполагается жидкофазное окисление органических примесей в дистилляте. Как видно, схема регенерации весьма сложная. Конкретных данных по испытаниям не приводится.



1 - Санитарно-гигиеническая вода. 2 - Прямой осмос. 3 - Обратный осмос. 4 - Емкость с конденсатом атмосферной влаги и уриной. 5 - Мембранный дистиллятор. 6 - Тепловой насос. 7 - Отходы при дистилляции (концентрат). 8 - Жидкофазное каталитическое окисление. 9 - Стойка 1. 10 - Стойка 2.

Рисунок 1.5 – Комплексная система регенерации воды, разрабатываемая в США

Имеются данные о разработках технологии доочистки воды методами прямого и обратного осмоса (рисунок 1.6) [21]. Потоки конденсата атмосферной влаги, санитарно-гигиенической воды и урины смешиваются и проходят очистку в мембранном биореакторе (МБР). Выходящая из МБР вода направляется на доочистку на ступень прямого осмоса, переходит в полость с осмотическим агентом (раствором NaCl с концентрацией 8 г/л) и извлекается из него методом обратного осмоса при рабочем давлении, достигающем 6,9 МПа.

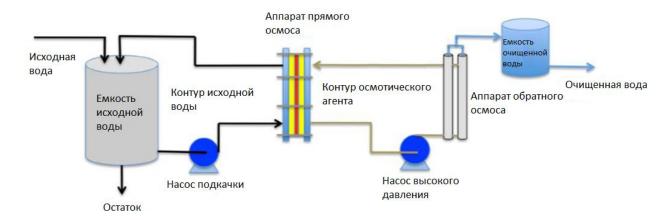


Рисунок 1.6 — Схема доочистки воды комбинированным методом прямого и обратного осмоса

В настоящее время ставится задача регенерации СГВ при использовании для водных процедур и стирки общепринятых моющих средств. Наиболее перспективными технологиями очистки воды в настоящее время считаются мембранные технологии. Среди них наибольшее распространение получил метод обратного осмоса [22, 23], который позволяет проводить очистку воды от значительного набора загрязняющих веществ органического и минерального происхождения [2, 24-26] при температуре окружающей среды. Отдельного внимания заслуживает низконапорный обратный осмос, для осуществления которого необходимо рабочее давление от 0,7 до 1,5 МПа [5].

1.3 Очистка сточных вод в промышленности и коммунальном хозяйстве

Сточные воды коммунальных и промышленных предприятий по характеру загрязнений весьма разнообразны, часто имеют сложный состав, который зависит от типа предприятия, характера технологического процесса и других факторов. Такие воды могут содержать как минеральные, так и органические вещества, в том числе и поверхностно-активные вещества (ПАВ). При этом в литературе не уделяется достаточного внимание проблеме очистки воды от низкомолекулярных органических веществ.

Выбор метода очистки сточных вод от низкомолекулярных органических веществ зависит от природы растворенных веществ, их концентрации, наличия дополнительных примесей как органического, так и минерального происхождения, материальной базы и мощностей предприятия.

В общем случае очистка сточных вод проводится путем извлечения загрязнений или путем их деструкции. Загрязнения могут быть извлечены с использованием экстракции, перегонки, ректификации, адсорбции, ионного обмена, коагуляции, обратного осмоса, ультрафильтрации, химического осаждения, электрохимической очистки, биологической очистки и некоторых других. Деструкция загрязнений проводится путем термического окисления, реагентного окисления (озонирования, хлорирования и т.д.) и ряда других методов.

Значительную долю от низкомолекулярных органических веществ в сточных водах занимают поверхностно-активные вещества (ПАВ). В последние годы сфера применения ПАВ в промышленности значительно расширилась [27]. Поверхностно-активные вещества применяются для производства моющих средств, очищающих препаратов, красок, покрытий, бумаги, при производстве текстильных материалов и т.д. При этом большую опасность для всей биосферы представляет даже незначительные количества ПАВ. В отличие от остальных слабо подвержены органических веществ ОНИ деградации, непосредственное токсическое действие на живые организмы, имеют тенденцию к накоплению в пищевых цепочках, что представляет серьезную опасность для человека [27, 28].

He эффективны все методы одинаково при очистке воды ОТ Эффективность низкомолекулярных органических веществ. использования наиболее распространенных общепринятых методов очистки по данным [27-32] представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Эффективность наиболее распространенных общепринятых методов очистки воды от низкомолекулярных органических веществ

Наименование метода	Эффективность очистки, %	Преимущества	Недостатки метода		
Экстракция	96 – 99,5	Высокая эффективность	Вторичное загрязнение сточных вод экстрагентом		
Ионный обмен	до 95	Позволяет осуществить возврат органических компонентов в технологический цикл после регенерации и получать воду удовлетворительного качества даже при очистке растворов сложного состава	Применяется только к веществам, диссоциирующим на ионы, избирательность поглощения ионов, высокая вероятность достижения состояния «ложного» равновесия		
Коагуляция	30 – 40	Простота метода	Осадок может становиться рыхлым, что может приводить к дефлокуляции и диспергировании частиц		
Обратный осмос	95 – 99	Низкая материалоемкость и энергоемкость, простое аппаратурное оформление, низкие капитальные затраты	Необходимость предварительного удаления механических примесей и взвешенных веществ, осадкообразование, ограниченный срок службы мембран		

На сегодняшний день большое распространение для водоочистки и извлечения ценных компонентов из сточных вод получили мембранные благодаря простоте аппаратурного оформления высокой технологии И эффективности очистки. В работах [25, 26, 33-37] описывается положительный опыт использования обратного осмоса для очистки сточных вод, содержащих низкомолекулярные органические вещества, в том числе ПАВ, а также электролиты. Обратноосмотические установки внедрены успешно эксплуатируются на ряде российских предприятий [4, 25, 26]. Тем не менее процесс обратного осмоса изучен в недостаточной степени. Возникают сложности при расчете обратноосмотической аппаратуры. В большинстве случаев приходится проводить экспериментальные исследования. Как правило, при очистке воды обратным осмосом в связи с осадкообразованием на поверхности мембран и высоким осмотическим давлением исходных вод коэффициент извлечения (возврата в технологический цикл) воды достаточно низок и при обессоливании воды обычно не превышает 30-40% [2].

В настоящее время широкое распространение получили бытовые проточные системы доочистки водопроводной воды методом низконапорного обратного осмоса, функционирующие при рабочем давлении от 0,35 МПа до 0,70 МПа. Коэффициент извлечения чистой воды из исходного потока (степень отбора фильтрата) в таких системах составляет 10-45% [38, 39].

Обратноосмотические установки с высокими коэффициентами извлечения встречаются редко. Так, воды довольно известна автономная обратноосмотическая установка, обеспечивающая очистку гальванических сточных вод от солей тяжелых металлов с эффективностью не ниже 98% и степень повторного использования воды до 95%, функционируя при рабочем давлении от 3,0 до 5,0 МПа [26]. Известно о возможностях функционирования обратноосмотических аппаратов при степени отбора фильтрата до 85% [3, 4], но, обратноосмотические как правило, системы концентрирования общепринятых низкомолекулярных органических веществ при функционирования аппаратуры не обеспечивают степень извлечения воды более 40%.

Обратный осмос является наиболее подходящим отделения ДЛЯ низкомолекулярных органических и минеральных веществ применительно к регенерации СГВ и реализуемым в условиях микрогравитации, поскольку при данном процессе происходит разделение непрерывного однофазного потока посредством полупроницаемой перегородки, а движущая сила процесса превышает гравитационные силы, влиянием значительно которых ОНЖОМ пренебречь при проведении отработки в земных условиях.

1.4 Процесс и аппаратура обратноосмотической очистки

1.4.1 Типы синтетических полупроницаемых мембран

В общем случае под мембраной понимают селективный барьер между двумя фазами. Как правило, в промышленности применяют синтетические твердые (органические или минеральные) и динамические (формируемые на твердой подложке в процессе разделения смеси) мембраны. Исходя из этого, можно дать более конкретное определение мембраны: «мембрана – это фаза (или группа фаз), разделяющая две различные фазы, отличающиеся физически и (или) химически от фаз мембраны; при этом мембрана обладает свойствами, позволяющими ей под действием приложенного силового поля (движущей силы) управлять процессами массопереноса между разделяемыми фазами» [40]. Классификация синтетических мембран по структуре представлена на рисунке 1.7. Для проведения процесса обратного осмоса чаще всего используют асимметричные мембраны. Наибольшее распространение получили композитные полимерные мембраны [41], состоящие из пористой подложки, обеспечивающей механическую прочность, и селективного слоя, являющегося барьером для прохождения растворенных веществ. Наибольшее распространение по типу получили следующие композитные мембраны: применяемых материалов ацетатцеллюлозные мембраны и полиэфирсульфонные мембраны. Процесс разделения низкомолекулярных органических веществ на ацетатцеллюлозных мембранах исследовался в работах [37] и [42]. При этом очень мало работ, в которых исследовалось разделение низкомолекулярных органических веществ на полиэфирсульфонных мембранах, ктох мембраны данного типа имеют преимущества по химической стойкости и производительности и в настоящее время преимущественно применяются в обратноосмотической аппаратуре.

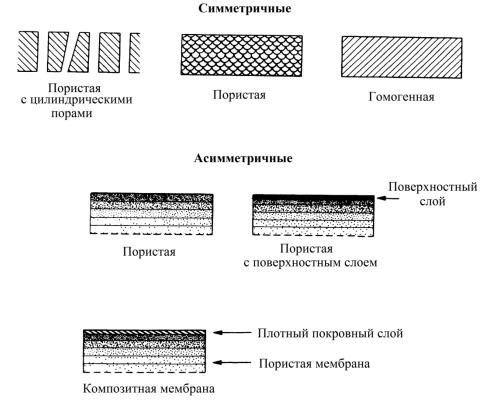


Рисунок 1.7 – Типы синтетических мембран в разрезе

1.4.2 Процесс обратного осмоса

Осмосом процесс называется перехода растворителя ИЗ менее концентрированного раствора (в идеальном случае из раствора с нулевой концентрацией) через полупроницаемую мембрану в более концентрированный раствор под действием разности химических потенциалов (рис. 1.8 а). После достижения равновесия образуется перепад высот (уровней) между двумя растворами (в идеальном случае раствором и чистым растворителем). Величина перепада между раствором и чистым растворителем называется осмотическим давлением раствора. Если приложить к раствору давление, превышающее осмотическое, то растворитель начнет переходить через полупроницаемую мембрану из раствора в полость с чистым растворителем (рис. 1.8 б). Данный процесс получил название «обратный осмос».

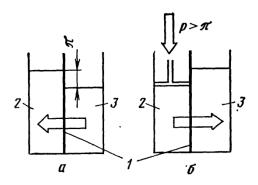


Рисунок 1.8 – Иллюстрация процесса прямого и обратного осмоса:

а – прямой осмос; б – обратный осмос; 1 – мембрана; 2 – раствор; 3 – чистый растворитель; π – осмотическое давление; р – рабочее давление

Таким образом, обратный осмос — это баромембранный процесс разделения жидких однородных смесей при давлении, превышающем осмотическое, при помощи полупроницаемых мембран, которые пропускают растворитель и задерживают растворенные вещества. Процесс обратноосмотического разделения проиллюстрирован на рисунке 1.9. Движущей силой процесса является перепад давления на мембране.

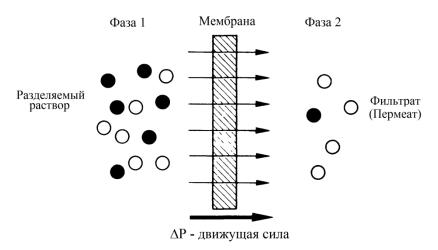


Рисунок 1.9 – Схема системы «Разделяемый раствор – мембрана»

На сегодняшний день не разработано достоверного описания механизма разделения смесей методом обратного осмоса. Существует ряд гипотез, которые в той или иной степени описывают механизм проницания относительно определенной группы веществ. При проведении дальнейших рассуждений мы

будем опираться на положения гипотезы Ю.И. Дытнерского [43] о капиллярнофильтрационном механизме селективной проницаемости обратноосмотических мембран.

В общем случае процесс обратноосмотического разделения можно описать следующими соотношениями [40, 44-47]:

$$J_w = K_w \cdot (\Delta P - \Delta \pi), \tag{1.1}$$

$$J_{s} = K_{s} \cdot \Delta C. \tag{1.2}$$

где K_W — коэффициент проницаемости воды через мембрану; K_S — коэффициент проницаемости растворенного вещества через мембрану; ΔP — разность давлений до и после мембраны; $\Delta \pi$ — разность осмотических давлений раствора до мембраны и фильтрата (пермеата) после мембраны; ΔC — разность концентраций растворенного вещества до и после мембраны.

Из соотношений (1.1) и (1.2) следует, что поток растворителя (например, воды) через мембрану прямо пропорционален разности рабочего и осмотического давлений по обе стороны мембраны, а поток растворенного вещества через мембрану определяется селективностью мембраны и диффузией за счет разности концентраций и не зависит от давления.

Эффективность разделения смесей методом обратного осмоса зависит от ряда факторов, среди которых можно выделить взаимодействие материала мембраны с раствором, концентрационную поляризацию, температуру, перепад давления.

1.4.3 Влияние внешних факторов на разделяющую способность мембран

На разделяющую способность мембран оказывают влияние следующие внешние факторы [45, 48]: давление, температура, гидродинамические условия, электрические и магнитные поля, ультразвуковые волны, концентрация компонентов в исходном растворе, выход очищенной жидкости (пермеата) и некоторые другие. Далее рассматривается влияние на разделяющую способность мембран следующих ключевых параметров: давления, температуры, выхода

пермеата и концентрации растворенных веществ в исходном растворе, при этом предполагается, что остальные три ключевых параметра принимают постоянные значения.

С возрастанием давления потока подаваемого исходного раствора селективность мембраны возрастает, общее содержание растворенных веществ в пермеате снижается, в то время как удельная производительность мембраны по пермеату возрастает. На рисунке 1.10 показаны соответствующие зависимости.

С повышением температуры при постоянстве остальных факторов будут наблюдаться рост удельной производительности мембраны по пермеату и прохождения растворенных веществ через мембрану, как показано на рисунке 1.11.

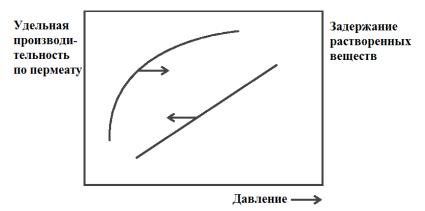


Рисунок 1.10 — Зависимость производительности и задерживающей способности мембраны от давления потока исходного раствора [49]

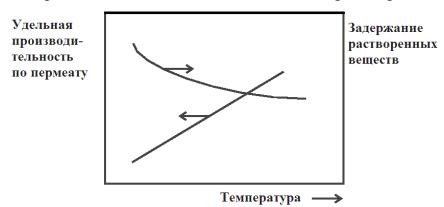


Рисунок 1.11 — Зависимость производительности и задерживающей способности мембраны от температуры

В случае повышения выхода пермеата (отношения потока пермеата к потоку исходной воды) удельная производительность мембраны по пермеату будет снижаться за счет большей степени концентрирования растворенных разделяемом растворе напорного канала аппарата, проявления концентрационной поляризации и, как следствие, увеличения Поток вовсе осмотического давления. прекратится, если концентрация растворенных веществ достигнет значения, при котором осмотическое давление концентрируемого раствора уравняется с прилагаемым давлением исходного раствора. С повышением выхода пермеата прохождение растворенных веществ в пермеат через мембрану также будет увеличиваться (см. рис. 1.12).

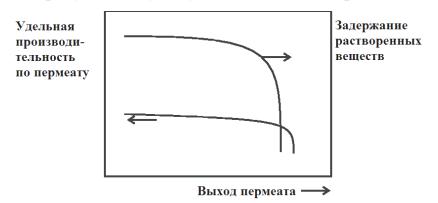


Рисунок 1.12 — Зависимость производительности и задерживающей способности мембраны от выхода пермеата

Повышение концентрации растворенных веществ в исходном растворе за счет роста концентрации растворенных веществ и осмотического давления разделяемого раствора в аппарате приводит как к снижению удельной производительности мембраны, так и к снижению задерживающей способности мембраны в соответствии с рисунком 1.13.



Рисунок 1.13 — Зависимость производительности и задерживающей способности мембраны от концентрации растворенных веществ в исходном растворе

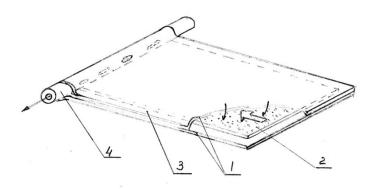
1.4.4 Конструкции и устройство обратноосмотических аппаратов и установок

К баромембранным промышленным аппаратам предъявляют ряд требований, среди которых большая поверхность мембран в единице объема сборка аппарата; удобная И монтаж; сбалансированная конструкция, обеспечивающая равномерное распределение жидкости в секциях и элементах аппаратов и при этом обеспечивающая достаточно высокую скорость течения жидкости в напорных каналах для снижения концентрационной поляризации; минимальный перепад давления по длине напорного канала; обеспечение механической прочности, герметичности и т.д. [45, 50].

По способу укладки мембран аппараты для баромембранных процессов классифицируют на следующие типы [45]: аппараты с плоскими, трубчатыми, рулонными мембранными элементами и с мембранами в виде полых волокон.

На сегодняшний день рулонные мембранные модули имеют подавляющий спрос на рынке [46, 48]. Это можно объяснить довольно удачной конструкцией аппаратуры такого типа: корпус аппарата выполняется в виде тонкостенного цилиндра диаметром до 200 мм и обычно изготавливается из тонкого металла или стеклопластика; плотность упаковки мембран в рулонных модулях достигает 1000 м²/м³; модули производятся полностью механизированным способом.

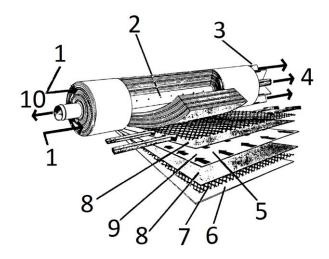
На рисунке 1.14 представлена схема устройства мембранного элемента, входящего в состав рулонного модуля. По центру рулонного мембранного модуля располагается дренажная трубка 4 с прорезями для отвода фильтрата. К дренажной трубке герметично присоединяются мембранные элементы (пакеты) 3, состоящие из двух мембран 1, между которыми расположен плоский дренажный канала 2. При формировании рулонных модулей мембранные элементы, кромки которых загерметизированы специальным клеем, навиваются на дренажную трубку [45], а на поверхность мембран укладывается сетка-турбулизатор, которая предотвращает слипание мембран между собой при сворачивании и осуществляет турбулизацию потока. Конструкция мембранного модуля представлена на рисунке 1.15.



1 - мембрана; 2 - плоский дренажный канал; 3 - зона герметизации кромки; 4 - пермеатотводящая дренажная трубка

Рисунок 1.14 — Схема устройства мембранного элемента, входящего в состав рулонного модуля [45]

При промышленном изготовлении рулонных модулей в зависимости от модели модуля на дренажную трубку может быть навито разное количество мембранных элементов. Уменьшение длины плоского мембранного элемента позволяет снизить гидравлическое сопротивление потоку фильтрата в плоском дренажном канале. Клей наносят непосредственно в процессе навивки мембранных элементов на дренажную трубку.



1 - подача исходного раствора; 2 - дренажная перфорированная трубка; 3 - антителескопическое устройство; 4 - отвод сконцентрированного исходного раствора; 5 - направление движения фильтрата в плоском дренажном канале; 6 - оболочка; 7 - сетка-турбулизатор; 8 - мембрана; 9 - плоский дренажный канал; 10 - отвод пермеата (фильтрата)

Рисунок 1.15 – Принципиальная схема устройства рулонного мембранного модуля [46]

К преимуществам рулонных мембранных модулей можно отнести малую металлоемкость; возможность механизации и автоматизации операций по сборке модулей. Среди недостатков аппаратов данного типа можно выделить необходимость замены всего модуля при повреждении хотя бы одной мембраны; высокое гидравлическое сопротивление межмембранных напорных каналов и дренажной сети фильтрата.

В большинстве мембранных аппаратов реализована тангенциальная схема течения исходного раствора, при которой исходный раствор под определенным давлением омывает поверхность мембран и удаляется из аппарата. При этом чистый растворитель проходит через мембрану и отводится в виде премеата. Такие мембранные аппараты, в большинстве своем, работают в проточном режиме, при котором исходная вода проходя через аппарат сбрасывается в канализацию или открытый водоем. При такой схеме функционирования в

качестве пермеата отбирается от 10% до 85% от исходной воды, таким образом коэффициент извлечения чистой воды из исходной составляет в среднем около 30-50% [2-4, 38, 39].

Ha предприятиях отраслей многих химической И смежных промышленности, коммунального хозяйства и объектах специального назначения стоит задача максимального извлечения ценных компонентов из сточных вод или максимальной степени замкнутости по воде, для реализации которых можно использовать мембранные методы. Задача такой очистки сводится к организации рациональной схемы проведения процесса концентрирования растворенных компонентов с достижением наибольшей степени концентрирования и извлечения концентрирования растворителя. Мембранные схемы также ΜΟΓΥΤ использованы в высокогорных районах, где имеется дефицит воды, в качестве ступени очистки сточных вод для их повторного использования в быту. На борту космических летательных аппаратов при организации водных процедур и водообеспечения реализации регенерационного также ставится задача наибольшего извлечения чистой воды из загрязненной. Во всех этих случаях целесообразно использовать мембранные методы, в частности обратный осмос.

1.4.5 Концентрационная поляризация в процессах мембранного разделения 1.4.5.1 Сущность концентрационной поляризации

Процесс мембранного разделения основан на избирательном задержании одного или группы растворенных веществ с разной степенью эффективности. При этом чистый растворитель преимущественно проходит через мембрану. Вследствие селективности мембраны к растворенным компонентам разделяемого раствора в процессе мембранного разделения у поверхности мембраны наблюдается повышение концентрации растворенных веществ по сравнению с ядром потока. Данное явление называется концентрационной поляризацией (КП), негативно сказывается на движущей силе процесса мембранного разделения и выражается отношением концентрации растворенных веществ у поверхности

мембраны к концентрации растворенных веществ в ядре потока разделяемого раствора:

$$K\Pi = \frac{C_3}{C_1},\tag{1.3}$$

где C_1 — концентрация растворенных веществ в ядре потока разделяемого раствора; C_3 — концентрация растворенных веществ в разделяемом растворе у поверхности мембраны.

В процессе разделения задерживаемый мембраной растворенный компонент поверхности мембраны В направлении, перемещается поперечном тангенциальному потоку разделяемого раствора, где концентрация растворенного постепенно возрастает вследствие отбора через мембрану компонента растворителя. Вследствие разности концентраций у поверхности мембраны и в ядре потока разделяемого раствора возникает обратный диффузионный поток от мембраны в объем раствора [40]. Спустя некоторое время устанавливается динамическое равновесие cпостоянной концентрацией растворенных веществ у поверхности мембраны. Образуется диффузионный пограничный слой, характеристики которого отличны OT характеристик основного потока.

Поток массы через мембрану оказывает существенное влияние на структуру пограничного слоя и интенсивность масссообменных процессов. Аналогичное воздействие оказывает поток массы, возникающий при конденсации вещества, отсосе газа через пористую стенку, химических превращениях на границе раздела фаз (стенке) [51] и т.д.

Влияние поперечного потока может быть учтено при помощи комплексов (фактора проницаемости [52], фактора вдува (отсоса) [53]), которые могут быть получены аналогично безразмерным критериям подобия из системы дифференциальных уравнений, описывающих перенос количества движения и массы. Вывод данных комплексов подробно рассмотрен в главе 2.

1.4.5.2 Подходы к определению концентрационной поляризации

Во многих работах, например в [40, 45, 50], степень проявления концентрационной поляризации определяется с использованием пленочной теории массоотдачи. Для условий осуществления обратноосмотической очистки авторы работ [40, 45, 50] делают ряд допущений, среди которых принимается, что перенос растворенных веществ от поверхности мембраны в ядро потока осуществляется молекулярной диффузией, а изменением концентраций и потоков вдоль поверхности мембраны можно пренебречь в случае, если расход разделяемого раствора в напорных каналах аппарата намного превышает производительность аппарата по фильтрату.

Для определения степени проявления концентрационной поляризации авторы работ [40, 45, 54, 55] предлагают использовать выражение

$$K\Pi = \frac{c_3}{c_1} = \frac{\exp\left[\frac{j}{\beta}\right)}{\varphi_{\text{u}} + (1 - \varphi_{\text{u}}) \cdot \exp\left[\frac{j}{\beta}\right)},$$
(1.4)

где j — поток массы пассивного (задерживаемого) компонента; β — коэффициент массоотдачи; ϕ_{u} — истинная селективность мембраны.

Основную задачу при оценке концентрационной поляризации, т.е. диффузионного сопротивления в напорном канале мембранного аппарата, коэффициента массоотдачи составляет определение β. Определение коэффициента массоотдачи для каналов мембранной аппаратуры осложняется каналах турбулизирующих сепарирующих Подбор наличием В сеток. критериальных уравнений для таких каналов представляет существенную трудность. Часто для каждого конкретного случая исследователям приходится определять коэффициенты и показатели степени в критериальных уравнениях экспериментальным путем.

В литературе предложен ряд различных критериальных уравнений для расчета коэффициента массоотдачи в каналах мембранной аппаратуры, имеющих сходную геометрию, что подтверждает недостаточную изученность процесса

массоотдачи. Критериальные уравнения ламинарного ДЛЯ случаев И турбулентного потоков в каналах прямоугольного, щелевого, кольцевого и круглого сечения приводятся в литературе, в частности в монографиях [56, 57]. многих аппаратов с плоскопараллельной укладкой типах разделяемый раствор движется в щелевом канале, в аппаратах с трубчатыми фильтрующими элементами – в круглом канале. В аппаратах с рулонными модулями канал практически кольцевой, но в нем расположена сепарирующая сетка. Часто подобная сетка располагается и в щелевых каналах аппаратов с плоскопараллельной укладкой мембран. Авторы работ [54, 58] предлагают вести расчеты по формулам для полых каналов, пренебрегая влиянием сеток на массообмен. При этом, как правило, расчетные значения коэффициентов массоотдачи получаются ниже фактических. В таблице 1.3 представлены критериальные уравнения, рекомендованные авторами работ [40, 54, 59, 60] для нахождения коэффициента массоотдачи в рулонном модуле.

В промышленных установках при использовании мембран с высокой удельной производительностью не удается обеспечить гидродинамические работы режимы аппаратуры, при которых влияние концентрационной поляризации (КП) было бы нейтрализовано, и даже в развитом турбулентном потоке концентрационная поляризация оказывает влияние на селективность и удельную производительность. Концентрационная поляризация не только вносит вклад в снижение селективности и удельной производительности мембран. Часто из-за КП происходит выпадение осадка на мембране, блокирующего мембранную поверхность и увеличивающего сопротивление массопереносу [54]. Далее рассмотрены способы борьбы с концентрационной поляризацией.

Таблица 1.3 – Критериальные уравнения, рекомендованные авторами работ [40, 54, 59, 60] для нахождения коэффициента массоотдачи в щелевом канале рулонного модуля

Описание	Критериальное уравнение	Примечания	
Для нахождения средних по длине канала значений критерия Sh для случая ламинарного потока разделяемого раствора в плоских щелевых и кольцевых каналах [51]	$Sh = 1.67 \cdot Re^{0.34} \cdot Sc^{0.33} \cdot (\frac{d_9}{l})^{0.30}$	Уравнение получено путем исследования методом лазерной интерферометрии полого щелевого канала.	
Полуэмпирическое уравнение для расчета критерия Sh при ламинарном режиме течения разделяемого потока [37].	$Sh = 1,85 \cdot (Re \cdot Sc \cdot \frac{d_{3}}{l})^{0,33}$		
Уравнения для аппаратов с плоскими и трубчатыми мембранными каналам [56].	$Sh = \frac{4Pe_D}{\ln\left(1 + 1,536 \cdot \xi^{\frac{1}{3}}\right)}$ $npu \ \xi \le 0,02$ $Sh = \frac{4Pe_D}{\ln\left[\xi + 6 - 5\exp\left(-\sqrt{\frac{\xi}{3}}\right)\right]}$ $npu \ \xi > 0,02$	Для входной области (короткого или умеренно длинного канала), где $\xi = 2Pe^2Gl/(3ub);$ и – скорость движения раствора вдоль канала; b – ширина канала;	
	$Sh = \frac{4Pe_D}{\ln(1 + a_2 \cdot Pe_D^2)}$ $npu \ \xi > 0,02$	Для длинного канала, где $a_2 = 1/3$ для плоских каналов; $a_2 = 1$ для трубчатых каналов.	
Для входной области (короткого или умеренно длинного канала) [57].	$Sh = a_1 (Re \cdot Sc \cdot d_3/l)^{1/3}$	$a_1 = 2,24$ для плоских каналов; $a_1 = 1,95$ для трубчатых каналов при $100 < \text{Re·Sc·d}_3/l < 5000$	
Примечание. Критерий Шервуда Sh в отечественной литературе часто называют диффузионным критерием Нуссельта Nu _D .			

1.4.5.3 Способы борьбы с концентрационной поляризацией

Способы снижения концентрационной поляризации направлены на интенсификацию массоотдачи от мембраны в ядро потока разделяемого раствора в напорном канале аппарата. Практическое применение получили три группы способов борьбы с КП [54]:

- перемешивание;
- изменение конфигурации межмембранных каналов;

- повышение температуры.

В промышленных условиях самый распространенный способ интенсификации – перемешивание – увеличение скорости потока в напорном канале. Это достигается путем секционирования аппаратов или применением циркуляционного насоса. Рекомендуется увеличивать скорость в напорном канале до величины, при которой гидравлическое сопротивление напорного канала не превышало бы 10-20% от рабочего давления в аппарате. Это условие, как правило, соблюдается только в условиях ламинарного потока [54].

Весьма эффективным является изменение конфигурации напорных каналов. Наиболее рационально использовать короткие напорные каналы, что позволяет снизить проявление КП. При этом изготовление аппарата с несколькими короткими напорными каналами влечет за собой усложнение конструкции и удорожание аппарата. Уменьшение высоты напорного канала приводит к заметному снижению КП, но этот способ сопряжен с ростом гидравлического сопротивления.

Часто в напорных каналах размещают вставки, интенсифицирующие перемешивание. Например, в аппаратах типа «фильтр - пресс» с плоскими мембранами и в рулонных мембранных модулях используются сепарирующие сетки, в трубчатых мембранных аппаратах для закручивания потока используют специальные лопасти. По данным [45, 54] эффективность применения подобного рода интенсифицирующих перемешивание устройств невелика, так как сетки и лопасти увеличивают гидравлическое сопротивление, в связи с чем приходится снижать интенсивность течения разделяемого раствора. Часто при сниженной интенсивности течения турбулизации в напорном канале не происходит.

Повышение температуры ради снижения КП применяется крайне редко. Повышение температуры снижает вязкость жидкости и уменьшает толщину пограничного слоя, что приводит к интенсификации массообмена. Но использование аппаратуры для подогрева жидкости лишает баромембранные процессы важных достоинств: проведения процесса разделения при температуре

окружающей среды, отсутствия энергозатрат на подогрев раствора, отсутствия теплообменника [54].

1.5 Состояние вопроса, задачи и объем работы

1.5.1 Состояние вопроса на момент постановки диссертационной работы Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы:

- 1.5.1.1 Для улучшения условий обитания экипажа на космической станции и осуществления длительных космических миссий требуется организация на борту водных процедур и стирки одежды с применением общепринятых моющих средств. В связи с этим возникает необходимость введения в состав систем водообеспечения системы регенерации санитарно-гигиенической воды (СГВ) с максимальной степенью возврата воды и минимальным энергопотреблением. Разработка такой системы не обеспечивается в полной мере существующим научно-техническим заделом и требует постановки специальных исследований.
- 1.5.1.2 Промышленный опыт и литературные данные показывают, что наиболее надежным перспективным процессом очистки низкомолекулярных органических веществ является обратный осмос. С развитием мембранной технологии в настоящее время появились высокопроизводительные, стойкие высокоселективные, химически мембраны. Сегодня мембранные процессы разделения являются одними из наименее энегозатратных и наиболее простых экономичных ПО сравнению широко используемыми промышленности массообменными процессами, сопровождающимися фазовыми переходами, сорбционными процессами и т.д. Принятые в промышленности и коммунальном хозяйстве степени отбора чистой воды при использовании обратного осмоса (около 30-50%) являются недостаточными и в ряде случаев, при применении определенных схем концентрирования, могут быть увеличены до 95% и более.

1.5.1.3 В АО «НИИхиммаш» проводятся с участием диссертанта научноисследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию системы регенерации СГВ, образующейся при использовании общепринятых моющих необходимость средств. Выявлена изучения отработки процесса обратноосмотической очистки СГВ, разработки метода расчета обратноосмотического аппарата, разработки и испытаний системы регенерации воды.

1.5.2 Задачи работы

- 1.5.2.1 Обоснование построения системы регенерации санитарногигиенической воды методом обратного осмоса с коэффициентом извлечения воды не менее 95%.
- 1.5.2.2 Разработка физической модели и метода расчета процесса обратного осмоса на основе аналогии между массообменом и теплообменом. Разработка метода и алгоритма расчета системы регенерации санитарно-гигиенической воды СРВ-СГ.
- 1.5.2.3 Экспериментальное исследование процесса обратноосмотической очистки СГВ.
 - 1.5.2.4 Испытания прототипа системы регенерации СГВ.
- 1.5.2.5 Обобщение результатов исследований и испытаний, разработка рекомендаций по проектированию систем регенерации воды для перспективных космических станций и промышленности.

1.5.3 Объем работы

- 1.5.3.1 Анализ особенностей процесса обратноосмотической очистки при использовании в системе регенерации СГВ:
- Разработка способа и схемы очистки с коэффициентом извлечения воды не менее 95%.
- Формирование физической модели процесса обратноосмотической очистки.

- Анализ процесса обратного осмоса с использованием аналогии между массообменом и теплообменом.
- Определение фактической движущей силы (перепада давления на мембране) в обратноосмотическом аппарате с учетом диффузионных процессов и взаимодействия разделяемого раствора с мембраной.
- 1.5.3.2 Экспериментальные исследования процесса обратноосмотической очистки:
 - Исследование процесса очистки на модельном растворе NaCl.
 - Исследование процесса очистки на растворах моющего средства.
- Обобщение результатов и разработка методики расчета обратноосмотического аппарата.
- 1.5.3.3 Исследование процесса обратноосмотической очистки натурной санитарно-гигиенической воды:
 - Очистка воды после мытья рук.
 - Очистка воды после водных процедур в душевой кабине.
 - Очистка воды после стирки одежды.
 - Анализ результатов и оценка ресурса обратноосмотических модулей.
 - 1.5.3.4 Использование системы регенерации санитарно-гигиенической воды:
 - Разработка системы регенерации СГВ.
 - Расчет экономического эффекта от регенерации СГВ.
- Разработка предложений по использованию обратноосмотических установок исследованного типа в промышленности и коммунальном хозяйстве.

1.6. Выводы по главе 1

На основе проведенного анализа к моменту постановки настоящей работы определено состояние исследований, разработки и реализации систем регенерации санитарно-гигиенической воды. Сформулированы задачи и необходимый объём работ, представляемых в диссертации.

Основной целью проведенных в диссертации работ является решение новой научно-технической задачи регенерации воды методом обратного осмоса с высоким коэффициентом извлечения.

2 Анализ особенностей процесса обратноосмотической очистки при использовании в системе регенерации санитарно-гигиенической воды

2.1 Разработка способа и схемы очистки с коэффициентом извлечения воды 97-98% и селективностью до 99%

При разработке способа и схемы оборотного водоснабжения для возможного применения на объекте специального назначения — космической станции, в соответствии с принятой концепцией организации круговорота воды и кислорода [12] наиболее рациональным считается организация замкнутого контура санитарно-гигиенического водообеспечения с регенерацией воды. При этом как сама система водообеспечения, так и система регенерации воды должны соответствовать определенным требованиям, в частности функционировать в условиях микрогравитации, обеспечивать высокую эффективность очистки и максимально возможную степень возврата воды в цикл водообеспечения, иметь минимальное энергопотребление, массу и габариты применяемого оборудования.

Из баланса по воде, представленного в таблице 1.1 следует, что поток санитарно-гигиенической воды (СГВ) наиболее значительный и составляет до 50% от общего потока воды на станции. Именно поэтому принципиально коэффициента СГВ. возможного извлечения достижение максимально Загрязненная санитарно-гигиеническая преимущественно вода содержит органические загрязнители И значительное количество бактериальной микрофлоры, от которых необходима очистка. При наличии системы регенерации воды с коэффициентом регенерации (извлечения) 97-98% на примере МКС увеличение расхода воды запасов по сравнению с текущими расходами будет незначительным, и компенсируется снижением количества доставляемых грузов для санитарно-гигиенического обеспечения или запасов.

Усредненный состав сточных вод, образующихся после водных процедур и стирки одежды, по данным [6-10] и требования к очищенной воде [15] приведены

в таблице 2.1. Из представленных в таблице данных видно, что требуется очистка воды в большей степени от органических веществ и бактериальной микрофлоры.

Таблица 2.1 – Усредненный состав сточных вод, образующихся после водных процедур и стирки одежды, и требования к очищенной воде

	Величина показателя		
Показатель	вода, подлежащая очистке	Нормативы	
		ГОСТ Р 50804-95	
Цвет	мутный, серый	-	
Запах при температуре 20 °C, баллы	1 – 3	3	
Водородный показатель рН, ед. рН	6 – 10	5 – 9	
Прозрачность, см	1 – 8	30	
Взвешенные вещества, мг/л	150 – 300	-	
Органические вещества в сумме по	900 – 5000	150	
бихроматной окисляемости, мг O_2 /л	900 – 3000	130	
Азот аммиака, мг/л	6 – 60	10	
Хлориды, мг/л	5 – 300	350	
Сульфаты, мг/л	3 – 40	-	
Общая жесткость, мг-экв/л	0,6 – 1,0	7,0	
Бактерии,	$10^4 - 10^9$	100 (1000)	
количество микробных тел в мл	10 - 10	100 (1000)	

Источник: опубликована автором в работе [16].

Не все методы регенерации СГВ могут быть практически реализованы в условиях микрогравитации. Наиболее перспективными и реализуемыми методами считаются фильтрование в комбинации с сорбционной очисткой, вакуумная дистилляция, мембранные методы очистки. Применяемые моющие средства во многом определяют выбор метода регенерации воды и определяют нагрузку на очистную аппаратуру [6, 16]. При использовании общепринятых бытовых моющих средств сточных водах помимо удаляемых загрязнений обнаруживается значительное количество низкомолекулярных органических веществ, являющихся составными компонентами моющих средств [61, 62]. Загрязненная СГВ представляет из себя смесь сложного состава, очистка которой, как правило, требует большого количества стадий.

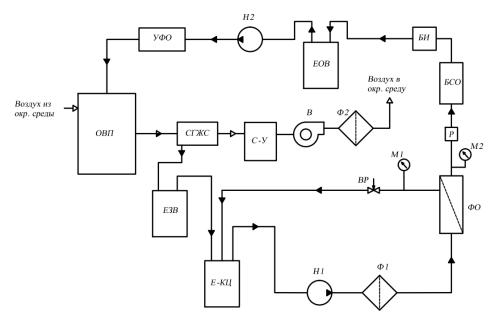
Одними из наиболее перспективных для очистки воды в настоящее время считаются мембранные технологии. Среди них наибольшее распространение получил метод обратного осмоса, который показал свою эффективность при очистке многокомпонентных смесей сложного состава [6, 33-35, 37, 42]. При обратном осмосе в напорном канале аппарата реализуется процесс массопереноса в единой жидкой фазе без разрыва потока при рабочем давлении, значительно превышающем давление в гермообъекте, а перенос растворителя через мембрану обусловлен перепадом давления на мембране — движущей силой процесса. Организация процесса таким образом дает возможность проведения регенерации воды в условиях микрогравитации с использованием общепромышленного оборудования. При этом сам процесс обратноосмотического разделения будет проходить аналогично процессу, проходящему в земных условиях.

При использовании обратного осмоса для регенерации СГВ, с помощью данного процесса из воды одновременно могут быть извлечены как удаляемые загрязнения, так и компоненты моющих средств. В настоящее время российской промышленностью производятся высокоселективные высокопроизводительные, химически стойкие композитные обратноосмотические мембраны из полиамида они на сегодняшний день используются преимущественно обессоливания воды. Такие мембраны потенциально могут быть использованы в системе регенерации санитарно-гигиенической воды (СРВ-СГ) для отделения низкомолекулярных органических и минеральных веществ. В данном случае низконапорный обратный осмос имеет преимущество с точки зрения энергозатрат безопасности. При использовании для регенерации воды полиамидных обратноосмотических борту мембран, на может быть предусмотрено использование общепринятых бытовых моющих средств.

Моющее средство для использования на борту должно обладать следующими характеристиками: хорошая моющая способность, антибактериальное действие, содержание наименьшего количества компонентов,

загрязняющих атмосферу и создающих при растворении высокое осмотическое давление.

Разработан процесс регенерации воды для обеспечения высокой степени извлечения воды из растворов сложного состава, содержащих вещества типа моющих средств, и устройство для его осуществления, на которые получены патенты РФ на изобретение [63] и полезную модель [64]. Схема разработанной системы представлена на рисунке 2.1.



ОВП – отсек водных процедур; СГЖС – сепаратор газожидкостной смеси; В – вентилятор; ЕЗВ – емкость загрязненной воды (V=22 л); ЕОВ – емкость очищенной воды (V=22 л); Е-КЦ –емкость постоянного объема для концентрирования загрязнений (V=22 л); Н1, Н2 – насосы; Ф1 – предфильтр; ФО – обратноосмотический аппарат (фильтр); ВР – вентиль регулировочный; М – манометр; БСО – блок сорбционно-каталитической очистки (доочистки); БИ – блок консервации воды ионами серебра; УФО – устройство обеззараживания ультрафиолетом

Рисунок 2.1 – Принципиальная схема очистки санитарно-гигиенической воды для пилотируемого космического аппарата

В схеме используются следующие процессы: центробежная сепарация жидкости от транспортного воздуха; фильтрование выходящего воздуха и

отсепарированной жидкости; обратноосмотическая очистка воды от загрязнений; сорбционно-каталитическая доочистка фильтрата; электрохимическая консервация ионным серебром; ультрафиолетовая стерилизация воды.

В разработанной системе организован циркуляционный контур, в который введена емкость постоянного объема для обеспечения требуемого объема контура циркуляции. Циркуляция концентрируемого раствора осуществляется тангенциально через рулонный обратноосмотический аппарат. Во время обратноосмотической очистки осуществляется отбор воды через мембрану, при этом подпитка циркуляционного контура проводится из емкости загрязненной воды. Обратноосмотический фильтрат проходит сорбционно-каталитическую доочистку, консервацию ионным серебром и отправляется на хранение. Перед выдачей на потребление регенерированная СГВ проходит обеззараживание ультрафиолетом и нагревается до заданной температуры.

По мере концентрирования загрязнений в циркуляционном контуре повышается осмотическое давление разделяемого раствора, что ведет к снижению движущей силы процесса. Концентрирование загрязнений проводится до максимально допустимой концентрации в контуре по моющему средству. Таким образом, при рабочем давлении в обратноосмотическом аппарате 0,8 МПа, концентрация раствора по моющему средству возрастает от 2-8 г/л в начале концентрирования до 250 г/л в конце цикла концентрирования. Коэффициент извлечения чистой воды рассчитывается по соотношению (2.1) и составляет 0,97...0,98. Для работы системы в условиях микрогравитации в ее состав введены эластичные емкости, имеющие переменный объем.

$$K_{\text{извл}} = \frac{G_{\text{ов}}}{G_{\text{зв}}} = 1 - \frac{C_{\text{нач}}}{C_{\text{кон}}},$$
(2.1)

где $G_{\text{ов}}$ и G_{3B} – количество очищенной и поступившей на очистку воды соответственно; $C_{\text{нач}}$ и $C_{\text{кон}}$ – концентрация задерживаемых растворенных веществ в циркуляционном контуре в начале и конце процесса концентрирования соответственно.

2.2 Физическая модель процесса обратноосмотической очистки

Поток воды через обратноосмотическую мембрану описывается феноменологическим уравнением (2.2) [6, 40, 45, 47].

$$j = K_1 \cdot (\Delta P - \Delta \pi) = K_1 \cdot \Delta P_{\text{MeM6}}, \tag{2.2}$$

 $\kappa\Gamma/(M^2 \cdot \Psi)$; мембраны воле. удельная производительность ПО $\kappa \Gamma/(M^2 \cdot \Psi \cdot aTM)$; K_I - коэффициент проницаемости мембраны воде, ПО $\Delta P_{\text{мемб}} = (\Delta P - \Delta \pi)$ - перепад давления на мембране, атм.; ΔP - разность давлений в напорном канале аппарата и канале фильтрата, атм.; $\Delta \pi$ - разность значений осмотического давления в напорном канале и канале фильтрата, Коэффициент пропорциональности K_I аналогичен используемому в уравнении Хагена – Пуазейля, зависит от свойств мембраны и обратно пропорционален вязкости жидкости.

В уравнением (2.2)движущей соответствии \mathbf{c} силой процесса обратноосмотического разделения является перепад давления на мембране. Данный перепад непосредственно обеспечивает транспорт растворителя (воды) через мембрану. Повышение концентрации растворенных веществ в разделяемом растворе увеличивает осмотическое давление раствора, что вызывает снижение движущей силы процесса обратного осмоса и, как следствие, снижение потока фильтрата. С потоком растворителя к поверхности мембраны переносятся растворенные вещества. За счет селективности мембраны растворенные вещества (рисунок 2.2, задерживаются ee поверхности рассматривается y двухкомпонентная смесь). Наблюдается повышение концентрации растворенных мембраны поверхности ПО веществ сравнению cядром потока концентрационная поляризация. За счет разности концентраций в ядре потока и у поверхности мембраны в напорном канале наблюдается обратный молекулярноконвективный поток растворенных от поверхности мембраны.

Компоненты раствора могут связываться с мембраной (рисунок 2.2 б), создавая дополнительное сопротивление на ее поверхности и снижая движущую силу обратноосмотического разделения.

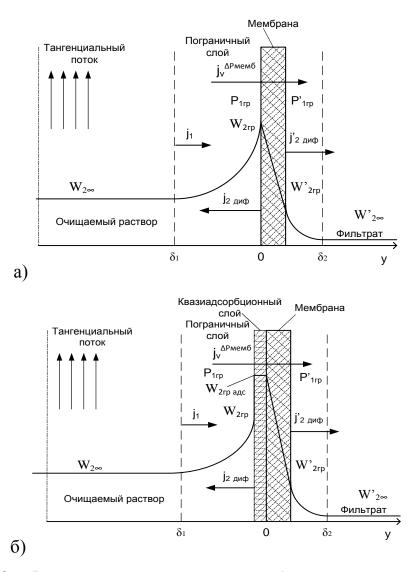


Рисунок 2.2 – Физическая модель процесса обратноосмотической очистки:

растворенные вещества связываются поверхностью мембраны; не cб) растворенные вещества связываются cповерхностью мембраны; j_1 - поперечный поток отбираемого через мембрану компонента в напорном канале аппарата; $j_v^{\Delta P_{MEM}\delta}=j_1$ - поток отбираемого через мембрану компонента за счет перепада давления через мембрану $\varDelta P_{{\scriptscriptstyle M\!e\!M\!o}};~j_{2\,\partial u\phi}$ и ${j'}_{2\,\partial u\phi}$ растворенных веществ от поверхности мембраны в напорном канале аппарата и полости фильтрата соответственно; $W_{2\infty}$, $W'_{2\infty}$ - концентрация растворенных

веществ в ядре потока разделяемого раствора и в фильтрате соответственно; W_{2cp} , W'_{2cp} - концентрация растворенных веществ у поверхности мембраны в напорном канале и полости фильтрата соответственно; $W_{2cp,\ adc}$ - концентрация связанных с поверхностью мембраны растворенных веществ на границе раздела фаз «раствормембрана»; $P_{1cp} = P_{pafoq} - \pi_{cp}$, - давление на границе раздела фаз «раствормембрана» в напорном канале, равное разности рабочего давления в аппарате и осмотического давления у поверхности мембраны; $P'_{1cp} = P_{\phi} - \pi'_{cp}$; - давление на границе раздела фаз «жидкость-мембрана» в полости фильтрата, равное разности гидростатического и осмотического давления у поверхности мембраны; штриховая линия условно показывает диффузионный пограничный слой; I - вода (компонент, проходящий через мембрану); 2 - растворенное вещество (компонент, не проходящий через мембрану)

Значение коэффициента проницаемости мембраны K_I определяется по литературным данным или находится экспериментально. Так как селективность обратноосмотической мембраны по моющему средству приближается к 100% (но не достигает этого значения), будет рассматриваться массоперенос только в полости разделяемого раствора. В выражении (2.2) неизвестным для расчета является значение осмотического давления π концентрируемого раствора на границе раздела фаз «раствор-мембрана», определяемое концентрацией растворенных веществ W_{2ep} .

По принятой физической модели при установившемся режиме работы аппарата и постоянстве параметров раствора на входе в аппарат имеют место установившиеся значения следующих параметров:

- потока растворителя (воды) через мембрану;
- перепада давления на мембране;
- концентрации растворенных веществ и осмотического давления у поверхности мембраны;
 - диффузионного отвода растворенных веществ от поверхности мембраны.

В ходе процесса обратноосмотической очистки с потоком отбираемого через мембрану растворителя (воды) к поверхности мембраны переносятся растворенные вещества в количестве $j_v^{\Delta P_{\text{Mem}6}} \times W_{2\infty}$. При установившемся процессе обратноосмотического разделения такое же количество растворенных веществ отводится от поверхности мембраны за счет молекулярной и конвективной диффузии:

$$j_{2\,\text{диф}} = j_v^{\Delta P\,\text{мемб}} \times W_{2\infty} = \rho \beta \left(W_{2\text{гр}} - W_{2\infty} \right)$$
 (2.3)

где $j_{2 \partial u \phi}$ - поперечный диффузионный поток растворенных веществ в напорном канале аппарата, кг/(м²·ч); $W_{2\infty}$, $W_{2\varepsilon p}$ - массовая доля растворенного вещества в потоке и у границы мембраны, соответственно, (кг/кг); ρ - плотность разделяемого раствора, кг/м³; β - коэффициент массоотдачи, м/с.

Связь осмотического давления π с концентрацией может быть найдена с использованием модифицированного уравнения Вант-Гоффа [65, 66]:

$$\pi = RT \sum_{k=1}^{n} \left(i \cdot \frac{\rho_k}{M_k} \cdot W_k \right), \tag{2.4}$$

где π - осмотическое давление разделяемого раствора; $i=1+\alpha'$ - коэффициент Вант-Гоффа; α' - степень диссоциации растворенного вещества; R - универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура раствора; W - массовая доля растворенного вещества; ρ - плотность; M - молекулярная масса.

С увеличением потока растворителя (воды) через мембрану (j) возрастает концентрация задержанных растворенных веществ у ее поверхности W_{2rp} , осмотическое давление π_{rp} и, как следствие, снижается перепад давления на мембране $P_{\text{мемб}}$. При стабилизации входных параметров устанавливается динамическое равновесие.

При анализе используется принцип суперпозиции двух процессов: селективного переноса через обратноосмотическую мембрану и диффузии в напорном канале.

Интенсивность отвода растворенных веществ от поверхности мембраны (j_2) зависит от гидродинамики течения жидкости в напорном канале, сопровождаемого отсосом части потока через мембрану, и определяется молекулярной и конвективной диффузией:

$$j_{2 \text{ диф}} = j_{2 \text{ диф. молек}} + j_{2 \text{ диф. конв}},$$
 (2.5)

где $j_{2\,\text{диф. молек}} = j_{2\,\text{диф}} \times W_{2\,\text{гр}}.$

По закону Фика (1 – вода; 2 – растворенное вещество) для одномерного течения относительно неподвижных координат можно записать следующие выражения

$$j_1 - W_1(j_1 + j_2) = -\rho D \frac{dW_1}{dy}$$
 (2.6 a)

$$j_2 - W_2(j_1 + j_2) = -\rho D \frac{dW_2}{dy}$$
 (2.6 б)

При селективности мембраны, приближающейся к 100%, суммарный диффузионный поток пассивного компонента равен нулю ($j_2 = 0$), тогда

$$W_2 \cdot j_1 = \rho D \frac{dW_2}{dy}$$

$$W_2 \cdot j_1 = -\rho D \frac{dW_1}{dy}$$
(2.6 в)

У поверхности массопереноса поток задерживаемых веществ равен нулю $(j_{2zp}=0)$, тогда

$$j_{1\text{rp}} - W_{1\text{rp}} \cdot j_{1\text{rp}} = -\rho D \left(\frac{dW_1}{dy}\right)_{\text{rp}}$$
 (2.7 a)

Относительно средней массовой скорости основного потока имеем

$$j_{1\text{rp}} = -\rho D \left(\frac{dW_1}{dy}\right)_{\text{rp}} \tag{2.76}$$

$$j_{2rp} = -\rho D \left(\frac{dW_2}{dv}\right)_{rp} \tag{2.7 b}$$

При изменении параметров только по оси «у» (одномерная задача) результаты интегрирования соотношения (2.7 а) по толщине пограничного слоя δ можно представить в виде:

$$j_{1\text{rp}} = -\frac{\rho D}{\delta} \cdot \ln \left(\frac{W_{2\text{rp}}}{W_{2\infty}} \right) = \frac{\rho D}{\delta} \cdot \ln \left(\frac{W_{2\infty}}{W_{2\text{rp}}} \right)$$
(2.8)

Так как поток массы за счет молекулярной диффузии составляет $j_{1ep} \times w_{2ep}$, то после преобразований получим:

$$j_{1\text{rp}} \cdot \frac{W_{2\text{rp}}}{W_{2\text{rp}} - W_{2\infty}} = \frac{\rho D}{\delta} \cdot \frac{\ln(1+B)}{B},\tag{2.9}$$

где
$$B=rac{W_{2\infty}-W_{2\mathrm{rp}}}{W_{2\mathrm{rp}}}; rac{D}{\delta}=eta_0; eta
ho W_{2\mathrm{rp}}=eta_0
ho \cdot rac{\ln{(1+B)}}{B}.$$

Умножив на $d_{_{3KB}}/D$, получим

$$Nu_D^* = Nu_D W_{2rp} = Nu_{D0} \cdot \frac{ln(1+B)}{B}$$
 (2.10)

где Nu_D^* (Sh^*) — диффузионное число Нуссельта (число Шервуда) для молекулярного потока массы; Nu_D (Sh) — диффузионное число Нуссельта (число Шервуда) для общего потока массы; Nu_{D0} (Sh_0) — диффузионное число Нуссельта (число Шервуда) для потока массы малой интенсивности.

В общем виде, переходя от одномерной модели к модели пограничного слоя, получим с учетом соотношений, приведенных в разделе 2.4:

$$Nu_D^* = Nu_D W_{2rp} = Nu_{D0} \cdot f_1(B) \cdot f_2\left(\frac{\rho_{\infty}}{\rho_{rp}}\right) \cdot f_3\left(\frac{Pr_D}{Pr}\right); \tag{2.11}$$

где Pr_D – диффузионное число Прандтля (в зарубежной литературе число Шмидта).

Влияние поперечного потока учитывается при помощи комплексов (фактора проницаемости – В [52], фактора вдува (отсоса) – b [53]), которые могут быть получены аналогично безразмерным критериям подобия из системы дифференциальных уравнений, описывающих перенос количества движения и массы в двумерном установившемся ламинарном пограничном слое двухкомпонентной смеси и граничных условий [56]:

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0; \tag{2.12}$$

- уравнение количества движения

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g; \tag{2.13}$$

- уравнение диффузии

$$\rho u \frac{\partial W_1}{\partial x} + \rho v \frac{\partial W_1}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (\rho D \frac{\partial W_1}{\partial y}); \tag{2.14}$$

- граничные условия

- у поверхности мембраны:

$$j_{1\text{rp}} = \beta \rho \left(W_{1\text{rp}} - W_{1\infty} \right) = -\rho_{\text{rp}} D \left(\frac{\partial W_1}{\partial \nu} \right)_{\text{rp}} + \rho_{\text{rp}} W_{1\text{rp}} V_{\text{rp}}; \tag{2.15 a}$$

$$u = 0; V = V_{\rm rp}; W_1 = W_{\rm 1rp}$$
 (2.15 б)

- на границе диффузионного пограничного слоя:

$$u = u_{\infty}; W_1 = W_{1\infty}$$
 (2.15 B)

Приводя уравнения (2.12) и (2.13) к безразмерному виду и проводя необходимые преобразования, можно получить числа Рейнольдса продольного и поперечного потока:

$$Re = \frac{ul}{v}; \qquad (2.16) \qquad Re_V = \frac{Vl}{v} \qquad (2.17)$$

Приводя уравнение (2.14) к безразмерному виду и объединяя его в комплекс с числами Re и Re_v получим диффузионное число Прандтля — критерий подобия полей концентраций и скоростей:

$$Pr_D = \frac{\nu}{D}. (2.18)$$

Фактор проницаемости получается путем объединения в комплекс выражения $Nu_D \frac{z_1 - W_{1\text{гр}}}{z_1}$, чисел Re, Re_v и Pr_D и умножения на отношение $\frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{cm}}}$ [52]:

$$B = \frac{Re_{v}Pr_{D}}{Nu_{D}\frac{z_{1} - W_{1rp}}{z_{1}}} = \frac{\rho_{rp}v_{rp}}{\rho_{\infty}u_{\infty}St_{D}\frac{z_{1} - W_{1rp}}{z_{1}}},$$
(2.19)

где $Nu_D \frac{z_1 - W_{1\text{гр}}}{z_1}$ — безразмерный коэффициент массоотдачи, отнесенный к диффузионному потоку массы; $St_D \frac{z_1 - W_{1\text{гр}}}{z_1}$ — критерий конвективного массопереноса (число Стентона), отнесенный к диффузионной составляющей потока массы.

Для процесса с малым потоком массы $(j \to 0; W_{2p} \to I)$, введя числа Nu_{D0} и St_{D0} , можно получить диффузионный фактор вдува (отсоса) [51, 53]:

$$b = \frac{Re_{\nu}Pr_{D}}{Nu_{D_{0}}} = \frac{\rho_{rp}\nu_{rp}}{\rho_{\infty}u_{\infty}St_{D_{0}}}$$
(2.20)

2.3 Анализ процесса обратного осмоса

При высокой производительности современных обратноосмотических мембран рабочее давление в аппаратах низконапорного обратного осмоса не превышает 1-1,5 МПа. В процессе обратноосмотической очистки конвективный поток отбираемого через мембрану компонента обусловлен проницаемостью (удельной производительностью) мембраны и перепадом давления через мембрану. Как уже говорилось ранее, при любом обратноосмотическом разделении на высокопроизводительных мембранах в той или иной степени возникает явление концентрационной поляризации, которое сказывается на селективности и удельной производительности мембран.

В современных аппаратах для процесса разделения смесей, компоненты которых не взаимодействуют с материалом мембраны, например водных растворов неорганических солей, можно наблюдать ряд особенностей низконапорного обратного осмоса:

- растворенные вещества не связываются с мембраной;
- осмотическое давление разделяемой смеси быстро увеличивается с ростом концентрации, что влечет за собой быстрое снижение производительности;
- величина концентрационной поляризации незначительна и имеет наибольшую величину при низких концентрациях растворенных веществ.

Последняя особенность связана с тем, что растворенные вещества, перенесенные к поверхности мембраны с потоком отбираемого через мембрану компонента, в связи с небольшим потоком отбираемого компонента успевают перейти в ядро потока за счет диффузии, а динамическое концентрационное равновесие при малом градиенте концентраций в поперечном направлении напорного канала

обусловлено природой растворенных веществ и малой движущей силой процесса обратноосмотической очистки. По этой причине в современных аппаратах с низконапорными мембранами при разделении растворов неорганических солей концентрационная поляризация заметно не развивается, а процесс массообмена определяется только поперечным потоком, вызываемым перепадом давления, что и будет показано в главе 3.

Если в разделяемом растворе содержатся органические вещества, они могут взаимодействовать с материалом мембраны и оказывать влияние на процесс обратноосмотического разделения. Связывание органических веществ с мембраной сказывается на ее селективности и производительности [37], так как на поверхности мембраны образуется дополнительное сопротивление потоку отбираемого через мембрану компонента, и его нужно учитывать при проведении расчетов обратноосмотической аппаратуры.

При разделении растворов органических веществ методом низконапорного обратного осмоса может наблюдаться более значительное проявление концентрационной поляризации. Степень проявления концентрационной поляризации будет зависеть от природы растворенных органических веществ.

2.4 Применение аналогии между массообменом и теплообменом к анализу процесса обратного осмоса

Для теоретической оценки проявления концентрационной поляризации необходимо определить коэффициент массоотдачи β растворенных веществ от поверхности мембраны, для определения которого часто не хватает данных. Значительное влияние на массоотдачу оказывает поперечный поток массы. Влияние данного потока (вдува и отсоса) на коэффициент массоотдачи β при различных условиях проведения процесса теплообмена и массообмена исследовалось рядом авторов [51, 67-69]. Для определения коэффициента массоотдачи в каналах мембранной аппаратуры может быть использована

аналогия между массообменом и теплообменом [47, 51, 67], при которой для расчетов массообмена могут применяться критериальные уравнения для теплообмена, которых имеется значительно больше для каналов различной геометрии. Необходимо отметить, что аналогия между массообменом и теплообменом в настоящее время уже применяется для расчета массообменных процессов, сопровождающихся фазовыми переходами [70], но не получила широкого распространения для расчета аппаратов обратного осмоса.

Для баромембранного процесса, где разделение происходит посредством селективной проницаемости мембраны без фазовых превращений справедливо выражение

$$Pr_D \gg Pr \neq 1$$

При данных условиях для соблюдения аналогии необходимо ввести поправку, учитывающую число Льюиса.

Таким образом, уравнение подобия для массоотдачи с учетом граничных условий (2.15 a) записывается в следующем виде [51]:

$$Nu_D^* = Nu_D \cdot W_{2 \text{ rp}} = \frac{\beta \cdot d_9}{D} \cdot W_{2 \text{ rp}} = Nu_{D0} \cdot f_1(B) \cdot f_2\left(\frac{\rho_{\infty}}{\rho_{\text{rp}}}\right) \cdot f_3(Le)$$
 (2.21)

Здесь: $Nu_D = \frac{\beta \cdot d_9}{D}$ — диффузионное число Нуссельта (в зарубежной литературе число Шервуда Sh); Nu_{D0} — диффузионное число Нуссельта при малом потоке массы ($j \rightarrow 0$, $B \rightarrow 1$); W_{2rp} — массовая доля растворенных веществ (моющего средства) у поверхности мембраны; $Le=Pr_D/Pr$ — число Льюиса (критерий подобия полей концентраций и температур); Pr — число Прандтля; Pr_D — диффузионное число Прандтля (в зарубежной литературе Sc); d_9 — эквивалентный диаметр канала; D — коэффициент диффузии растворенного вещества в очищаемой жидкости; ρ_∞ , ρ_{rp} — плотность раствора в ядре потока напорного канала и на границе раздела фаз «раствор-мембрана».

Путем использования диффузионного числа Нуссельта, построенного по молекулярной составляющей потока массы $Nu_D^* = \frac{\beta \cdot d_3}{D} \cdot W_{2 \text{ гр}}$ [51, 67], и числа

Сполдинга (фактора массоотдачи), представленного соотношением (2.22), учитывается разница граничных условий массообмена и теплообмена.

$$B = \frac{W_{1rp} - W_{1\infty}}{1 - W_{1rp}} \tag{2.22}$$

Здесь $W_{1\infty}$; $W_{1\text{гр}}$ — массовая доля отбираемого через мембрану компонента (в нашем случае воды) в ядре потока и у границы мембраны, соответственно. В данном случае принимаем селективность мембраны, приближающуюся к 100%.

Переход от соотношения (2.19) к соотношению (2.22) осуществлен путем замены числителя в соотношении (2.19) на следующее выражение

$$j = \rho_{\rm rp} V_{\rm rp} = \beta \rho \frac{W_{\rm 1rp} - W_{\rm 1\infty}}{z_{\rm 1}}$$

Соотношения (2.23) и (2.24) описывают функции f_1 и f_2 в выражении (2.21) [68, 69].

$$f_1(B) = (\frac{\sqrt{1+B}-1}{0.5B})^2;$$
 (2.23) $f_2\left(\frac{\rho_\infty}{\rho_{\rm rp}}\right) = (\frac{2}{1+(\frac{\rho_\infty}{\rho_{\rm rp}})^{0.5}})^2$

В случае очистки СГВ от моющего средства можно в первом приближении принять, что $f_1(B) \to 1$ и $f_2\!\left(\!\frac{\rho_\infty}{\rho_{rp}}\!\right) \to 1$, т.е. что справедлива аналогия Колборна:

$$Nu_D^* = Nu_{D0} \cdot W_{2 \text{ rp}} = Nu_0 \cdot (\frac{Pr_D}{Pr})^n \cdot W_{2 \text{ rp}}$$

 Nu_{Do} определяется из критериальных уравнений для теплообмена с заменой теплового числа Прандтля (Pr) на диффузионное (Pr_D).

При B>-0.8, а $0.4 \leq \frac{\rho_{\infty}}{\rho_{\rm rp}} \leq 2$ при расчетах можно использовать относительные мольные (объемные) концентрации [51]. В этом случае $f_2\left(\frac{\rho_{\infty}}{\rho_{\rm rp}}\right) \approx 1$, а

$$Nu_{D_X} \cdot X_{2 \text{ rp}} = \frac{\beta_X \cdot d_3}{D} \cdot X_{2 \text{ rp}} = Nu_{D0} \cdot f_1(B_X) \cdot f_3(Le)$$

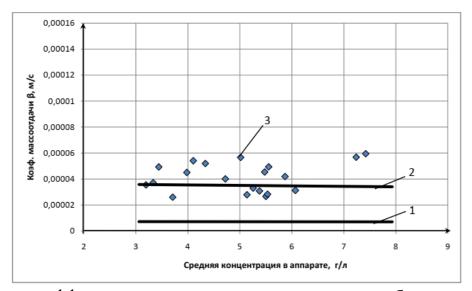
Тогда $\beta_X \cdot X_{2 \circ p} = \beta \cdot W_{2 \circ p}$.

В случае малых диффузионных потоков массы, обусловленных малыми градиентами концентраций, вместо функции от фактора проницаемости $f_I(B)$ часто удобно использовать функцию от фактора вдува (отсоса) $f_I(b)$, которая при $\frac{\rho_\infty}{\rho_{\rm TP}}=1$ имеет вид

$$f_1(b) = (1 - 0.25 \cdot b)^2$$
 (2.25)

где $b=\frac{\rho_{\rm rp} v_{\rm rp}}{\rho_\infty u_\infty S t_{D_0}}$ — фактор вдува (отсоса); ${\rm v_{rp}}$ — скорость поперечного потока у поверхности мембраны; ${\rm u_\infty}$ — тангенциальная скорость в потоке напорного канала; $St_{D_0}=\frac{Nu_{D_0}}{Re\cdot Pr_D}$ — диффузионное число Стентона для малого потока массы.

Сравнение значений коэффициента массоотдачи β , полученных с использованием экспериментальных данных, с результатами расчетов для обратноосмотического разделения модельных растворов NaCl, приведенное в главе 3 и проиллюстрированное на рисунке 2.2, показывает, что при использовании аналогии между массообменом и теплообменом необходимо введение поправки $f_3(Le)$, при использовании которой можно достаточно хорошо описать опытные данные и теоретически определить коэффициент массоотдачи.



1 - значения коэффициента массоотдачи, рассчитанные без поправки $f_3(Le)$; 2 - значения коэффициента массоотдачи, рассчитанные с учетом поправки $f_3(Le)$; 3 - значения коэффициента массоотдачи, полученные с использованием экспериментальных данных

Рисунок 2.2 — Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений коэффициента массоотдачи для обратноосмотического разделения модельных растворов NaCl

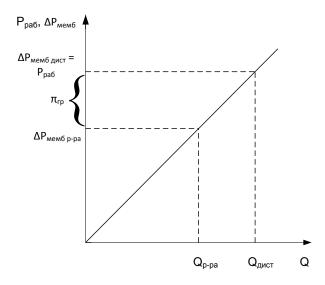
2.5 Определение перепада давления на мембране в обратноосмотическом аппарате

Производительность аппарата при проведении процесса обратного осмоса определяется выражением (2.2). Движущей силой процесса является перепад давления через мембрану. Перепад давления определяет интенсивность перехода растворителя через мембрану и представляет собой рабочее давление в аппарате за вычетом осмотического давления разделяемого раствора у поверхности мембраны.

Перепад давления через мембрану может быть определен по графику зависимости производительности мембраны при работе на чистой (дистиллированной) воде от рабочего давления в аппарате ($\pi \to 0$), пример которого представлен на рисунке 2.3. На оси «абсцисс» откладывается значение производительности аппарата на рабочем растворе, а по прямой определяется соответствующий данной производительности перепад давления на мембране (на оси «ординат»).

Для определения осмотического давления у поверхности мембраны необходимо знать производительность мембранного аппарата на чистой воде и на рабочем растворе при одном и том же рабочем давлении в аппарате. На графике откладывается значение производительности аппарата на рабочем растворе и на чистой воде, а по прямой определяются соответствующие перепады давления на мембране. Осмотическое давление у поверхности мембраны определяется как разность значений рабочего давления в аппарате и перепада давления через мембрану при работе на рабочем растворе.

Тангенс угла наклона прямой, представленной на рисунке 2.3, к оси «абсцисс» может быть также определен из паспортных характеристик мембраны.

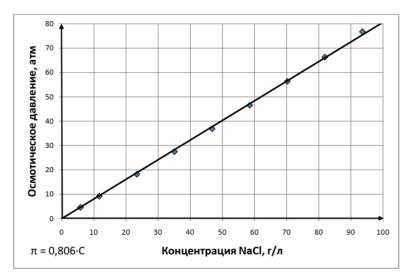


Q — производительность; P_{pab} — рабочее давление при очистке (рабочего раствора и прокачке дистиллированной воды); $\Delta P_{\text{мемб}}$ дист, $\Delta P_{\text{мемб}}$ $_{p-pa}$ — перепад давления через мембрану при работе на чистой (дистиллированной) воде и очистке рабочего раствора, соответственно; π_{rp} — среднее значение осмотического давления разделяемого раствора у поверхности мембраны

Рисунок 2.3 – Иллюстрация метода определения перепада давления через мембрану и осмотического давления разделяемого раствора у поверхности мембраны

2.6 Оценка осмотического давления разделяемых жидкостей

Осмотическое давление разделяемого раствора может быть найдено по справочным данным. Так для растворов хлористого натрия в литературе [45, 50] приводятся значения осмотического давления водных растворов данной соли в зависимости от концентрации NaCl. Зависимость осмотического давления от концентрации можно аппроксимировать прямой, которая представлена на рисунке 2.4.



• — справочные данные; — — аппроксимация справочных данных линейной зависимостью $\pi = 0.806$ С, где π — осмотическое давление (атм.); С — концентрация NaCl (г/л)

Рисунок 2.4 – Зависимость осмотического давления водного раствора NaCl от концентрации соли

Моющие средства общего применения содержат в своем составе значительное количество низкомолекулярных органических и минеральных веществ [6]. Растворы низкомолекулярных органических веществ не обладают высоким осмотическим давлением, при этом значительный вклад в осмотическое давление раствора моющего средства в целом вносят минеральные соли, а также основные органические компоненты. Так как данные по осмотическому давлению растворов моющих средств в литературе отсутствуют, оценку осмотического

давления раствора моющего средства можно проводить по уравнению Вант-Гофа по правилу аддитивности, учитывая осмотические давления минеральных и органических компонентов.

Общепринятые жидкие моющие средства для рук, тела и головы имеют сходный состав. Типовой состав общепринятых жидких антибактериальных моющих средств представлен в таблице 2.2. При проведении экспериментов использовалось моющее средство «Адажио». Теоретическая зависимость осмотического давления водного раствора исследуемого моющего средства от его концентрации в растворе приведена на рисунке 2.5.

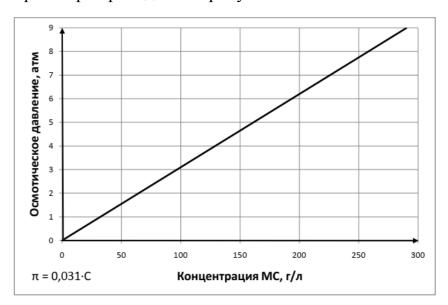


Рисунок 2.5 — Теоретическая зависимость осмотического давления раствора исследуемого моющего средства «Адажио» от его концентрации

Таблица 2.2 – Типовой состав общепринятых жидких антибактериальных моющих средств

Компонент	Химическая формула	Молекулярная масса, г/моль	Степень диссоциа- ции	Содержание компонента в моющем средстве, % масс.
Лауретсульфат натрия	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₂ (OCH ₂ CH ₂) _n OSO ₃ Na	420	1	7,0
Хлорид натрия	NaCl	58,5	1	0,8
Диэтаноламид жирных кислот кокосового масла	C ₁₁ H ₂₃ CO-N(CH ₂ CH ₂ OH) ₂	287	0	4,0
Бетаин	$C_5H_{11}NO_2$	117	0	2,0
Глицерин	$C_3H_5(OH)_3$	92	0	1,5
Цитрат натрия	$Na_3C_6H_5O_7$	258	1	2,5
Лимонная кислота	$C_6H_8O_7$	192	0,5	0,3
Бронопол	C ₃ H ₆ BrNO ₄	200	0	менее 0,01
Триклозан	$C_{12}H_7Cl_3O_2$	289,5	74,1·10 ⁻⁵	0,2
Вода	H ₂ O	18	-	≈ 80
Отдушки и красители	-	-	-	≈ 1,7

2.7 Оценка ресурсных характеристик обратноосмотических модулей

При работе обратноосмотического модуля со временем наблюдается снижение его производительности вследствие воздействия эксплуатационных факторов. При достижении предельно малой производительности обратноосмотический модуль подлежит замене, так как в условиях работы на космической станции проведение химической мойки считается нерациональным. Ресурсные характеристики модуля определяются составом очищаемой жидкости, зная который можно спрогнозировать ресурс мембраны.

Известно, что разделение при обратном осмосе, как правило, происходит по закону «фильтрования с образованием осадка» [40], который описывается следующим соотношением [71]:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_0} + K \cdot V, \tag{2.26}$$

где K — константа фильтрования, c/m^2 ; q_0 , q — удельная скорость фильтрования в начальный момент и после получения фильтрата в количестве V, $m^3/(m^2 \cdot c)$; V — объем фильтрата, полученного с 1 m^2 поверхности фильтрования, m^3/m^2 .

Для практических оценок ресурса обратноосмотического модуля для заданного аппарата выражение (2.26) удобнее представить в следующем виде:

$$\frac{1}{q} - \frac{1}{q_0} = K \cdot V,\tag{2.27}$$

где K — константа фильтрования, v/m^2 ; $v/m^$

Оценить остаточный ресурс аппарата при регенерации жидкости заданной загрязненности можно, проведя эксперимент по мембранному разделению регенерируемой жидкости И определив интенсивность снижения K. выражающейся «фильтрования» \mathbf{C} производительности, константой использованием константы «фильтрования» определяется объем жидкости, при регенерации которого производительность аппарата достигает минимально допустимого значения.

2.8 Выводы по главе 2

2.8.1 Загрязненная санитарно-гигиеническая вода преимущественно содержит органические загрязнители и значительное количество бактериальной микрофлоры, от которых необходима очистка. Наиболее перспективным способом очистки является обратный осмос. Необходимы экспериментальные исследования для проверки данного способа очистки с высоким коэффициентом извлечения воды.

- 2.8.2 Организация процесса обратноосмотической регенерации воды в условиях микрогравитации может быть реализована с использованием общепромышленного оборудования. При этом сам процесс обратноосмотического разделения будет проходить аналогично процессу, проходящему в земных условиях.
- 2.8.3 Разработаны способ и схема очистки санитарно-гигиенической воды с коэффициентом извлечения воды 97-98% и селективностью до 99%, которые нуждаются в апробации и экспериментальной проверке.
- 2.8.4 Разработана физическая модель процесса обратноосмотической очистки, в соответствии с которой переносимые в напорном канале с потоком отбираемого через мембрану растворителя растворенные вещества за счет селективности мембраны задерживаются у ее поверхности и отводятся в ядро потока молекулярно-конвективной диффузией.
- 2.8.5 Предложено осуществлять оценку диффузионного сопротивления у поверхности обратноосмотической мембраны с применением аналогии между массообменом и теплообменом. Выявлена необходимость экспериментального подтверждения применимости аналогии для расчета массообмена в аппаратуре обратного осмоса.
- 2.8.6 Предложена методика расчетно-экспериментального определения перепада давления на мембране в обратноосмотическом аппарате движущей силы процесса обратноосмотической очистки. Данная методика также позволяет определить осмотическое давление раствора у поверхности мембраны как разность между рабочим давлением в аппарате и фактическим давлением на мембране.
- 2.8.7 Предложено проводить оценку ресурса обратноосмотических модулей с использованием закона «фильтрования» с образованием осадка. Для оценки ресурса необходимо проведение эксперимента по обратноосмотическому разделению пробы регенерируемой жидкости.

3. Экспериментальные исследования процесса обратноосмотической очистки

3.1. Экспериментальная установка, аппаратура и методики исследований

3.1.1 Объекты исследования

3.1.1.1 Натурные сточные санитарно-гигиенические воды

В качестве объектов исследования были выбраны сточные воды, полученные после санитарно-гигиенических водных процедур и стирки одежды персонала АО «НИИхиммаш» (г. Москва).

Проведен анализ состава сточных санитарно-гигиенических вод. Так как сточные санитарно-гигиенические воды имеют переменный состав, отбор проб на анализ проводился многократно. Анализировалась вода, полученная после мытья рук, мытья головы и тела, стирки одежды. На основе литературных источников [6-10] и экспериментальных данных получен обобщенный состав сточных вод, который представлен в таблице 3.1.

Проблема очистки данного вида сточных вод заключается в том, что они содержат большое количество низкомолекулярных органических веществ, которые входят в состав моющих средств. Моющие средства являются наиболее трудно извлекаемыми загрязнителями данного типа вод. При проведении экспериментов использовалось моющее средство «Адажио», состав которого соответствует приведенному в таблице 2.2.

Таблица 3.1 — Состав примесей в санитарно-гигиенической воде, подлежащей очистке

Состав примесей в СГВ, по			ежащей очистке
Показатель	Источник [5-7]	Источник [8]	По экспериментам автора
Цвет	серый	мутный, серый	мутный, серый
Запах, баллы	резкий, специфический	0 - 1	2 - 3
Водородный показатель pH, ед. pH	6 - 7	8 - 10	5,8 - 6,6
Прозрачность, см	мутная	6,5 - 8,0	1
Взвешенные вещества, мг/л	-	150 - 300	170*
Органические вещества в сумме по бихроматной окисляемости, мг O_2 /л	до 5000	1200 - 2200	900 - 1700
Азот аммиака, мг/л	60	-	6,4 - 22,6
Мочевина, мг/л	3	-	-
Хлориды, мг/л	300	2,5 - 5,0	80
Фосфаты, мг/л	-	10 - 20	-
Сульфаты, мг/л	-	15 - 40	3
Общая жесткость, мг-экв/л	-	-	0,66 - 1,05
Моющее средство (ПАВ), мг/л	до 1000	55 - 140	до 8000
Бактерии, количество микробных тел в литре	до 10 ⁵ - 10 ⁹	-	10 ⁴ - 10 ⁵

^{* -} взвешенные вещества с размером частиц более 50 мкм.

Источник: опубликована автором в работе [6].

3.1.1.2 Растворы моющего средства в воде

В качестве исследуемых растворов использовались растворы моющего средства в воде. При этом в растворе не содержалось загрязнений переменного состава, а основной загрязнитель (моющее средство «Адажио»), наиболее трудно извлекаемый из раствора, присутствовал в чистом виде. Расчетная зависимость осмотического давления водного раствора исследуемого моющего средства «Адажио», предполагаемого для применения на борту космических аппаратов, от его концентрации представлена на рисунке 2.5. Для качественной оценки

возможности регенерации воды после стирки использовалось дезинфицирующее средство с моющим эффектом для стирки «Оптимакс».

Для подтверждения выдвинутых положений проводились сравнительные эксперименты по очистке модельных водных растворов NaCl. Зависимость осмотического давления водного раствора хлористого натрия от концентрации NaCl представлена на рисунке 2.4.

3.1.2 Элементы разделяющей системы

В настоящее время в рулонных обратноосмотических модулях в основном применяется два типа композитных мембран: мембраны из ацетатцеллюлозы и мембраны Промышленные мембранные ИЗ полиамида. модули ИЗ ацетатцеллюлозы получили широкое распространение в конце прошлого века благодаря высокой прочности, простоте технологии изготовления, высокой химической стойкости. Существует большое количество работ, например [36, 37, 42, 45, 72], в которых проводились исследования обратноосмотических модулей из ацетатов целлюлозы. Мембранные модули из полиамида распространились на рынке несколько позже, но в настоящее время вытесняют ацетатцеллюлозные. Полиамидные мембраны превосходят ацетатцеллюлозные по большинству показателей: производительности, химической стойкости, отсутствию набухания в воде, ресурсу, подверженности микробиологическому разрушению, но уступают им в стойкости к воздействию сильных окислителей.

Исследования по очистке растворов проводились на рулонных обратноосмотических модулях отечественного (НаноРО КСН 21-2521Т) и зарубежного (Vontron ULP 21-2521) производства, в которых использована композитная мембрана из полиамида с подложкой из полисульфона. Паспортные характеристики исследованных мембранных модулей представлены в таблице 3.3, результаты их предварительных исследований – в таблице 3.4.

Предварительные исследования показали, что импортные и отечественные мембранные модули идентичны по большинству характеристик. Для дальнейших исследований использовались обратноосмотические модули НаноРО КСН 2521Т

российского производства, с композитной мембраной РМ33К, структура которой схематично показана на рисунке 3.1.

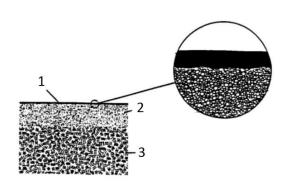
Таблица 3.3 – Паспортные характеристики исследованных мембранных модулей

Показатель	Значение показателя		
Показатель	НаноРО КСН 21-2521Т	Vontron ULP 21-2521	
Минимальная производительность по	38	43	
раствору NaCl с концентрацией 0,5 г/л при	(в пересчете на дист.	(в пересчете на дист.	
давлении $P = 0.7 \text{ M}\Pi a$ и $t = 20 ^{\circ}\text{C}$, $\pi/(\text{м}^2*\text{ч})$	воду $5,8 \text{ л/(м}^2*ч*атм))$	воду $6,5 \text{ л/(м}^2*ч*атм))$	
Селективность по NaCl, %	99	99	
Площадь мембран, м ²	1,1	1,1	
Рабочее давление, МПа	0,7 – 0,9	1,0	
Диапазон работы:			
pH	3 – 10,5	3-10	
Температура, °С	4 - 45	4 - 35	

Таблица 3.4 — Результаты предварительных исследований импортных и отечественных мембранных модулей

Показатель	Значение показателя		
Показатель	НаноРО КСН 21-2521Т	Vontron ULP 21-2521	
Производительность по чистой			
(дистиллированной) воде при Р = 0,8 МПа и	64	61	
$t = 20 {}^{\circ}\text{C}, \pi/(\text{M}^2*\text{H})$			
Производительность при очистке раствора			
МС «Адажио» с концентрацией 10 г/л при	26	26	
$P=0.8 \text{ M}\Pi a \text{ и t} = 20 ^{\circ}\text{C}, \text{л/(м}^{2}*\text{ч})$			
Селективность по МС «Адажио» при очистке			
раствора МС с концентрацией 10 г/л при	99	99	
P=0,8 МПа и t= 20 °C, %			

Для сохранения эксплуатационных характеристик и предотвращения микробиологического воздействия производитель проводит консервацию новых мембранных модулей 1%-м растворов метабисульфита натрия [5]. Перед применением мембранные модули многократно отмывались дистиллированной водой. После отмывки определялся коэффициент проницаемости модуля по дистиллированной воде, который для модулей НаноРО КСН 2521T составил $K_{\text{лист}} \approx 8 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{атм})$.



1 — полиамид (барьерный слой 0,1 мкм); 2 — микропористый полисульфон (45 мкм); 3 — нетканое полотно (92 мкм)

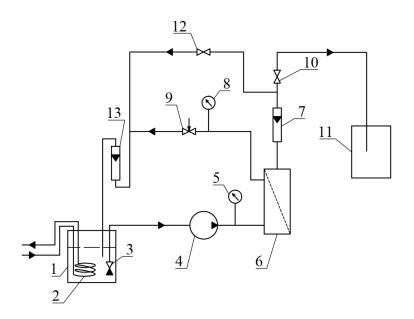
Рисунок 3.1 – Структура композитной мембраны, используемой в рулонных низконапорных модулях

3.1.3 Экспериментальные установки и методики проведения эксперимента

При проведении экспериментов для очистки модельных растворов моющего средства и хлористого натрия использовалась лабораторная установка с рулонным обратноосмотическим модулем. При проведении очистки натурных сточных вод, а также модельных растворов использовался прототип системы регенерации санитарно-гигиенической воды — полупромышленная установка с рулонным обратноосмотическим модулем, системами предварительной очистки, доочистки и обеззараживания.

3.1.3.1 Лабораторная установка

Схема лабораторной установки, предназначенной для обратноосмотического разделения модельных водных растворов моющего средства и хлористого натрия, представлена на рисунке 3.2.



1 - емкость для исходного раствора; 2 - теплообменник; 3 - обратный клапан; 4 - насос высокого давления; 5, 8 — манометры; 6 — обратноосмотический аппарат с модулем рулонного типа; 7, 13 — ротаметры; 9 — регулировочный вентиль; 10, 12 — запорные вентили; 11 — емкость очищенной воды

Рисунок 3.2 – Схема лабораторной установки обратноосмотической очистки

Установка работала следующим образом. В емкость (1) заливали исходный (рабочий) раствор. Насос (4) подавал исходный раствор в обратноосмотический аппарат (6). Исходный раствор проходил через обратноосмотический модуль под рабочим давлением, выставляемым регулировочным вентилем (9) по манометру (8), и возвращался обратно в емкость (1). Отобранный фильтрат направлялся в емкость очищенной воды (11) или возвращался в емкость (1). Расход в циркуляционном контуре и производительность обратноосмотического аппарата по фильтрату контролировали по ротаметрам (13) и (7) соответственно.

Параметры лабораторной установки: площадь мембранного модуля: 1,1 м²; диапазон рабочего давления в аппарате: 0,2...0,8 МПа; расчетная скорость движения раствора в напорном канале обратноосмотического аппарата: 0,006 – 0,06 м/с. При проверках влияния скорости циркуляции на процесс обратноосмотической очистки расчетная скорость движения раствора в напорном канале обратноосмотического аппарата достигала 0,24 м/с.

3.1.3.2 Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования были направлены на качественную применимости обратного оценку осмоса ДЛЯ регенерации санитарногигиенической воды. Методика проведения эксперимента сводилась следующему [6]. В лабораторную установку монтировался новый обратноосмотический модуль. В емкость (1) заливалась дистиллированная вода. В течение 20 минут осуществлялась промывка с возвратом пермеата в емкость (1) при давлении в аппарате 0,2 МПа. Процедура промывки с заменой воды в емкости (1) повторялась не менее 5 раз. После промывки обратноосмотического модуля вода в емкости (1) заменялась на модельный раствор повышенной концентрации (так как в магистралях установки находилась дистиллированная вода). Запускался циркуляционный насос. Раствор некоторое время циркулировал по контуру под давлением 0,2 МПа для выравнивания концентрации в циркуляционном контуре установки. Далее установка отключалась. Из емкости (1) отбирались пробы на анализ исходного раствора, после чего начинался рабочий эксперимент. необходимое Запускалась установка, устанавливалось значение рабочего давления в аппарате. Для обеспечения постоянства концентрации на входе пермеат возвращался в емкость (1). Установка работала некоторое время для выхода на стационарный режим. Далее не менее трех раз снимались показания ротаметров. Осуществлялся отбор проб пермеата в емкость (11) на анализ.

После проведения экспериментов по разделению модельного раствора заданной концентрации, исходный раствор сливали из емкости (1), заполняли ее дистиллированной водой, и проводили отмывку установки в течение двух часов, периодически заменяя дистиллированную воду в емкости (1). После отмывки установки проводили аналогичные замеры на дистиллированной воде. Данный эксперимент показательно иллюстрировал блокировку поверхности мембран обратноосмотического модуля.

При обработке экспериментальных данных вычисляли селективность мембран по разделяемым растворам по формуле:

$$\varphi = \left(1 - \frac{C_{\phi}}{C_{\text{BX}}}\right) \cdot 100\%,\tag{3.1}$$

где C_{φ} – концентрация растворенных веществ в фильтрате; $C_{\text{вх}}$ – концентрация растворенных веществ в рабочей жидкости на входе в аппарат.

По методике пункта 2.5 настоящей работы находили среднее значение перепада давления на мембране и осмотическое давление разделяемого раствора у поверхности мембраны. Осмотическое давление растворов оценивалось исходя из концентрации моющего средства с использованием зависимостей, представленных на рисунках 2.4 и 2.5.

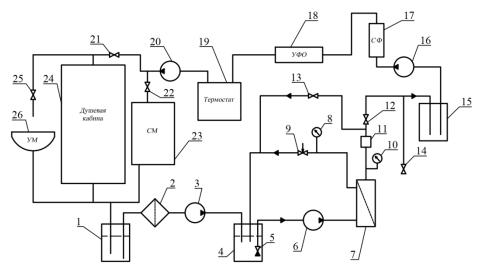
3.1.3.3 Прототип системы регенерации санитарно-гигиенической воды

Разработан и испытан прототип системы регенерации воды из загрязненных санитарно-гигиенических вод, получаемых при мытье рук, принятии душа и стирке одежды, который показал свою эффективность при высокой степени извлечения и малом энергопотреблении.

Прототип системы регенерации СГВ, смонтированный в АО «НИИхиммаш», использовался для обратноосмотической регенерации модельных растворов моющего средства и натурных сточных вод. Схема прототипа представлена на рисунке 3.3.

Сточная вода поступала в емкость загрязненной воды (1). Регенерация воды осуществлялась в обратноосмотическом аппарате (7), который состоял из одного рулонного модуля типоразмера 2521. В обратноосмотическом контуре насосом (6) осуществлялась циркуляция разделяемого раствора. По мере необходимости насосом (3) осуществлялась подпитка контура прошедшей предварительный фильтр (2) исходной СГВ. Обратноосмотический фильтрат накапливался в емкости (15), после чего проходил сорбционную доочистку и дезодорирование в аппарате (17), обеззараживался ультрафиолетом в аппарате (18), нагревался до требуемой температуры нагревателем (19) и выдавался на потребление. Насос (6)обеспечивал высокого давления подачу исходного раствора В

обратноосмотический аппарат с расходом $0,36 \text{ м}^3$ /час и создавал давление $0,8 \text{ М}\Pi$ а. По показаниям манометра (10) и расходомера (11) определяли изменение параметров обратноосмотического аппарата с течением времени.



1 — емкость для накопления загрязненной воды; 2 — предфильтр; 3, 16, 20 — мембранные насосы; 4 — емкость постоянного объема для концентрирования загрязнений; 5 — обратный клапан; 6 — роторно-пластинчатый насос; 7 — обратноосмотический аппарат; 8, 10 — манометры; 9 — регулировочный вентиль; 11 — расходомер; 12-14, 21, 22, 25 — запорные вентили; 15 — емкость для сбора обратноосмотического фильтрата; 17 — фильтр сорбционной доочистки; 18 — аппарат ультрафиолетового обеззараживания; 19 — накопительный водонагреватель; 23 — стиральная машина; 24 — душевая кабина; 26 — умывальник

Рисунок 3.3 – Схема прототипа системы обратноосмотической регенерации санитарно-гигиенической воды

Перед установкой обратноосмотический модуль осматривался на предмет повреждений. После монтажа проверялась герметичность сборки. Производилась отмывка модуля дистиллированной водой. Снимались характеристики модуля при работе на дистиллированной воде.

3.1.3.4 Методика проведения экспериментов на прототипе системы регенерации санитарно-гигиенической воды

Методика проведения экспериментальных работ на прототипе системы обратноосмотической регенерации воды заключалась в следующем. В емкость (1) заливался модельный раствор или натурные сточные воды. Циркуляционный контур установки также заполняли данным раствором. Запускался режим регенерации, при котором включался насос высокого давления (6), вентилем (9) выставлялось необходимое рабочее давление (0,8 МПа). Первые 15 минут осуществлялся возврат пермеата в циркуляционный контур для промывки фильтратной полости и выхода установки на стационарный режим. Отбирались пробы на анализ исходного раствора в контуре и пермеата. После этого переключали отвод пермеата на емкость (13). По мере отбора пермеата осуществлялась подпитка циркуляционного контура исходной водой поддержания постоянного объема. При этом осуществлялось концентрирование подаваемого раствора в циркуляционном контуре и емкости постоянного объема. Через определенные промежутки времени через кран (12) осуществляли отбор проб пермеата, а также раствора циркуляционного контура из емкости (4) на анализ. Кроме этого, проводили измерения расходов пермеата, раствора в циркуляционном контуре и температуры раствора в контуре. После заполнения емкости (13), пермеат из данной емкости направлялся на доочистку и обеззараживание. После стерилизатора (16) также отбирали пробы на анализ.

Для отобранных проб проводили анализы по следующим показателям: химическое потребление кислорода (ХПК); удельная электропроводность; азот аммиака; мочевина; хлориды; фосфаты; сульфаты; общее количество бактериальной микрофлоры. По выражению (3.1) определяли селективность мембран модуля.

3.2 Анализ и обсуждение результатов экспериментов

Для выявления закономерностей разделения растворов низкомолекулярных органических веществ обратным осмосом проводились исследования селективности, изменения удельной производительности мембран, изменения данных параметров при изменении условий проведения процесса.

В связи с тем, что рабочее давление в обратноосмотическом аппарате в 7-15 раз превышает давление в гермообъекте (атмосферное давление в земных условиях), влиянием атмосферного давления на процесс обратноосмотической регенерации при отработке технологии очистки воды на Земле можно пренебречь. Процессы сепарации, транспортировки жидкости, фильтрования и сорбции в условиях микрогравитации достаточно хорошо изучены и изложены в работах [7-9].

3.2.1 Исследование процесса очистки на модельных растворах NaCl

На лабораторной установке по методике, описанной в пунктах 3.1.3.1, 3.1.3.2, проводились эксперименты по регенерации воды из модельных растворов NaCl с целью проверки возможности использования предложенной физической модели процесса и аналогии между массообменном и теплообменом. При экспериментах концентрация раствора NaCl варьировалась от 2 г/л до 8 г/л, рабочее давление в аппарате – от 0,2 МПа до 0,8МПа, расход раствора NaCl в циркуляционном контуре изменялся от 40 л/ч до 300 л/ч ($Re = 10 \div 130$). Для обеспечения постоянства состава подаваемой в обратноосмотический аппарат жидкости осуществляли возврат обратноосмотического фильтрата в емкость с разделяемым раствором. Эксперименты проводились на аппарате с рулонным обратноосмотическим модулем марки NanoRO КСН 2521Т [5]. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 3.4 и 3.6, а также в таблицах А.1-А.6 Приложения А. Из рисунка 3.4 видно, что при увеличении скорости циркуляции регенерируемой жидкости через обратноосмотический аппарат (при постоянном рабочем давлении), перепад давления через мембрану, найденный из эксперимента, не изменяется. Такая ситуация при работе с

растворами NaCl наблюдается во всем диапазоне проведения экспериментов: $P_{\text{pa6}} = 0,2-0,8$ МПа, C(NaCl) = 2-8 г/л; Re = 10-130.

Число Рейнольдса определяли с использованием расчетной средней скорости разделяемого раствора в напорном канале. При этом считали напорный канал щелевым и полым, пренебрегая наличием сетки-турбулизатора.

Как было показано в главе 2, происходит молекулярно-конвективный отвод соли от мембраны, при этом, градиент концентраций и проявление концентрационной поляризации при проведении очистки незначительны. Если бы не было отвода соли ее концентрация и осмотическое давление у поверхности мембраны заблокировали бы процесс обратного осмоса.

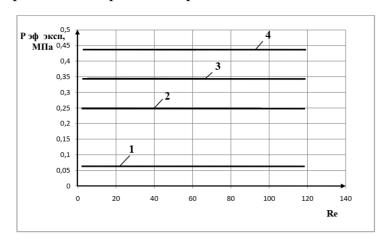
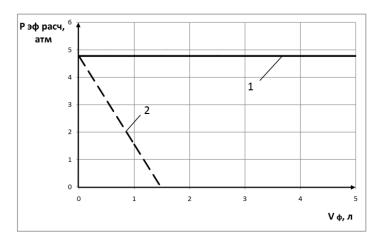


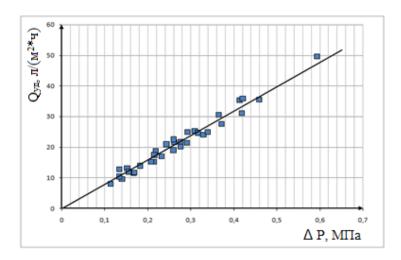
Рисунок 3.4 — Перепад давления на мембране в зависимости от скорости циркуляции раствора NaCl (C=4 г/л) через аппарат (u=0,01-0,12 м/с) и рабочего давления ($P_{pa\delta}=0,4-0,8$ МПа): $1-P_{pa\delta}=0,4$ МПа; $2-P_{pa\delta}=0,6$ МПа; $3-P_{na\delta}=0,7$ МПа; $4-P_{na\delta}=0,8$ МПа

На рисунке 3.5 представлены результаты расчетов перепада давления на мембране при наличии и гипотетическом отсутствии молекулярно-конвективного отвода растворенных веществ от поверхности мембраны при концентрации NaCl в очищаемом растворе 4 г/л и рабочем давлении 0,8 МПа, из которого видно, что при отсутствии отвода растворенных веществ движущая сила процесса обратноосмотической регенерации уже после получения 1,5 л воды падает до нуля.



1 — имеет место молекулярно-конвективный отвод растворенных веществ от поверхности мембраны; 2 — молекулярно-конвективный отвод растворенных веществ от поверхности мембраны отсутствует

Рисунок 3.5 – Результаты расчетов перепада давления на мембране при наличии и отсутствии молекулярно-конвективного отвода растворенных веществ от поверхности мембраны при концентрации NaCl в очищаемом растворе 4 г/л и рабочем давлении 0,8 МПа



— – расчет по концентрации у поверхности мембраны с использованием аналогии между массообменом и теплообменом;
 □ – значения, полученные путем обработки экспериментальных данных с использованием средних значений концентрации растворенных веществ в напорном канале

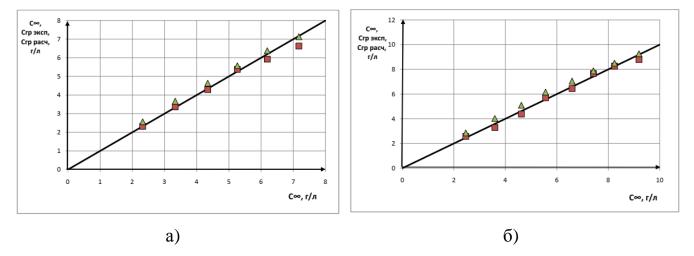
Рисунок 3.6 – Зависимость производительности обратноосмотического модуля по фильтрату от перепада давления на мембране

Ha 3.6 рисунке представлено сравнение производительности обратноосмотического модуля по фильтрату, полученной расчетным путем по граничной концентрации растворенных веществ с использованием аналогии между массообменом и теплообменом и полученной путем обработки экспериментальных данных с использованием средних значений концентрации растворенных веществ напорном канале. Из В рисунка видно, концентрационная поляризация проявляется незначительно, поэтому расчет производительности аппарата при разделении растворов NaCl можно вести по средней концентрации хлористого натрия в напорном канале. Степень проявления концентрационной поляризации во многом зависит от природы растворенных веществ. Так производительность аппарата как вследствие высокого осмотического давления растворов NaCl невелика, хлористый натрий успевает отводиться от поверхности мембраны, чему также способствуют возмущения, создаваемые сепарирующей сеткой в напорных каналах аппарата. Таким образом, в данном случае диффузионное сопротивления не является лимитирующей стадией массообменного процесса.

Линейная зависимость, представленная на рисунке 3.6, соответствует феноменологическому уравнению (2.2). В исследуемом диапазоне концентраций и расходов в аппарате с мембраной РМ33К при разделении растворов NaCl, коэффициент проницаемости K_I можно принять равным коэффициенту проницаемости мембраны по чистой воде: $K_1 = K_{H2O} = 8 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч·атм})$.

На рисунке 3.7 представлены результаты экспериментальных исследований и расчетов концентрации NaCl в обратноосмотическом аппарате при очистке растворов хлористого натрия с концентрацией NaCl от 2 г/л до 8 г/л в пределах изменения Re от 10 до 130 при рабочих давлениях 0,6 и 0,8 МПа. Проведенные исследования и расчеты также подтвердили отсутствие существенного проявления концентрационной поляризации в напорных каналах рулонного модуля. Экспериментальные значения концентрации хлористого натрия у поверхности мембраны определялись по методике пункта 2.4. Исходя из

полученных экспериментальных данных, аналогия между массообменом и теплообменом может применяться для расчета концентрации растворенных веществ у поверхности мембраны. Сходимость расчетных и экспериментальных данных хорошая.



- расчетные значения концентрации NaCl в ядре потока разделяемого раствора;
 □ - значения концентрации NaCl на границе раздела фаз «раствор-мембрана»,
 полученные с использованием экспериментальных данных по методике п. 2.5;
 △ - расчетные значения концентрации NaCl на границе раздела фаз «раствормембрана», полученные с использованием аналогии между массообменом и теплообменом

Рисунок 3.7 — Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений концентрации NaCl в напорном канале рулонного обратноосмотического модуля типоразмера 2521 при очистке модельных растворов хлористого натрия при Re = 60: a) $P_{pa6} = 0.6$ МПa; б) $P_{pa6} = 0.8$ МПa

В таблице 3.4 приведены результаты расчетного анализа коэффициента массоотдачи β в напорном канале рулонного модуля. Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициента массоотдачи для стабилизированного течения приведены на рисунке 2.2.

При проведении расчета необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- При расчетах опираемся на критериальные уравнения для теплообмена.

- Напорный канал считается щелевым, для которого при $Pe \cdot d_{_{3KB}}/L < 70$, $Nu_0 = 7.5 = const.$
 - $Nu_{D0} = Nu_0 \cdot Le^n$, где Le число Льюиса; <math>n = 0.33 (для рулонного модуля).
- $Nu_D \cdot W_{2rp} = Nu_D^* = Nu_{D0} \cdot f(B)$, где $Nu_D^* -$ диффузионное число Нуссельта для молекулярной составляющей диффузионного потока массы.

Таблица 3.4 — Результаты расчетного анализа коэффициента массоотдачи в напорном канале рулонного модуля для стабилизированного течения при обратноосмотическом разделении раствора NaCl ($C_{\text{вх}} = 4 \text{ г/л}$; $d_{\text{экв}}/L = 2,8 \cdot 10^{-3}$; $Nu_0 = 7,5$; $Nu_{D0} = 35,9$)

Р _{раб} , МПа	Re	Pe	Pe_D	Nu_D	W _{2∞} ·10 ⁻³ , кг/кг	W _{2гр} ·10 ⁻³ , кг/кг	β·10 ⁻⁵ , м/c
	22	0,4	49,5	35,9	4,2	4,2	3,35
0,4	55	1,1	124,6	36,2	4,1	4,2	3,38
	130	2,6	295,6	36,1	4,0	4,1	3,36
	24	0,5	55,5	37,7	4,7	5,2	3,52
0,6	58	1,2	132,3	37,6	4,3	4,8	3,51
	100	2,0	226,8	37,2	4,2	4,5	3,47
	11	0,2	24,0	36,2	7,1	7,2	3,38
0,8	28	0,6	62,8	37,8	5,3	5,9	3,52
	62	1,2	141,2	37,4	4,6	5,0	3,49

Обозначения: $C_{\text{вх}}$ – концентрация NaCl на входе в аппарат; $P_{\text{раб}}$ – среднее значение рабочего давления в аппарате; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр напорного канала; L – длина канала; Nu_0 – число Нуссельта для теплообмена; Nu_{D0} – диффузионное число Нуссельта для массообмена малой интенсивности; Nu_D – диффузионное число Нуссельта (в зарубежной литературе число Шервуда Sh); $W_{2\infty}$, W_{2rp} – массовая доля NaCl в ядре потока разделяемого раствора и у поверхности мембраны соответственно.

Исходя из полученных данных, подтверждается предположение о наличии обратного конвективно-диффузионного потока задержанных мембраной растворенных веществ. Хлористый натрий, задержанный у поверхности

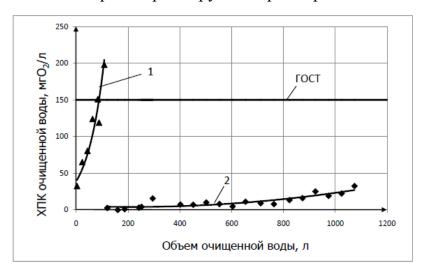
мембраны, успевает перейти за счет диффузии в ядро потока раствора, не создавая значительного внешнего диффузионного сопротивления. Большую роль в данном случае играет природа растворенного вещества. Растворы хлористого натрия обладают высоким осмотическим давлением, что исключает значительные потоки воды через мембрану при низконапорном обратном осмосе и накопление вещества мембранной Расчеты растворенного y поверхности. экспериментальные исследования показали, что процесс отвода растворенных веществ от поверхности мембраны в рулонных модулях типоразмера 2521 в диапазоне проведения настоящих исследований (P_{pa6} = 0,2...0,8 МПа; Re = 10...130) происходит автомодельно, диффузионный отвод растворенных веществ от мембраны не является определяющим при обратноосмотической очистке, а расчет производительности аппарата низконапорного обратного осмоса при очистке водных растворов неорганических солей можно проводить средней ПО концентрации растворенных веществ в аппарате.

3.2.2 Исследование процесса очистки растворов моющего средства в воде 3.2.2.1 Селективность мембран

Предварительные исследования подтвердили, что ультрафильтрация не обеспечивает необходимую степень очистки санитарно-гигиенической воды (рисунок 3.8) и только обратный осмос может обеспечить регенерацию СГВ в одну стадию.

На установке с рулонным обратноосмотическим модулем NanoRO КСН 2521 проводились эксперименты по разделению водных растворов моющего средства «Адажио», содержащих нелетучие низкомолекулярные органические вещества [73]. Результаты экспериментальных исследований представлены в Приложении Б и обсуждаются далее. Состав моющего средства представлен в таблице 2.2. При расчетах принималось, что раствор моющего средства является бинарной смесью, состоящей из воды и ключевого компонента моющего средства – лауретсульфата натрия. Концентрация МС варьировалась от 5 г/л до 250 г/л.

Расход раствора МС в напорном канале аппарата составлял от 40 л/ч до 660 л/ч. Исследования по изучению селективной проницаемости композитных мембран РМ33К проводились на лабораторной установке по методике, представленной в пунктах 3.1.3.1, 3.1.3.2 и показали (рисунок 3.9), что селективность мембраны РМ33К при очистке водного раствора моющего средства приближается к 100%, практически не зависит от изменения рабочего давления в аппарате, концентрации очищаемого раствора и других параметров.



1 – ультрафильтрация; 2 – обратный осмос; ГОСТ – ГОСТ Р 50804-95

Рисунок 3.8 — Сравнение эффективности применения ультрафильтрации и обратного осмоса для регенерации санитарно-гигиенической воды

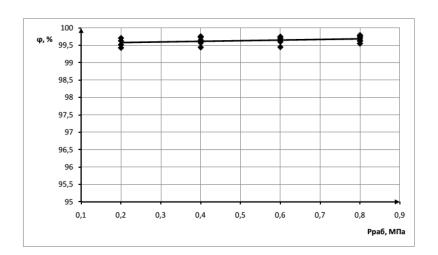


Рисунок 3.9 – Зависимость селективности мембраны РМ33К по моющему средству «Адажио» от рабочего давления при концентрации моющего средства в исходном растворе от 10 г/л до 250 г/л

Определение селективности проводилось при помощи анализов ХПК и удельной электропроводности (УЭП) исходного раствора и очищенной воды. Найдены корреляции ХПК и УЭП с концентрацией моющего средства в растворе, которые представлены на рисунке 3.10, из чего сделаны выводы о возможности оперативной оценки качества очищенной воды и содержания растворенных веществ в концентрируемой жидкости путем измерения УЭП раствора. Данное обстоятельство позволяет осуществить автоматизацию процесса очистки в условиях космической станции.

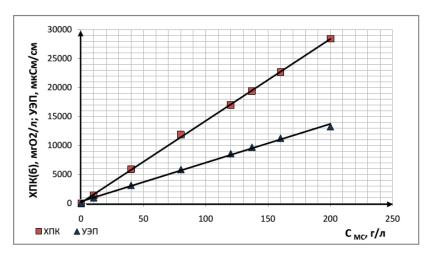


Рисунок 3.10 – Корреляции химического потребления кислорода и удельной электропроводности с концентрацией моющего средства «Адажио» в растворе

Мембрана РМ33К обладает значительной селективностью по отношению к компонентам моющего средства, которая превышает 99%. Данное обстоятельство можно объяснить следующим образом. Часть компонентов моющего средства, растворенного в воде, является неполярной [74]. В соответствии с капиллярнофильтрационной моделью селективной проницаемости мембран материалом мембраны образуются разные виды связей молекул воды и молекул растворенных компонентов моющего средства. Так молекулы воды связываются с мембраной ориентационными силами, a неполярные молекулы MC дисперсионными [45, 75]. В областях структурных неоднородностей мембраны наблюдается преимущественное связывание с данными областями неполярных органических молекул моющего средства, что связано со стремлением системы

перейти в более термодинамически выгодное состояние. В итоге наблюдается различная подвижность связанных с мембраной молекул. При этом менее подвижны молекулы растворенных веществ [76], что проявляется в практически неизменной селективности исследуемой мембраны по органическим компонентам моющего средства.

3.2.2.2 Удельная производительность мембран

Удельная производительность мембран является важной характеристикой обратноосмотического разделения. Известно [37, 40, 45, 76-78], что производительность мембран зависит от ряда факторов, среди которых природа мембран и разделяемого раствора, рабочее давление в аппарате, скорость движения разделяемого раствора по напорному каналу обратноосмотического модуля.

В настоящей работе изучалось влияние на процесс обратноосмотического разделения СГВ следующих параметров: концентрации растворенных веществ в разделяемом растворе, рабочего давления в аппарате, скорости движения разделяемого раствора в напорных каналах аппарата. Исследования проводились на лабораторной установке, описанной в пункте 3.1.3.1.

На рисунке 3.11 представлены зависимости производительности мембраны РМ33К от концентрации моющего средства в исходном растворе и рабочего давления в обратноосмотическом аппарате.

удельной Снижение производительности мембран повышением концентрации ОНЖОМ объяснить повышением осмотического давления Так наблюдается разделяемого раствора. как высокая селективность обратноосмотических мембран к компонентам общепринятых моющих средств, в процессе мембранного разделения повышается концентрация растворенных веществ у поверхности мембраны по сравнению с концентрацией в потоке, что процесса обратноосмотической снижает движущую силу очистки, следовательно, и производительность аппарата.

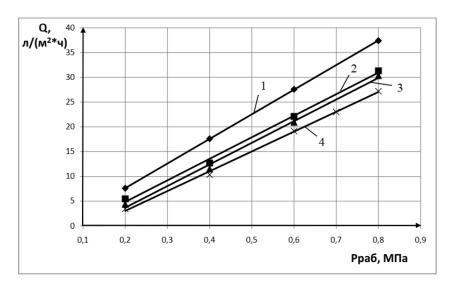


Рисунок 3.11 – Зависимость производительности мембраны РМ33К от концентрации исходного раствора и рабочего давления в аппарате (Re = const) при разделении водных растворов моющего средства (MC):

$$1 - C_{MC} = 10 \ г/\pi$$
; $2 - C_{MC} = 20 \ г/\pi$; $3 - C_{MC} = 30 \ г/\pi$; $4 - C_{MC} = 40 \ г/\pi$

Известно, что удельная производительность мембран описывается выражением вида (2.2) и прямо пропорциональна (но встречаются исключения) движущей силе процесса. Многими исследователями данная зависимость подтверждена экспериментально для электролитов [45, 50]. Для водных растворов низкомолекулярных органических веществ характер данной зависимости также близок к линейному [45, 76]. Прямая пропорциональность подтверждается данными, полученными и в настоящей работе.

На рисунке 3.12 приведены зависимости удельной производительности мембраны РМ33К от интенсивности течения разделяемого раствора в обратноосмотическом аппарате и концентрации моющего средства в исходном растворе.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что при увеличении скорости потока от 0,01 м/с до 0,24 м/с, постоянном рабочем давлении процесса и концентрации растворенных веществ, наблюдается рост удельной производительности мембраны. Данный факт позволяет сделать предположение о проявлении концентрационной поляризации (КП) у поверхности мембраны,

которая снижает движущую силу обратноосмотической очистки, создавая диффузионное сопротивление у поверхности мембраны. Заметное проявление КП наблюдается при значении числа Рейнольдса менее 50. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса проявление КП снижается.

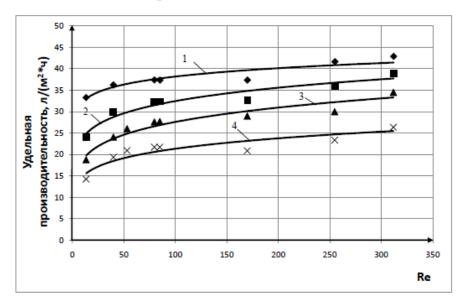


Рисунок 3.12 — Зависимость производительности обратноосмотической мембраны РМ33К от интенсивности течения разделяемого раствора в аппарате (u = 0.01...0.24 m/c) и концентрации моющего средства (MC) в циркуляционном контуре при очистке растворов MC «Адажио» ($P_{pa6} = 0.8 \text{ M}\Pi a$):

$$1-C_{MC}=10\ {\mbox{г/}\pi};\ 2-C_{MC}=30\ {\mbox{г/}\pi};\ 3-C_{MC}=40\ {\mbox{г/}\pi};\ 4-C_{MC}=60\ {\mbox{г/}\pi}$$

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рисунке 3.13, также показывают, что движущая сила процесса очистки интенсивно возрастает с увеличением числа Рейнольдса до 50. При Re > 50 интенсивность увеличения движущей силы снижается. Данный факт может свидетельствовать о заметном проявлении концентрационной поляризации при малых числах Re, ее снижении при возрастании скорости циркуляции с постепенным снижением толщины пограничного слоя при повышении скорости потока.

Исходя из полученных данных, рекомендуется проводить процесс мембранного разделения на рулонном модуле типоразмера 2521 при значениях числа Рейнольдса в напорных каналах аппарата более 50.

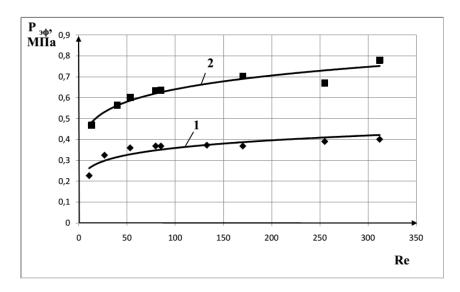
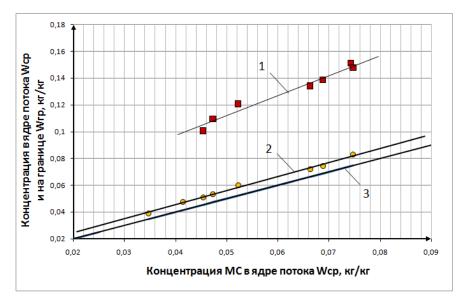


Рисунок 3.13 – Перепад давления на мембране в зависимости от скорости циркуляции раствора моющего средства ($C_{MC} = 40 \text{ г/л}$) через аппарат и рабочего давления: $1 - P_{pa6} = 0.6 \text{ М}\Pi a$; $2 - P_{pa6} = 0.8 \text{ M}\Pi a$

Ha 3.14 представлены результаты экспериментальных исследований и расчетов концентрации моющего средства в напорных каналах обратноосмотического аппарата при разделении водных растворов МС с концентрацией от 10 г/л до 60 г/л в пределах изменения Re от 7 до 130 при рабочем давлении 0,8 МПа. Значения концентрации моющего средства у поверхности мембраны определялись по методике пункта 2.4. Перепад давления на мембране определяли по уравнению (2.2) с использованием коэффициента проницаемости мембраны по воде (K_{H2O}). Из рисунка 3.14 видно, что экспериментальные значения концентрации примерно в два раза превышают значения, рассчитанные с применением аналогии между массообменом и теплообменом, что свидетельствует о наличии дополнительных факторов, влияющих на концентрацию компонентов моющего средства у поверхности мембраны (или на ее поверхности), которые в нашем случае проявляются в виде дополнительного сопротивления массопереносу – слоя связанных с мембраной компонентов МС, о чем также свидетельствует более, чем двукратное падение производительности обратноосмотического модуля по чистой воде сразу после

контакта с МС. Слой связанных с мембраной компонентов МС оказывает основное сопротивление транспорту отбираемого через мембрану компонента раствора.



1 — значения концентрации МС на границе раздела фаз «раствор-мембрана», полученные по соотношению (2) с использованием экспериментальных данных при $K_I = K_{H2O}$; 2 — значения концентрации МС на границе раздела фаз «раствор-мембрана», рассчитанные с использованием аналогии между массообменом и теплообменом; 3 — расчетная концентрация МС в ядре потока

Рисунок 3.14 — Сравнение экспериментальных значений с результатами расчетов концентрации моющего средства (МС) в каналах рулонного модуля типоразмера 2521 при очистке растворов МС

Предположение о наличии слоя связанных с мембраной растворенных веществ согласуется с утверждениями капиллярно-фильтрационной модели селективной проницаемости обратноосмотических мембран [45]. В соответствии с положениями данной модели преимущественное связывание с мембраной органических неполярных веществ наблюдается в областях структурной неоднородности мембраны, которые стремятся к максимально возможной компенсации межмолекулярных сил [33-35, 45, 50, 75, 76], что приводит к образованию слоя связанных с мембраной органических молекул. В результате

экспериментов выявлено, что слой связанных с мембраной молекул имеет практически постоянное осмотическое давление, слабо зависящее от концентрации исходного раствора.

В составе моющего средства преобладают низкомолекулярные органические вещества, в связи с чем растворы моющего средства имеют довольно низкое осмотическое давление, что позволяет в значительной степени концентрировать растворы веществ типа общепринятых моющих средств при обратноосмотическом разделении.

При рабочем давлении в аппарате, не превышающем 0,6 МПа, значения функции от фактора проницаемости f(B) приближаются к единице, что свидетельствует о малом диффузионном потоке растворенных веществ от поверхности мембраны.

При повышении рабочего давления до 0,8 МПа значения функции от фактора проницаемости f(B) достигали значения 1,2, что свидетельствует о возрастании степени проявления концентрационной поляризации и наличии более интенсивного диффузионного потока растворенных веществ от поверхности мембраны.

Таким образом, при очистке растворов МС и рабочем давлении в аппарате, превышающем 0,6 МПа, заметно проявление концентрационной поляризации (КП). При этом, влияние данного явления на производительность аппарата гораздо меньше, чем сопротивление слоя связанных с мембраной компонентов МС. В связи с тем, что КП способствует образованию слоя связанных с мембраной растворенных веществ, рекомендуется учитывать данное обстоятельство при расчетах аппаратуры, а также сводить к минимуму проявление КП.

На основе полученных данных соотношения, описывающие аналогию между массообменом и теплообменом дополнены выражениями, учитывающими образование слоя связанных с мембраной органических веществ моющего средства, которые представлены в разделе 3.3.

3.3 Обобщение результатов и разработка методики расчета обратноосмотического аппарата

Проведенные исследования выявили некоторые особенности и уточнили закономерности обратноосмотического разделения модельных растворов моющего средства в воде и натурных сточных вод. Среди них можно выделить более чем двукратное снижение производительности обратноосмотических мембран РМ33К после контакта с моющим средством, постоянство селективности мембран при очистке воды от моющего средства и рост селективности с повышением давления при очистке водного раствора NaCl.

Из изложенного в разделе 3.2 можно сделать вывод, что аналогия между массообменом и теплообменом может быть использована при расчетах мембранной аппаратуры. Показано, что при очистке модельных растворов NaCl методом низконапорного обратного осмоса изменение интенсивности течения раствора в аппарате в пределах чисел Рейнольдса от 10 до 130 не оказывает заметного влияния на диффузионный отвод соли, концентрационная поляризация практически не проявляется и ее можно не учитывать при расчетах, а сам расчет можно вести по средним значениям концентрации по длине напорного канала.

В результате экспериментов по очистке растворов моющего средства в воде выявлено, что при значениях Re < 50 наблюдается проявление концентрационной поляризации, которое снижается при повышении скорости потока в напорном канале аппарата.

При сравнении экспериментальных данных с расчетами, при которых использовалась аналогия между массообменом и теплообменом, выявлено двукратное повышение концентрации компонентов моющего средства у поверхности мембраны. С использованием положений капиллярнофильтрационной модели селективной проницаемости обратноосмотических мембран сделано предположение об образовании слоя связанных с мембраной компонентов моющего средства. Данный слой оказывает основное сопротивление

потоку растворителя через мембрану и должен учитываться при расчетах обратноосмотической аппаратуры.

В случае очистки воды от моющего средства – наиболее трудно удаляемого загрязнителя санитарно-гигиенических вод – предложено проводить расчет производительности обратноосмотического аппарата, применяя соотношение (2.2)заменой коэффициента K_{I} на эмпирический коэффициент водопроницаемости K_{MC} , учитывающий влияние компонентов моющего средства на процесс мембранного разделения. Коэффициент водопроницаемости K_{MC} учитывает сопротивление мембраны и слоя связанных с мембраной растворенных веществ. Расчетные значения производительности аппарата хорошо согласуются с экспериментальными данными, представленными на рисунке 3.15 и обобщаются, с учетом приближающейся к 100% селективности, выражением (3.2):

$$Q_{\phi \text{ VA}} = K_{\text{MC}} \cdot \Delta P_{\text{a}\phi} = K_{\text{MC}} \cdot (\Delta P_{\text{pa6}} - \pi_{\text{cp}}), \tag{3.2}$$

где Q_{ϕ} . $_{y\partial}$. — удельная производительность обратноосмотического аппарата, $\kappa \Gamma/(M^2 \cdot \Psi)$; π_{cp} — среднее значение осмотического давления разделяемого раствора в аппарате, атм; K_{MC} [$\kappa \Gamma/(M^2 \cdot \Psi \cdot \Phi)$] — коэффициент водопроницаемости мембраны, учитывающий сопротивление мембраны, слоя связанных с мембраной растворенных веществ и их концентрацию в разделяемом растворе. K_{MC} может быть определен по уравнению (3.3):

$$K_{\text{MC}} = K_0 - 0.015 \cdot C_{\text{BX}} = 5 - 0.015 \cdot C_{\text{BX}}$$
 (3.3)

 K_0 , (кг/(м²-ч-атм)) — коэффициент проницаемости мембраны по дистиллированной воде после образования слоя связанных с мембраной компонентов МС (определяется экспериментально для конкретного МС); C_{ex} (кг/м³) — концентрация моющего средства на входе в аппарат; коэффициент 0,015 (м/(ч-атм)) представляет собой удельную скорость снижения проницаемости мембраны, обусловленную увеличением слоя связанных с мембраной веществ.

На рисунке 3.16 представлена зависимость (3.3) сопротивления мембраны РМ33К и слоя связанных с мембраной растворенных веществ от концентрации моющего средства в растворе на входе в аппарат. Представленное на рисунке 3.15

сравнение расчетных и экспериментальных значений производительности обратноосмотического модуля КСН 2521T при регенерации растворов моющего средства показало хорошее совпадение.



результаты расчетов по концентрации у поверхности мембраны с использованием аналогии между массообменом и теплообменом; ● - результаты расчетов по средней концентрации растворенных веществ в канале;
 экспериментальные значения производительности

Рисунок 3.15 — Производительность обратноосмотического модуля КСН 2521Т при регенерации растворов моющего средства

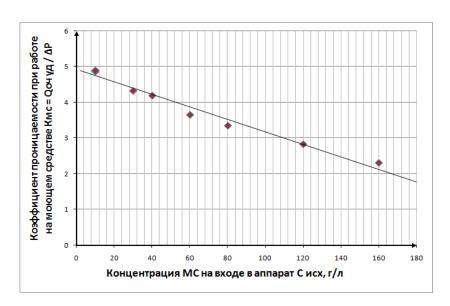


Рисунок 3.16 — Зависимость сопротивления мембраны РМ33К и слоя связанных с мембраной растворенных веществ от концентрации моющего средства в растворе на входе в аппарат

Таким образом, при оценке производительности рулонной обратноосмотической аппаратуры расчеты можно вести с использованием средней концентрации растворенных веществ в потоке разделяемого раствора и учетом слоя связанных с мембраной веществ. Для проведения уточненных расчетов, учитывающих диффузионное сопротивление у поверхности мембраны, может использоваться аналогия между массообменом и теплообменом.

Разработанная методика реализована на языке программирования Python. Программа для ЭВМ позволяет за несколько минут методом последовательных приближений провести расчет производительности обратноосмотического аппарата. Программный код представлен в приложении В.

3.4 Оценка погрешностей измерений

Экспериментальные исследования проводились с применением поверенных приборов и аппаратуры. Расход жидкости в циркуляционном контуре и производительность обратноосмотического аппарата по фильтрату определялись при помощи ротаметров с погрешностью измерений ± 0.18 л/мин (не более 2.5%) ± 0.03 л/мин более 2.5%) циркуляционного контура И (не ДЛЯ производительности аппарата по фильтрату, соответственно. Производительность обратноосмотического аппарата по фильтрату определялась также объемным методом с погрешностью ± 2.5 мл (не более 1%). Замер временных интервалов проводился с использованием цифрового секундомера, допустимая погрешность которого за 10 мин составляет ± 0.2 с (менее 0.1%). Давление определялось по показаниям манометров класса точности 0,6; погрешность измерений составила $\pm 0,006$ МПа (не более 1%). Температура жидкости определялась при помощи термометров сопротивления $TC\Pi$; погрешность измерений составила $\pm 0.8^{\circ}C$ (менее 3%).

Приготовление растворов проводилось с использованием мерных цилиндров; погрешность измерений составила $\pm 2,5$ мл (не более 1%). Масса

определялась с использованием электронных лабораторных весов (класс точности высокий II) с погрешностью измерения ± 0.02 г (не более 0.5%).

Анализы химического потребления кислорода проводились титриметрическим методом; погрешность измерений составила не более 10%. Удельная электропроводность растворов определялась кондуктометром с погрешностью измерений не более ± 15 мкСм/см (не более $\pm 1,5\%$).

Статистическая обработка результатов экспериментов проводилась общепринятыми методами вариационной статистики. Оценка отклонений результатов от средних значений проводилась с использованием распределения Стьюдента при достоверной вероятности 0,95.

3.5 Выводы по главе 3

- Подтверждена приближающаяся к 100% селективность полиамидной мембраны РМ33К к компонентам общепринятых моющих средств, что позволяет рекомендовать процесс обратного осмоса для регенерации санитарногигиенических вод.
- Найдена корреляция показателей химического потребления кислорода и удельной электропроводности с концентрацией моющего средства в растворе, что дало возможность предусмотреть проведение оперативной оценки качества очищенной воды и содержания растворенных веществ в концентрируемой жидкости по электропроводности. Данное обстоятельство позволяет осуществлять автоматизированный контроль процесса регенерации воды.
- Аналогия между массообменом и теплообменом может использоваться при расчете мембранной аппаратуры. Показано, что при очистке модельных растворов NaCl методом низконапорного обратного осмоса молекулярнодиффузионный отвод соли осуществляется автомодельно и концентрационная поляризация практически не проявляется, что подтверждено экспериментально.

Сам расчет обратноосмотической очистки растворов NaCl можно вести по средним значениям концентрации по длине напорного канала.

- В результате экспериментов по очистке растворов моющего средства в воде выявлено, что при значениях Re < 50 наблюдается заметное проявление концентрационной поляризации, которое снижается при повышении скорости потока в напорном канале аппарата.
- При сравнении экспериментальных данных с расчетами с использованием аналогии между массообменом и теплообменом выявлено двукратное повышение концентрации компонентов моющего средства у поверхности мембраны. Сделано и экспериментально подтверждено предположение об образовании слоя связанных с мембраной компонентов моющего средства, о чем также свидетельствует более, чем двукратное снижение производительности обратноосмотического модуля после контакта с моющим средством.
- Показано, что слой связанных с мембраной компонентов моющего средства оказывает основное сопротивление потоку растворителя через мембрану.
- Предложена методика расчета обратноосмотического аппарата учитывающая диффузионное сопротивление у поверхности мембраны и слой связанных с мембраной растворенных веществ. Сходимость расчетов с экспериментальными данными хорошая.

4. Исследование процесса обратноосмотической очистки натурной санитарно-гигиенической воды

Экспериментальные исследования прототипа системы регенерации санитарно-гигиенической воды, описанного в пункте 3.1.3.3, проводились на натурной санитарно-гигиенической воде (СГВ), полученной после мытья рук в умывальнике, а также после мытья тела и головы в душевой кабине с использованием жидкого общепринятого моющего средства «Адажио».

Заправку прототипа системы и снятие характеристик процесса обратноосмотической очистки осуществляли по методике, изложенной в пункте 3.1.3.4.

4.1. Очистка воды после мытья рук

Загрязненная вода была получена в результате мытья рук с использованием жидкого моющего средства и устройства для мытья рук (рукомойника) в наземном исполнении, предназначенного только для получения натурной санитарно-гигиенической воды.

Эксперименты по регенерации воды проводились в экстремальных условиях эксплуатации модуля КСН 2521Т без предварительной фильтрации воды от механических примесей при рабочем давлении процесса $0.8\,$ МПа. Концентрация моющего средства (МС) в санитарно-гигиенических водах, полученных после мытья рук, достигала $10\,$ г МС на литр раствора, в среднем составляла $5-7\,$ г/л.

Эксперименты проводились по схеме наращивания концентрации МС и загрязнений в циркуляционном контуре на установке, представленной на рисунке 3.2. Основой для получения натурной СГВ являлась дистиллированная вода. После очистки натурной СГВ фильтрат направлялся на повторное использование. Для компенсации потерь воды, отбираемой на проведение

анализов, проводилась подпитка системы дистиллированной водой. Результаты экспериментальных исследований очистки натурной СГВ, полученной после мытья рук с использованием МС «Адажио», при рабочем давлении, равном 0,8 МПа, представлены в таблице 4.1.

На рисунке 4.1 представлена зависимость производительности обратноосмотического модуля (ОМ) НаноРО КСН 2521Т при очистке натурной СГВ после мытья рук от средней за эксперимент концентрации МС в циркуляционном контуре.

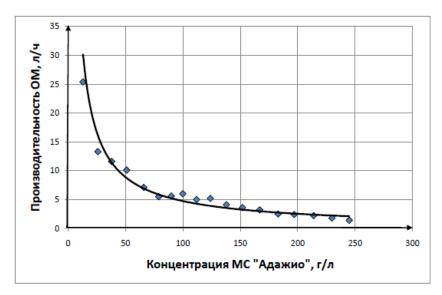


Рисунок 4.1 — Зависимость производительности ОМ НаноРО КСН 2521Т при очистке натурной СГВ после мытья рук от концентрации МС в циркуляционном контуре ($P_{pa6} = 0.8 \text{ M}\Pi a$) за один цикл концентрирования (регенерировано 114 литров воды)

При повышении концентрации моющего средства в регенерируемом растворе циркуляционного контура от 15 г/л до 50 г/л происходило стремительное снижение производительности обратноосмотического модуля (в 2,5 раза), что может свидетельствовать о появлении дополнительного сопротивления на поверхности мембраны — слоя связанных с мембраной компонентов моющего средства. При дальнейшем концентрировании МС от 50 г/л до 250 г/л наблюдалось дальнейшее плавное снижение производительности по линейному закону (в 3,3 раза).

Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных исследований очистки натурной СГВ, полученной после мытья рук с использованием МС «Адажио», при рабочем давлении, равном 0,8 МПа

Номер цикла конц.	С _{МС} конт. расч. нач	С _{МС} конт. расч. кон	С _{МС} конт. расч. ср	$Q_{\scriptscriptstyle BbIX}$	Q_{φ}	Q_{Φ} уд	V _{отобр}	ХПК исх р-ра в конце цикла	УЭП исх р-ра в конце цикла	${ m X\Pi K}_{ m \Phi \ B}$ конце цикла	УЭП _{ф в} конце цикла	Селект. ф
-	г/л	г/л	г/л	л/ч	л/ч	$\pi/(M^2 \cdot \Psi)$	Л	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
1	7	19	13	274,6	25,4	25,0	3,5	1545	1595	31	22	98,0
2	20	31	26	270,7	13,3	12,6	6,0	5390	2686	33	31	99,4
3	31	44	38	262,0	11,6	10,9	6,5	7296	4064	34	54	99,5
4	44	58	51	263,0	10,1	9,7	6,5	-	5210	-	102	-
5	58	73	66	260,1	7,1	7,0	7,0	-	6351	135	148	98,9
6	73	85	79	254,3	5,5	5,2	6,0	-	7570	115	186	99,2
7	85	94	90	234,9	5,6	5,3	5,0	-	8438	98	215	99,4
8	94	106	100	225,2	6,0	5,5	6,0	1	9550	87	277	99,5
9	106	117	112	215,5	5,0	4,3	5,5	-	10540	74	367	99,6
10	117	131	124	217,5	5,2	4,5	6,0	-	11430	57	417	99,7
11	131	145	138	209,7	4,1	3,5	6,0	-	12650	67	505	99,7
12	145	159	152	194,3	3,6	3,1	6,0	-	12850	45	540	99,8
13	159	175	167	181,7	3,2	2,6	7,0	-	13300	61	645	99,8
14	175	190	183	179,7	2,5	2,1	6,5	-	13980	71	761	99,8
15	190	204	197	157,5	2,4	1,9	6,0	-	14580	81	902	99,8
16	204	223	214	151,7	2,2	1,8	9,5	-	14780	98	876	99,8
17	223	237	230	141,0	1,8	1,4	7,0	-	15170	106	1160	99,8
18	237	252	245	107,1	1,4	1,1	7,5	-	15330	173	1245	99,6

Обозначения в таблице 4.1: $C_{MC \text{ конт. расч. нач}}$, $C_{MC \text{ конт. расч. кон}}$ — концентрация MC в циркуляционном контуре в начале и в конце цикла очистки и концентрирования соответственно;

 $C_{MC\ \text{конт. расч. cp}}$ — среднее значение концентрации MC в циркуляционном контуре за цикл концентрирования;

 $Q_{\text{вых}}$ – расход очищаемого раствора на выходе из аппарата;

 Q_{ϕ} – производительность обратноосмотического аппарата по фильтрату;

 Q_{φ} _{уд} — удельная производительность обратноосмотического аппарата по фильтрату;

 $V_{\text{отобр.}}$ – количество полученного фильтрата;

ХПК _{исх р-ра в конце цикла}; УЭП _{исх р-ра в конце цикла} — химическое потребление кислорода (бихроматная окисляемость) и удельная электропроводность очищаемого раствора в циркуляционном контуре в конце цикла очистки и концентрирования соответственно;

 $X\Pi K_{\varphi}$ в конце цикла, $Y \ni \Pi_{\varphi}$ в конце цикла — химическое потребление кислорода (бихроматная окисляемость) и удельная электропроводность фильтрата в конце цикла очистки и концентрирования соответственно;

Селект. $\phi_{\text{н}}$ — наблюдаемая селективность, определяемая по бихроматной окисляемости.

При концентрировании МС и загрязнений от 7 г/л до 250 г/л (по моющему средству) на натурной СГВ производительность ОМ снизилась в 18 раз. При этом аналогичное концентрирование имитатора СГВ (см. Приложение Б) от 5 г/л до 250 г/л привело к снижению производительности ОМ в 2,5 раза. Таким образом, присутствующие в СГВ загрязнения в значительной степени оказывают влияние на производительность модуля, что влечет за собой необходимость мер по предварительной очистке СГВ перед ступенью обратного осмоса.

Запах фильтрата после обратноосмотического аппарата составлял 3...5 баллов. Доочистка активированным углем снизила запах до 0...2 баллов, что

соответствует нормативу на СГВ [15]. Степень извлечения воды составила 0,97. В таблице 4.2 представлены результаты анализов качества полученного фильтрата.

Селективность мембраны РМ33К по натурной СГВ превышает 98%. Качество регенерированной воды после проведения доочистки соответствует требования нормативов.

Таблица 4.2 — Оценка показателей качества очищенной санитарно-гигиенической воды после обратноосмотического аппарата (Исходная вода после мытья рук. Проба взята при расчетной концентрации МС в контуре, равной 90 г/л)

Показатель	Значение	ПДК по
Показатель	Эначение	ГОСТ Р 50804-95
Содержание азота аммиака, мг/дм3	30,7	10
Содержание хлоридов (СГ), мг/дм ³	6,6	350
Общая жесткость, мг-экв/дм ³	0,27	0-7,0
рН, ед. рН	8,57	5,0-9,0
Мутность, мг/дм ³ (Прозрачность)	> 30	1,5
Цветность, градусы	0	20
Запах при температуре 20 °C, баллы	0	3
Содержание сульфатов, мг/дм3	17,7	250
Содержание нитритов, мг/дм ³	0,144	3,3
Содержание нитратов, мг/дм ³	0,035	45,0
ХПК(б) ОО, мгО ₂ / дм ³	172,5	150
$X\Pi K$ (б) OO + уголь, мг O_2 / дм ³	45,8	150
Содержание этанола, мг/дм ³	н/о	10
Содержание метанола, мг/дм3	н/о	9
Содержание этиленгликоля, мг/дм ³	н/о	11
TOC, мгС/дм ³	107,5	80
Бактериальная микрофлора (OO), KOE/дм ³	2200	100 (1000)

Содержание бактериальной микрофлоры в циркуляционном контуре концентрирования ($C_{MC} = 90 \text{ г/л}$) составляет 10^6 KOE/дм^3 .

В фильтрате обратноосмотического аппарата наблюдается повышенное содержание аммиака и бактериальной микрофлоры. Необходимы дополнительные ступени доочистки, дезодорирования и обеззараживания (консервирование, применение ультрафиолетовых стерилизаторов).

Проводилась отмывка рулонного модуля НаноРО КСН 2521Т от натурной СГВ, полученной после мытья рук и сконцентрированной в контуре, дистиллированной водой. Проверка производительности обратноосмотического модуля показала, что после работы на натурной СГВ после мытья рук в пределах концентрирования МС от 7 г/л до 250 г/л производительность рулонного модуля при работе на чистой (дистиллированной) воде снизилась в 2,5 раза по сравнению с производительностью ОМ перед работой на натурной СГВ, что может свидетельствовать об образовании устойчивого осадка на поверхности мембраны.

4.2 Очистка воды после водных процедур в душевой кабине

Экспериментальные исследования проводились по схеме наращивания концентрации моющего средства и загрязнений в циркуляционном контуре на установке, представленной на рисунке 3.2. Для проведения водных процедур использовалась душевая кабина в наземном исполнении, предназначенная только для получения натурной санитарно-гигиенической воды.

Эксперименты по очистке СГВ, полученной из душевой кабины, проводились с предварительной фильтрацией СГВ от механических примесей на фильтре предварительной очистки с размером пор 50 мкм. Обратноосмотическая очистка проводилась при рабочем давлении процесса $0.8\,$ МПа. Концентрация МС в санитарно-гигиенических водах, полученных после водных процедур в душевой кабине, составляла $2-3\,$ г/л.

В качестве моющего средства использовалось МС «Адажио». Эксперименты проводились по той же схеме, что и в разделе 4.1. Результаты экспериментов по очистке натурной СГВ, полученной после водных процедур в душевой кабине, при рабочем давлении, равном 0,8 МПа, представлены в таблице 4.3.

На рисунке 4.2 представлена зависимость производительности обратноосмотического модуля НаноРО КСН 2521T при очистке натурной СГВ

после душевой кабины от средней за эксперимент концентрации МС в циркуляционном контуре.

При концентрировании МС и загрязнений от 1 г/л до 48 г/л (по моющему средству) производительность ОМ снизилась в 1,6 раза. В таблицах 4.4 – 4.5 представлены результаты исследований показателей исходной воды и результаты анализов качества полученного фильтрата. Качество фильтрата соответствовало требованиям нормативов [15].

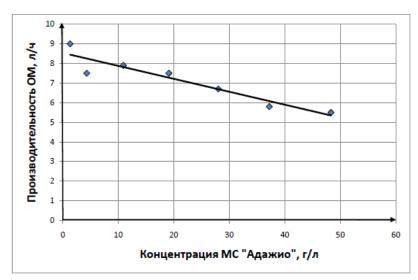


Рисунок 4.2 — Зависимость производительности ОМ НаноРО КСН 2521Т при очистке натурной СГВ, полученной после водных процедур в душевой кабине, от концентрации МС «Адажио» в циркуляционном контуре $(P_{\text{pa6}} = 0.8 \text{ M}\Pi\text{a}; \text{ регенерировано 70 литров воды})$

В циркуляционном контуре обнаружено значительное количество бактериальной микрофлоры, для подавление которой необходимо применение дополнительных мер, например применение антибактериальных моющих средств и консервантов, стерилизаторов.

Селективность мембраны РМ33К превышает 98%. После проведения доочистки и финишного обеззараживания ультрафиолетом содержание бактериальной микрофлоры и качество регенерированной воды соответствует требования нормативов, что свидетельствует о реализуемости метода обратноосмотической регенерации при высоких коэффициентах извлечения воды.

Таблица 4.3 – Результаты экспериментальных исследований по очистке натурной СГВ, полученной после водных процедур в душевой кабине с использованием МС «Адажио», при рабочем давлении, равном 0,8 МПа

Номер цикла конц.	С _{МС} конт. расч. нач	С _{МС} конт. расч. кон	С _{МС} конт. расч. ср	$Q_{\scriptscriptstyle B ext{\scriptsize BMX}}$	Q_{Φ}	Q_{Φ} уд	$V_{ ext{otofp}}$	ХПК исх р-ра в конце цикла	УЭП исх р-ра в конце цикла	$X\Pi K_{\Phi \ B}$ конце цикла	extstyle ex	Селект. Ф _н
-	г/л	Γ/Π	г/л	л/ч	л/ч	л/(м ² ·ч)	Л	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
1	1,0	1,5	1,3	114,9	9,0	8,2	2,0	900	365	11	8	98,8
2	1,5	7,1	4,3	114,9	7,5	6,8	7,5	1134	480	6	18	100,0
3	7,1	14,6	10,9	111,0	7,9	7,2	10,0	-	459	27	37	-
4	14,6	23,6	19,1	109,1	7,5	6,8	10,5	1228	481	25	65	100,0
5	23,6	32,3	28,0	112,9	6,7	6,0	11,5	941	430	33	109	100,0
6	32,3	42,1	37,2	116,8	5,8	5,2	13,0	-	488	-	172	-
7	42,1	54,5	48,3	119,7	5,5	5,0	16,5	1270	512	41	262	100,0

Обозначения те же, что и в таблице 4.2.

Таблица 4.4 — Оценка показателей исходной (загрязненной) санитарногигиенической воды

Показатель	Значение
Содержание азота аммиака, мг/дм3	6,4 – 22,6
Содержание хлоридов (Cl ⁻), мг/дм ³	78,9 – 83,7
Общая жесткость, мг-экв/дм ³	0,66 – 1,05
рН, ед. рН	5,76 – 6,61
Прозрачность, см	1
Содержание сульфатов, мг/дм ³	3
Содержание нитритов, мг/дм ³	0,08 - 0,16
XПК(б), мгO ₂ / дм ³	1134 – 5270
Бактериальная микрофлора, КОЕ/см ³	10^{4}

Таблица 4.5 — Оценка показателей качества очищенной натурной санитарногигиенической воды

Показатель	Значение	ПДК по		
Показатель	Значение	ГОСТ Р 50804-95		
Содержание азота аммиака, мг/дм ³	0,3-7,4	10		
Содержание хлоридов (Cl ⁻), мг/дм ³	0,7-7,1	350		
Общая жесткость, мг-экв/дм ³	0,04	0-7,0		
рН, ед. рН	6,3 – 7,3	5,0-9,0		
Прозрачность, см	более 30	-		
Запах при температуре 20 °C, баллы	1-3	3		
Содержание сульфатов, мг/дм ³	0 - 8,2	250		
Содержание нитритов, мг/дм ³	0,01-0,02	3,3		
Содержание нитратов, мг/дм ³	н/о	45,0		
ХПК(б) ОО, мгО ₂ / дм ³	11 – 41	150		
Содержание этанола, мг/дм ³	0	10		
Содержание метанола, мг/дм ³	0	9		
Содержание этиленгликоля, мг/дм ³	-	11		
Бактериальная микрофлора ОО, КОЕ/см ³	250 – 480	100 (1000)		
Бактериальная микрофлора (OO+УФО), KOE/см ³	20 – 100	100 (1000)		

Обозначения в таблице 4.5: ОО – фильтрат после обратноосмотического аппарата; ОО+УФО – фильтрат после обратноосмотического аппарата, прошедший обеззараживание ультрафиолетом.

После экспериментов с концентрированием натурной СГВ, полученной из душевой кабины и сконцентрированной в контуре (при использовании МС «Адажио») проведена отмывка дистиллированной водой рулонного модуля НаноРО КСН 2521Т. Проверка производительности ОМ показала, что после работы на натурной СГВ после душевой кабины в пределах концентрирования МС от 1 г/л до 55 г/л производительность рулонного модуля по дистиллированной воде снизилась в 3 раза по сравнению с производительностью ОМ перед работой на натурной СГВ (из душевой кабины), что может свидетельствовать о нарастании осадка на поверхности мембраны.

4.3. Очистка воды после стирки

Загрязненная вода была получена в результате проведения стирки одежды из хлопка с использованием жидкого моющего средства «Оптимакс» в бытовой стиральной машине (наземное исполнение), предназначенной только для получения натурной санитарно-гигиенической воды. Так как полный состав моющего средства «Оптимакс» не раскрывается производителем, проверялась качественная возможность регенерации воды при использовании данного средства.

Эксперименты по очистке СГВ, полученной после стирки одежды из хлопка, проводились с предварительной фильтрацией СГВ от механических примесей на фильтре предварительной очистки с размером пор 10 мкм при рабочем давлении процесса 0,8 МПа. Концентрация МС в СГВ, полученных после стирки одежды, составляла 5 г/л. Эксперименты по регенерации воды проводились по той же схеме, что и в разделе 4.1. Результаты экспериментов по очистке натурной СГВ, после стирки одежды из хлопка с использованием МС «Оптимакс», при рабочем давлении, равном 0,8 МПа, представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты экспериментальных исследований по очистке натурной СГВ, после стирки одежды из хлопка с использованием МС «Оптимакс», при рабочем давлении, равном 0,8 МПа

Номер цикла конц.	С _{МС} конт. расч. нач	C _{MC} конт. расч.	С _{МС} конт. расч. ср	$Q_{\scriptscriptstyle m BMX}$	Q_{ϕ}	Q _ф уд	V _{отобр}	ХПК исх р-ра в конце цикла	УЭП исх р-ра в конце цикла	$X\Pi K_{\Phi \ B}$ конце цикла	$УЭ\Pi_{\Phi \ B}$ конце цикла	Селект. ф
-	г/л	г/л	г/л	л/ч	л/ч	л/(м ² ·ч)	Л	$M\Gamma O_2/д M^3$	мкСм/см	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
1.1	5,0	25,0	15,0	169,1	6,6	6,0	17	720	234	26	23	96,4
1.2	25,0	25,0	25,0	169,1	6,3	5,7	19,5	257	64	-	29	-
1.3	25,0	25,0	25,0	173,0	5,4	4,9	20,5	140	38	28	38	79,7
1.4	25,0	25,3	25,2	165,2	6,2	5,6	8,5	-	31,8	28	37	-
2.1	25,3	30,8	28,0	174,9	5,8	5,3	8,0	-	772	44	59	-
2.2	30,8	43,3	37,0	170,1	6,0	5,5	10,0	-	146	61	87	-
2.3	43,3	55,8	50,0	173,9	3,9	3,6	9,5	-	62	-	-	-
3.1	55,8	68,3	62,0	173,0	3,3	3,0	10,0	369	203	120	153	-
3.2	68,3	73,3	70,8	171,0	3,0	2,7	5,0	-	116	92	132	-
3.3	73,3	78,3	75,8	171,0	2,9	2,6	13,0	-	111	62	107	-
4.1	78,3	90,8	84,5	171,0	2,0	1,9	7,5	377	200	121	159	-
4.2	90,8	90,8	90,8	163,3	2,5	2,3	10,0	212	86	86	137	-
4.3	90,8	90,8	90,8	173,0	1,6	1,5	9,0	156	66	112	104	-

Обозначения те же, что и в таблице 4.2.

На рисунке 4.3 представлена зависимость производительности ОМ НаноРО КСН 2521Т при очистке натурной СГВ после стирки одежды от средней за эксперимент концентрации МС в циркуляционном контуре.

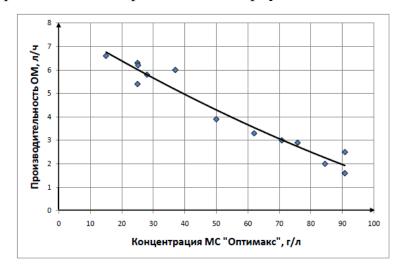


Рисунок 4.3 – Зависимость производительности ОМ НаноРО КСН 2521Т при очистке натурной СГВ, полученной после стирки одежды, от концентрации МС в циркуляционном контуре ($P_{pa6} = 0.8$ МПа; регенерировано 150 литров воды)

На рисунке 4.3 представлена зависимость производительности ОМ НаноРО КСН 2521Т при очистке натурной СГВ после стирки одежды от средней за эксперимент концентрации МС в циркуляционном контуре.

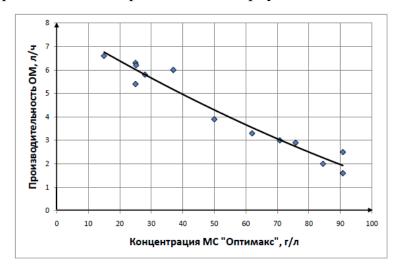


Рисунок 4.3 – Зависимость производительности ОМ НаноРО КСН 2521Т при очистке натурной СГВ, полученной после стирки одежды, от концентрации МС в циркуляционном контуре ($P_{pa6} = 0.8$ МПа; регенерировано 150 литров воды)

При концентрировании МС и загрязнений от 5 г/л до 91 г/л (по моющему средству) производительность ОМ снизилась в 4,1 раза.

В таблицах 4.7 – 4.9 представлены результаты исследований показателей исходной воды и результаты анализов качества полученного фильтрата. Результаты анализа качества фильтрата подтвердили необходимость его доочистки, дезодорирования и последующего обеззараживания.

Таблица 4.7 — Оценка показателей исходной (загрязненной) санитарногигиенической воды (Исходная вода после стирки одежды из хлопка. Проба взята при концентрации МС «Оптимакс» в контуре 90,8 г/л)

Показатель	Значение
Содержание азота аммиака, мг/дм ³	13,0
Содержание хлоридов (Cl $^{-}$), мг/дм 3	12,85
Общая жесткость, мг-экв/дм ³	0,98
рН, ед. рН	8,47
Прозрачность, см	5
Содержание сульфатов, мг/дм ³	16,3
Содержание нитритов, мг/дм ³	0,276
Содержание нитратов, мг/дм ³	н/о
$X\Pi K$ (б) OO, мгO ₂ / дм ³	377,2

Таблица 4.8 — Оценка показателей исходной (загрязненной) санитарногигиенической воды (Исходная вода после второго полоскания одежды из хлопка. Проба взята при концентрации МС «Оптимакс» в контуре 90,8 г/л)

Показатель	Значение
Содержание азота аммиака, мг/дм3	5,44
Содержание хлоридов (Cl ⁻), мг/дм ³	15,0
Общая жесткость, мг-экв/дм ³	0,3
рН, ед. рН	7,87
Прозрачность, см	3
Содержание сульфатов, мг/дм ³	17,3
Содержание нитритов, мг/дм ³	0,04
Содержание нитратов, мг/дм ³	н/о
ХПК(б) ОО, мгО ₂ / дм ³	156,4
Общее содержание бактериальной микрофлоры, КОЕ/см ³	7200

Таблица 4.9 — Оценка показателей качества очищенной санитарногигиенической воды — фильтрата после обратноосмотического фильтра (Исходная вода получена после стирки одежды из хлопка. Проба взята при концентрации МС в контуре 90,8 г/л)

Показатель	Значение	ПДК по ГОСТ Р 50804-95
Содержание азота аммиака, мг/дм ³	13,8	10
Содержание хлоридов (Cl ⁻), мг/дм ³	10,5	350
Общая жесткость, мг-экв/дм ³	0,9	0-7,0
рН, ед. рН	7,34	5,0-9,0
Прозрачность, см	16	-
Запах при температуре 20 °C, баллы	4-5	3
Содержание сульфатов, мг/дм ³	3,8	250
Содержание нитритов, мг/дм ³	2,89	3,3
Содержание нитратов, мг/дм ³	следы	45,0
ХПК(б) ОО, мгО ₂ / дм ³	91,5	150
Общее содержание бактериальной микрофлоры, КОЕ/см ³	1800	100

Степень извлечения воды составила 0,97. Необходима доочистка и обеззараживание полученного фильтрата для доведения качества регенерированной воды до требований нормативов.

После экспериментов с концентрированием натурной СГВ, полученной после стирки одежды и сконцентрированной в контуре (при использовании МС «Оптимакс») проведена отмывка дистиллированной водой рулонного модуля НаноРО КСН 2521Т. Проверка производительности ОМ показала, что после работы на натурной СГВ после стирки одежды в пределах концентрирования МС «Оптимакс» от 5 г/л до 91 г/л производительность рулонного модуля по дистиллированной воде снизилась в 2,8 раза по сравнению с производительностью ОМ перед работой на натурной СГВ (перед стиркой одежды), что может свидетельствовать о нарастании осадка на поверхности мембраны.

4.4. Анализ результатов и оценка ресурса обратноосмотических модулей

Селективность мембраны РМ33К по моющему средству и загрязнениям, переходящим в воду с тела человека и одежды, остается практически постоянной и превышает 98%. На рисунке 4.4 представлены графики зависимости селективности мембраны РМ33К по водному раствору МС и натурной СГВ от концентрации моющего средства «Адажио».

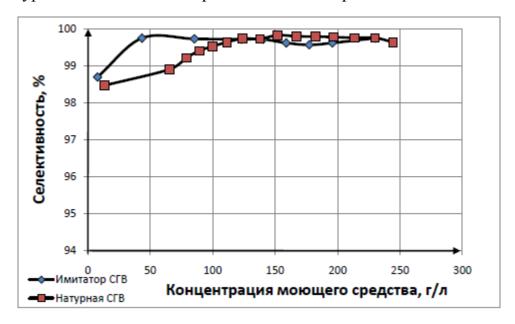


Рисунок 4.4 – Графики зависимостей селективности мембраны РМ33К по водному раствору МС и натурной СГВ от концентрации моющего средства

Из графиков видно, что селективность не зависит от наличия загрязнений дополнительно к моющему средству и определяется взаимодействием системы «моющее средство – мембрана».

Обобщение данных по производительности модуля НаноРО КСН 2521Т свидетельствует в подтверждение гипотезы об образовании слоя связанных с мембраной компонентов моющего средства. Изменение производительности модуля при экспериментах по очистке имитатора СГВ с постоянной концентрацией МС «Адажио» показано на рисунке 4.5. Из рисунка видно, что после первого контакта мембраны с МС

«Адажио» ее производительность по дистиллированной воде снижается более, чем в 2 раза, после чего стабилизируется и принимает постоянные значения.

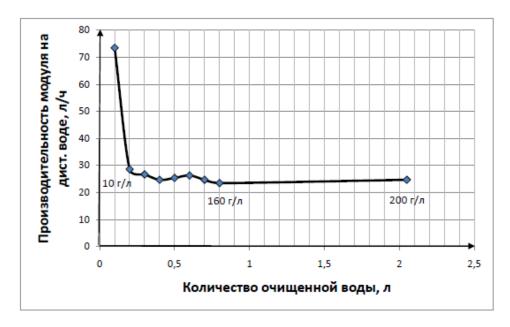


Рисунок 4.5 – Изменение производительности модуля НаноРО КСН 2521Т при работе на дистиллированной воде после экспериментов по очистке имитатора СГВ с постоянной концентрацией МС «Адажио» ($P_{pa6} = 0.8 \text{ М}\Pi a$; на рисунке указаны концентрации, после которых проводилась проверка производительности модуля)

В главе 2 выдвинуто предположение о механизме «фильтрования» с образованием осадка на поверхности мембраны при обратноосмотической регенерации санитарно-гигиенической воды. Обработка экспериментальных данных и построение графиков в координатах q-V подтвердило закономерность «фильтрования с образованием осадка» при очистке воды от моющего средства и загрязнений. Результаты обработки экспериментальных данных представлены на рисунках 4.6 и 4.8. Параметры процесса регенерации раствора МС в воде и натурной СГВ представлены в таблице 4.10.

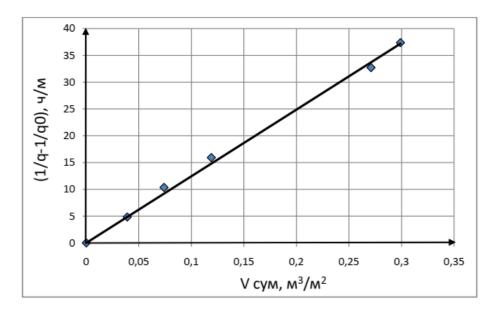


Рисунок 4.6 – Графическая зависимость для определение константы «фильтрования» при очистке модельного раствора моющего средства «Адажио» в воде

Константа «фильтрования» для раствора моющего средства в воде составила $K = 124 \text{ ч/m}^2$. Рассчитанный из данного значения константы остаточный ресурс мембраны при минимальной производительности мембраны $Q_{\text{мин}} = 1 \text{ л/ч}$ и постоянной концентрации раствора МС составит V=10000 литров.

Изменение производительности модуля на дистиллированной воде после экспериментов по очистке и концентрированию натурных санитарногигиенических вод показано на рисунке 4.7. Из рисунка видно, что при работе на натурной воде производительность мембраны стабильно снижается, что также может свидетельствовать об образовании осадка на поверхности мембраны.

Константа «фильтрования» для натурной СГВ, полученной поле мытья рук и тела, составила $K=187~\text{ч/m}^2$. Рассчитанный из данного значения константы остаточный ресурс мембраны при минимальной производительности мембраны $Q_{\text{мин}}=1~\text{л/ч}$ и постоянной загрязненности СГВ составит V=3100~литров.

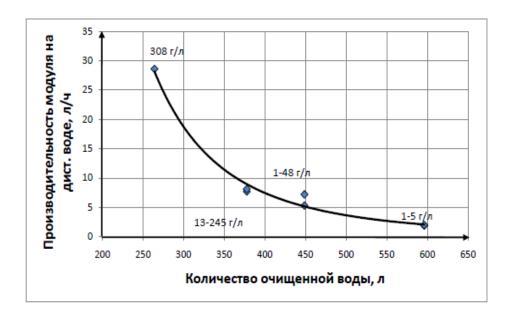


Рисунок 4.7 – Изменение производительности модуля НаноРО КСН 2521Т при работе на дистиллированной воде после экспериментов по очистке и концентрированию натурных санитарно-гигиенических вод ($P_{pa6} = 0.8 \text{ М}\Pi a$; на рисунке указаны концентрации, после которых проводилась проверка производительности модуля на дистиллированной воде)

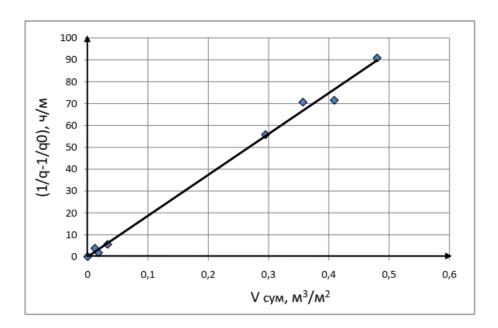


Рисунок 4.8 – Графическая зависимость для определение константы «фильтрования» при очистке натурных санитарно-гигиенических вод, полученных поле мытья рук и тела

Для автономного полета на Марс экипажа из четырех человек при расходе СГВ, равном 6 л на человека в сутки и длительности экспедиции 3 года экипажу будет необходимо иметь 5 запасных обратноосмотических модулей. Масса 5 модулей в сборе с корпусами аппаратов составит около 15 кг.

Таблица 4.10 — Параметры процесса регенерации водного раствора моющего средства и натурной санитарно-гигиенической воды

Регенерируемая жидкость	Пределы концентрирования МС, г/л	Удельная производитель- $_{\rm HOCTb},$ $_{\rm II}(_{\rm M}^{2}*_{\rm H})$	Селективность по XIIK, %	Коэф. извлечения воды*, %	Кол-во регенерированной воды, л	Прогнозируемый ресурс модуля КСН 2521Т, л
Имитатор СГВ	5 – 250	17,8-4,8	99,7	до 98,1	1350	до 10000
Натурная СГВ после мытья рук	13 – 245	25,0 – 1,1	98,0 – 99,8	до 96,6	115	до 3450
Натурная СГВ после водных процедур в душевой кабине	1 – 50	8,2 – 5,0	98,0 – 100,0	более 95,0	70	до 3100
Натурная СГВ после стирки одежды	15 – 91	6,0 – 1,5	> 98,0	до 97,4	150	до 1700

Источник: составлена автором.

Использование фильтров предварительной очистки может существенно продлить ресурс мембраны. Так при использовании фильтра предварительной механической очистки с размером пор 10 мкм ресурс обратноосмотического модуля может быть увеличен в 3 раза.

При регенерации имитатора СГВ достигнут коэффициент извлечения воды 98%. При регенерации натурных вод из-за присутствия дополнительных загрязняющих компонентов степень извлечения воды снижается и составляет 97%.

4.5. Выводы по главе 4

- 4.5.1 При очистке модельных растворов моющего средства и натурной санитарно-гигиенической воды (СГВ) селективность мембраны РМ33К остается постоянной и составляет 98-99,8%.
- 4.5.2 Экспериментально подтверждена возможность достижения степени извлечения чистой воды из сточных санитарно-гигиенических вод методом низконапорного обратного осмоса 0,97.
- 4.5.3 Выявлена необходимость применения антибактериальных моющих средств и дополнительных средств подавления бактериальной микрофлоры в циркуляционном контуре.
- 4.5.4 После проведения сорбционной доочистки и дезодорирования качество фильтрата соответствует требованиям нормативов на санитарногигиеническую воду, что свидетельствует о реализуемости метода обратноосмотической регенерации СГВ при высоких степенях извлечения чистой воды.
- 4.5.5 Дополнительные загрязнения, содержащиеся в натурной СГВ, оказывают значительное влияние на снижение производительности мембраны, что может свидетельствовать об образовании осадка на мембранной поверхности и влечет за собой необходимость предварительной фильтрации воды перед подачей на ступень обратного осмоса.
- 4.5.6 Оценка показателей производительности обратноосмотических мембран РМ33К подтвердила закономерность «фильтрования с образованием осадка» при очистке воды от моющего средства и загрязнений. Предложено проводить оценку остаточного ресурса обратноосмотических модулей, используя константу «фильтрования» для санитарно-гигиенической воды заданной загрязненности.
- 4.5.7 Ресурс обратноосмотической мембраны в значительной степени зависит от качества предварительной фильтрации СГВ и при использовании предфильтров тонкой очистки может быть существенно увеличен.

5. Применение системы регенерации санитарно-гигиенической воды

5.1. Система регенерации санитарно-гигиенической воды для космической станции

Система регенерации СГВ для космической станции должна соответствовать ряду требований и функционировать как в условиях микрогравитации, так и в условиях притяжения. Помимо ранее упомянутых жестких требований к массогабаритным характеристикам системы и требования максимального коэффициента извлечения воды, система должна работать в автоматическом режиме с минимальным вмешательством экипажа в ее работу.

соответствии с предъявляемыми требованиями и с учетом результатов проведенных исследований разработан процесс и схема Регенерация воды В разработанной проведения очистки. системе осуществляется методом обратного осмоса по схеме тангенциальной фильтрации с предварительным фильтрованием сточных вод и доочисткой и дезодорированием обратноосмотического фильтрата. В системе организован циркуляционный контур концентрирования для обеспечения высокого коэффициента возврата воды на повторное использование [47]. Разработаны и запатентованы способ и схема очистки [63, 64].

Принципиальная схема системы очистки санитарно-гигиенической воды ДЛЯ пилотируемого космического аппарата представлена на рисунке 2.1. Сточная вода из отсека водных процедур транспортируется потоком воздуха, отделяется от него в центробежном сепараторе СГЖС и направляется в емкость загрязненной воды ЕЗВ. После заполнения емкости E3B автоматически запускается режим регенерации. Исходная циркулирует в контуре концентрирования через емкость постоянного объема Е-КЦ, проходя через фильтр предварительной очистки. Очищенная вода

проходит сорбционную доочистку в блоке БСО, консервируется ионным серебром в блоке ионатора БИ и отправляется на хранение в емкость очищенной воды ЕОВ. По запросу из отсека водных процедур очищенная вода, проходя финишное обеззараживание ультрафиолетом, подается на потребление.

Загрязненная смывная вода из отсека водных процедур возвращается в емкость загрязненной воды ЕЗВ, откуда по мере отбора очищенной воды из контура через мембрану обратноосмотического фильтра забирается в емкость Е-КЦ циркуляционного контура. Концентрация моющего средства в емкости Е-КЦ возрастает и при достижении максимального значения (250 г/л) производится замена данной емкости на новую, заполненную чистой водой или опорожнение емкости по методике бортовой инструкции. Данная ситуация наступает после получения 1100 литров очищенной воды. При расчетном содержании моющего средства, поступающего из отсека водных процедур, 5 г/л коэффициент извлечения воды составляет 97-98%. Автоматическое управление регенерацией воды опробовано на прототипе системы CPB-CΓ, описанном пункте 3.1.3.3 В И показало свою эффективность.

5.2. Экономический эффект от регенерации санитарно-гигиенической воды

Осуществление водных процедур на борту космического аппарата возможно наличии только при специальных средств санитарнообеспечения $(CC\Gamma O),$ устройства гигиенического включающих ДЛЯ осуществления водных процедур экипажа (умывальник, устройства для мытья тела и головы, сауну), стиральную машину и т.д. Для обеспечения замкнутого санитарно-гигиенического водообеспечения необходима регенерация получаемой загрязненной СГВ, что может быть достигнуто

введением системы регенерации санитарно-гигиенической воды (СРВ-СГ). В таблице 5.1 на примере Международной космической станции (МКС) представлены результаты расчетов необходимой массы доставок воды и заменяемого оборудования и принадлежностей для экипажа из 3-х человек при длительности экспедиции 3 года. Из таблицы 5.1 видно, что в ряде случаев при использовании ССГО и системы СРВ-СГ необходимая масса доставляемых грузов или запасов, с учетом необходимости доставки на борт самого оборудования, может быть снижена по сравнению с действующими в настоящее время нормами. При осуществлении длительных пилотируемых космических экспедиций наличие на борту ССГО и системы СРВ-СГ становиться необходимым условием успешной реализации миссии.

Таблица 5.1 — Результаты расчетов необходимой массы доставок воды и заменяемого оборудования и принадлежностей для экипажа из 3-х человек при длительности экспедиции 3 года на примере МКС

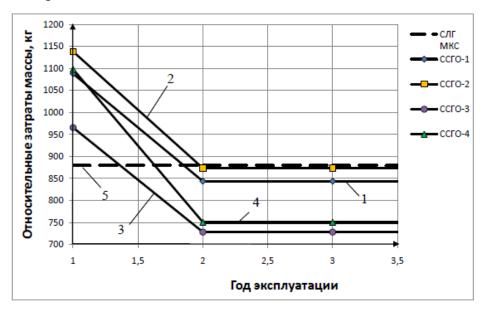
		Macca	доставляе	емых на МКО	С грузов, кг	
Набор оборудования ССГО, эксплуатирующегося совместно с системой СРВ-СГ	Салфетки, полотенца и одежда	Восполнение потерь воды	Масса ССГО и системы СРВ-СГ	ЗИП и сменное оборудование ССГО и СРВ-СГ	Моющее средство и дополнительные принадлежности	Суммарная доставляемая масса
Норматив доставки СЛГ на МКС (ССГО и СРВ-СГ	2530	90	-	-	20	2640
Отсутствуют)						
Устройство для мытья рук и лица (умывальник)	1983	271	260	192	69	2775
Умывальник совместно с						
оборудованием для мытья	1242	740	283	430	190	2885
тела						
Стиральная машина*	1546	400	237	220	37	2440
Умывальник совместно с						
оборудованием для мытья	289	1140	366	630	175	2600
тела и стиральной машиной				F1 (1)		

Источник: опубликована автором в работе [16].

Примечание. Предполагается проведение 14 стирок каждого комплекта текстильных материалов, подлежащих стирке.

Сокращения: ССГО – средства санитарно-гигиенического обеспечения; СРВ-СГ – система регенерации санитарно-гигиенической воды; ЗИП – запасные части, инструменты и принадлежности; СЛГ – средства личной гигиены; МКС – Международная космическая станция.

На рисунке 5.2 приведены результаты расчетов окупаемости различного набора ССГО и системы СРВ-СГ. Расчеты основаны на массовых характеристиках существующего и разрабатываемого оборудования. Расчеты приведены в приложении Г.



1 — использование оборудования для мытья рук и лица совместно с системой СРВ-СГ (ССГО-1); 2 — использование оборудования для мытья рук и лица, оборудования для мытья тела и головы совместно с системой СРВ-СГ (ССГО-2); 3 — использование стиральной машины совместно с системой СРВ-СГ (ССГО-3); 4 — использование полного набора ССГО совместно с системой СРВ-СГ (ССГО-4); 5 — норматив запасов средств личной гигиены для МКС

Рисунок 5.2 – Результаты расчетов окупаемости различного набора ССГО и системы СРВ-СГ при введении на борт МКС

Анализ показал, что наименьший срок окупаемости (1,35 года) имеет комбинация ССГО-3, состоящая из стиральной машины и системы СРВ-СГ. Полный набор средств санитарно-гигиенического обеспечения (ССГО-4) совместно с системой СРВ-СГ окупится за 1,6 года эксплуатации на МКС. При этом, эксплуатация на борту стиральной машины и системы СРВ-СГ позволит значительно снизить объем, занимаемый запасами, что особенно критично при осуществлении длительных миссий без возможности доставки грузов [16].

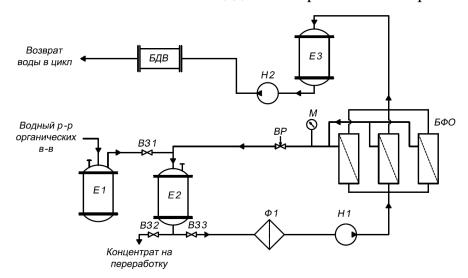
Экономический эффект от введения системы СРВ-СГ на борт Международной космической станции в зависимости от набора средств санитарно-гигиенического обеспечения может составить до 6,5 млн. долларов США в год (при стоимости доставки одного килограмма груза на МКС 22000 долларов США [79]).

5.3. Использование обратноосмотических установок исследованного типа в промышленности, коммунальном хозяйстве и в быту

Установки обратноосмотической очистки воды исследованного типа (на основе низконапорного обратного осмоса) в наземном исполнении могут применяться для промышленных и бытовых нужд, например, при получении уротропина, при производстве поверхностно-активных веществ и моющих средств, при организации оборотного водоснабжения в автономных объектах (индивидуальные бункеры, подводные лодки) и частных домовладениях в районах, которые испытывают острый дефицит воды. Актуально использование данного типа установок в районах крайнего севера, где нежелательно осуществлять сброс сточных вод.

На рисунке 5.3 представлена схема системы обратноосмотической регенерации воды для организации оборотного водоснабжения предприятия. Система может очищать воду от низкомолекулярных нелетучих

органических веществ и минеральных компонентов, обеспечивая возврат до 98% компонентов производственный воды И ценных В цикл. Обратноосмотическая система оборотного водоснабжения может быть реализована в мобильном варианте в виде компактной автономной системы периодического действия, которая может быть установлена автомобильное шасси или быть смонтирована на базе быстровозводимого сооружения контейнерного типа. Система позволяет проводить плавное равномерное концентрирование компонентов в циркуляционном контуре и обеспечивать плавное изменение нагрузки на обратноосмотическую аппаратуру, сглаживая скачки и изменения концентрации поступающих сточных вод [75]. Степень извлечения ценных компонентов, в том числе воды, зависит от природы разделяемых веществ и может достигать 98%. Производительность определяется параметрами процесса системы обратноосмотической очистки и площадью поверхности мембран.



Е1 — емкость для хранения сточных вод; Е2 — емкость циркуляционного контура, обеспечивающая необходимый объем; Ф1 — предфильтр; Н1-Н2 — насосы; БФО — блок обратноосмотических аппаратов; М — манометр; ВР — вентиль регулировочный; ВЗ1 - ВЗЗ — вентили запорные; ЕЗ — емкость для хранения обратноосмотического фильтрата; БДВ — блок доочистки воды

Рисунок 5.3 – Схема системы обратноосмотической регенерации воды для организации оборотного водоснабжения

5.4. Выводы по главе 5

- 5.4.1 Предложена система регенерации санитарно-гигиенической воды (СГВ) для космической станции, основанная на низконапорном обратном осмосе. На прототипе системы регенерации СГВ, имитирующей работу штатной системы, подтверждена эффективность автоматического управления регенерацией.
- 5.4.2 Срок окупаемости полного набора средств санитарногигиенического обеспечения при работе совместно с системой СРВ-СГ на Международной космической станции (МКС) составит 1,6 года.
- 5.4.3. Введение на борт МКС стиральной машины и системы СРВ-СГ позволит значительно снизить объем, занимаемый запасами, что особенно критично при осуществлении длительных миссий без возможности доставки грузов.
- 5.4.4 Экономический эффект от введения системы регенерации СГВ на борт Международной космической станции при функционировании полного набора средств санитарно-гигиенического обеспечения (устройств для мытья рук, тела и готовы, стиральной машины) может достигнуть 6,5 млн. долларов США в год.
- 5.4.5 Предложенное решение может быть применено для наземного использования в качестве специальных и мобильных установок оборотного водоснабжения промышленных предприятий и в быту.

Основные результаты и выводы

- 1. Расчетно-экспериментально обоснована необходимость и экономическая целесообразность создания физико-химической системы регенерации СГВ с использованием процесса низконапорного обратного осмоса. Разработаны и защищены патентами РФ способ (RU 2625247) и система (RU 174887), реализующие практически полный (до 98-99%) процесс обратноосмотической очистки СГВ от моющих средств и других загрязнений с коэффициентом извлечения воды 97-98%.
- 2. Разработана физическая модель процесса транспорта растворителя в обратноосмотическом аппарате и сопряженного конвективно-диффузионного массопереноса в омывающем мембрану потоке очищаемой двухкомпонентной (вода моющее средство) жидкости.

Показана возможность использования основанной теории пограничного слоя аналогии между массообменом и теплообменом для расчета массоотдачи в омывающем мембрану потоке при высоких значениях числа Льюиса (Le = a/D = 80...110 >> 1), значительной разности молекулярных масс (в 20-30 раз) растворителя и растворенных веществ, сложных напорных каналах с сепарирующей сеткой и значительной разницей геометрических размеров канала ($1/d_9 \approx 500$). Предложенная поправка в виде функции от числа Льюиса $f(Le) = Le^{0.33}$ (для рулонного модуля) дает различия коэффициентах возможность, учитывая В переноса И, соответственно, диффузионного и теплового чисел Прандтля, проводить расчет коэффициента массоотдачи В.

3. Экспериментальные исследования процесса обратноосмотической очистки модельных растворов и натурной санитарно-гигиенической воды, проведенные в следующих диапазонах изменения параметров процесса: рабочего давления: 0,2-0,8 МПа; концентрации: 5-250 г/л; числа Рейнольдса:

- 10-300 подтвердили справедливость предложенной физической модели процесса и обеспечили получение следующих новых результатов.
- 3.1 Предложена методика расчетно-экспериментального определения перепада давления на мембране и осмотического давления раствора у поверхности мембраны.
- 3.2 Обнаружено явление образования слоя связанных с мембраной компонентов моющего средства, определяющего его концентрацию и осмотическое давление у поверхности мембраны, для определения и учета которого получены расчетные соотношения.
- 3.3 Исследования, проведенные на модельных растворах NaCl, подтвердили достоверность закономерностей, полученных при работе с моющим средством, и корректность обобщения результатов.
- 4. Разработана методика расчета обратноосмотической аппаратуры для высоких степеней извлечения воды, основанная на использовании аналогии между массообменом и теплообменом и полученных в настоящей работе эмпирических соотношениях для слоя связанных с мембраной растворенных веществ. Методика реализована на языке программирования Python.

Разработанная методика принята АО «НИИхиммаш» к использованию для расчетов производительности обратноосмотической аппаратуры.

5. Испытания прототипа системы регенерации СГВ, проведенные на воде, полученной после мытья рук, водных процедур в душевой кабине и после стирки одежды, подтвердили достоверность модельных исследований и позволили получить данные для расчета производительности и ресурса разработанной системы.

Принципиальными результатами являются подтверждение возможности достижения степени извлечения воды 97-98%, селективности очистки до 99,7% и соответствие качества очищенной воды нормативам ГОСТ Р 50804-95 на СГВ для космической станции.

- 6. Проведена оценка экономического эффекта от регенерации СГВ на борту МКС. При стоимости доставки 1 кг грузов 22000 долларов США экономический эффект от функционирования системы регенерации СГВ для экипажа из 3-х человек может составить до 6,5 млн. долларов США в год.
- 7. Основная цель проведенных в диссертации работ решение новой научно-технической задачи регенерации воды методом низконапорного обратного осмоса с высоким коэффициентом извлечения достигнута. Полученные результаты используются при проектировании системы регенерации СГВ для перспективной космической станции и могут быть использованы в промышленности, на объектах специального назначения и в быту.

Список сокращений и условных обозначений

МКС –Международная космическая станция

СРВ-К2М – система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги

СПК-УМ – система приема и консервации урины

СБМП – система очистки от микропримесей

СРВ-У-РС – система регенерации воды из урины

СГВ – санитарно-гигиеническая вода

ПАВ – поверхностно-активные вещества

СВО – системы водообеспечения

МС – моющее средство

УЭП – удельная электропроводность

ХПК – химическое потребление кислорода

ССГО – средства санитарно-гигиенического обеспечения

Список литературы

- Сальников, Н.А. Применение низконапорного обратного осмоса для организации оборотного водоснабжения / Н.А. Сальников, Н.Е. Николайкина, Л.С. Бобе // Экология и промышленность России. 2021. т. 25. № 4. С. 14-20.
- 2. Слесаренко, В.Н. Опреснение морской воды / В.Н. Слесаренко М.: Энергоатомиздат, 1991. 278 с.
- 3. Волчек, К.А. Комбинированные мембранные процессы очистки и переработки воды / К.А. Волчек, Г.Г. Каграманов, Е.Н. Фарносова // Химическая промышленность сегодня. 2010. № 7. С. 43–50.
- 4. Баландина, А.Г. Развитие мембранных технологий и возможность их применения для очистки сточных вод предприятий химии и нефтехимии / А.Г. Баландина, Р.И. Хангильдин, И.Г. Ибрагимов, В.А. Мартяшева // Нефтегазовое дело. − 2015. − № 5. − С. 336–375.
- 5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Элементы мембранные обратноосмотические серии NanoRO: нормативно-технический материал Владимир, 2014. 13 с.
- 6. Сальников, Н.А. Регенерация санитарно-гигиенической воды на перспективных космических станциях / Н.А. Сальников, Л.С. Бобе, А.А. Кочетков, Ю.Е. Синяк // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2017. Т. 51, № 5. С. 47—54.
- 7. Бобе, Л.С. Технологические процессы систем регенерации воды: учебное пособие / Л.С. Бобе. М.: Изд-во МАИ, 1991. 68 с.
- 8. Бобе, Л.С. Эколого-технические системы: учебное пособие / Л.С. Бобе, Ю.Е. Синяк, А.А. Берлин, В.А. Солоухин. М.: Изд-во МАИ, 1992. 72 с.
- 9. Чижов, С.В. Водообеспечение экипажей космических кораблей / С.В. Чижов, Ю.Е. Синяк. М.: Наука, 1973. 267 с.

- 10. Миташова, Н.И. Экологические аспекты технологии «влажной» чистки / Н.И. Миташова // Современная химчистка и прачечная. 2002. № 3. С. 34—37.
- 11. Федеральная космическая программа России на 2016-2025 годы. Основные положения, Интернет-сайт Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» [Электронный ресурс]. URL: https://www.roscosmos.ru/22347/ (Дата обращения: 07.03.2020).
- 12. Бобе, Л.С. Перспективы развития систем регенерации воды обитаемых космических станций / Л.С. Бобе, Н.М. Самсонов, В.М. Новиков, А.А. Кочетков, В.А. Солоухин, А.А. Телегин, П.О. Андрейчук, Н.Н. Протасов, Ю.Е. Синяк // Известия Академии наук. Энергетика. 2009. № 1. С. 69 78.
- 13. Самсонов, Н.М. Регенерационные системы жизнеобеспечения экипажей космических станций / Н.М. Самсонов, Л.С. Бобе, Л.И. Гаврилов, А.А. Кочетков, Э.А. Курмазенко, С.Ю. Романов, А.Г. Железняков, В.М. Баранов, Ю.Е. Синяк // Известия Академии наук. Энергетика. 2009. № 1. С. 61-68.
- 14. Бобе, Л.С. Опыт работы научной аппаратуры системы регенерации воды из урины НА СРВ-У-РС / Л.С. Бобе, А.А. Кочетков, Д.В. Аракчеев, А.В. Кирюхин, А.С. Цыганков, П.О. Андрейчук, А.Г. Железняков, С.Ю. Романов // Тезисы конференции «Пилотируемые полеты в космос». Звездный городок: ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина». 2019. С. 70-71
- 15. ГОСТ Р 50804-95 Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом корабле. Общие медико-технические требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 1995. 121 с.
- 16. Сальников, Н.А. Применение мембранной аппаратуры для регенерации санитарно-гигиенической воды на космической станции / Н.А. Сальников, Л.С. Бобе, А.А. Кочетков, А.Г. Железняков,

- П.О. Андрейчук, Н.А. Шамшина // Космическая техника и технологии. -2018. № 4 (23). C. 29-39.
- 17. Толкачевская, Н.Ф. Химический состав крови, секретов, экскретов и жидкостей нормального человеческого организма / Н.Ф. Толкачевская. Л.: Медгиз, 1940. 128 с.
- 18. Carter, L. Status of the Regenerative ECLS Water Recovery System / L. Carter // AIAA Transactions. 2010. № AIAA 2010-6216. P. 1-9.
- 19. Steele, J. Antimicrobials for Water Systems in Manned Spaceflight Past, Present, and Future Applications and Challenges [Электронный ресурс]. / J. Steele, M. Wilson, J. Makinen and other // 48th International Conference on Environmental Systems ICES-2018-104, 8-12 July 2018, Albuquerque, New Mexico, 2018 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
- 20. Flinn, M. Development of the Direct Osmotic Concentration System / M. Flinn, L. Delzeit, S. Gormly and other // 40rd International Conference on Environmental Systems. USA. 2013. № AIAA-2010-6098.
- 21. Meyer, C. Results of the Alternative Water Processor Test, A Novel Technology for Exploration Wastewater Remediation / C. Meyer, S. Pensinger, N. Adam and other // 46th International Conference on Environmental Systems. Austria. 2016. № ICES-2016-57.
- 22. Jiang, S. A Review of Reverse Osmosis Membrane Fouling and Control Strategies / S. Jiang, Y. Li, B. P. Ladewig // Science of the Total Environment. Elsevier B.V. October 1, 2017. P. 567–583. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.235.
- 23. Qasim, M. Reverse Osmosis Desalination: A State-of-the-Art Review / M. Qasim, M. Badrelzaman, N.N. Darwish, N.A. Darwish, N. Hilal // Desalination., Elsevier B.V. June 1, 2019. P. 59–104. https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008.

- 24. Дытнерский, Ю.И. Применение обратного осмоса для очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ / Ю.И. Дытнерский, Е.П. Моргунова // Химическая промышленность. 1977. № 2. С. 26-30.
- 25. Карлин, Ю.В. Возможность концентрирования растворов электролитов баромембранными методами / Ю.В. Карлин // Мембраны. Серия. Критические технологии. 2001. № 12. С. 3-13.
- 26. Дубяга, В.П. Мембранные технологии для охраны окружающей среды и водоподготовки / В.П. Дубяга, А.А. Поворов // Мембраны. Серия. Критические технологии. -2002. -№ 13. C. 3-17.
- 27. Алыков, Н.М. Поверхностно-активные вещества и флокулянты в объектах окружающей среды. Методы концентрирования, определения и удаления / Н.М. Алыков, Т.В. Алыкова, Е.Ю. Шачнева. Астрахань: Астраханский университет, 2011. 107 с.
- 28. Комарова, Л.Ф. Использование воды на предприятиях и очистка сточных вод в различных отраслях промышленности: учебное пособие / Л.Ф. Комарова, М.А. Полетаева. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. 174 с.
- 29. Когановский, А.М. Физико-химические методы очистки промышленных сточных вод от поверхностно-активных веществ / А.М. Когановский, Н.А. Клименко. Киев: Наукова думка, 1974. 157 с.
- 30. Гандурина, Л.В. Органические флокулянты в технологии очистки природных И промышленных сточных вод обработки И осадка. [Электронный ресурс] Л.В. Аналитический обзор Гандурина / Информационная система «Меганом». –
- URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293841/4293841858.htm (Дата обращения: 07.03.2020).
- 31. Терновцев, В.Е. Очистка промышленных сточных вод / В.Е. Терновцев, В.М. Пухачев. Киев: Будивельник, 1986. 117 с.
- 32. Родионов, А.И. Техника защиты окружающей среды / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочинников. М.: Химия, 1989. 512 с.

- 33. Jianhui, Z. Reverse osmotic concentration of aqueous solution of low molecular weight organic solutes. Part II: Low pressure RO membranes / Z. Jianhui, H. Ohya, T. Hino // Membrane. 1990. vol. 15, no. 5. P. 277-283.
- 34. Jianhui, Z. Reverse osmotic concentration of aqueous solution of low molecular weight organic solutes. Part three: For multicomponent system / Z. Jianhui, H. Ohya, Y. Negishi // Membrane. 1991. vol. 16, no. 3. P. 163-168.
- 35. Jicai, H. Studies on reverse osmosis separation of aqueous solutions of low molecular weight organics by cellulose acetate derivative membranes / H. Jicai, H. Ohya, Y. Negishi // Membrane. 1993. vol. 18, no. 5. P. 285-292.
- 36. Абоносимов, О.А. Кинетика процесса массопереноса при обратноосмотическом разделении гальваностоков и сточных вод химводоочистки: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Абоносимов Олег Аркадьевич. Тамбов, 2000. 190 с.
- 37. Головашин, В.Л. Кинетика массопереноса в процессах обратноосмотического разделения водных растворов низкомолекулярных органических веществ: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Головашин Владислав Львович. Тамбов, 2000. 173 с.
- 38. Руководство по эксплуатации водоочистителя БАРЬЕР ПРОФИ Осмо / Boost, БАРЬЕР ПРОФИ Осмо М / Boost М: нормативно-технический материал Балашиха, 2019. 36 с.
- 39. Инструкция по эксплуатации. Водоочиститель АКВАФОР-ОСМО-К: нормативно-технический материал – Санкт-Петербург, 2019. – 16 с.
- 40. Мулдер, М. Введение в мембранную технологию: [пер. с англ. Алентьева А.Ю., Ямпольской Г.П.] / М. Мулдер. М.: Мир, 1999. 513 с.
- 41. Flynn, M. A Review of the State-of-the-art in Reverse Osmosis Antifouling Approaches / M. Flynn, A.M. Figueroa // 50th International Conference on Environmental Systems. 2021. № ICES-2021-316.
- 42. Стариков, С.Е. Регенерация санитарно-гигиенической воды на основе баромембранных методов для условий длительных космических

- экспедиций: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.02 / Стариков Сергей Евгеньевич. Москва, 2009. 142 с.
- 43. Дытнерский, Ю.И. Мембранные процессы разделения жидких смесей / Ю.И. Дытнерский. М.: Химия, 1975. 230 с.
- 44. Дубяга, В.П. Полимерные мембраны / В.П. Дубяга, Л.П. Перепечкин, Е.Е. Каталевский. М.: Химия, 1981. 232 с.
- 45. Дытнерский, Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю.И. Дытнерский. М.: Химия, 1986. 272 с.
- 46. Свитцов, А.А. Введение в мембранную технологию: учебное пособие / А.А. Свитцов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2006. 170 с.
- 47. Бобе, Л.С. Анализ и расчет процесса низконапорного обратного осмоса при регенерации санитарно-гигиенической воды / Л.С. Бобе, Н.А. Сальников // Космическая техника и технологии. 2019. № 2 (25). С. 28-36.
- 48. Kucera, J. Reverse osmosis. Design, processes, and applications for engineers / J. Kucera. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2010. 394 p.
- 49. Dow Chemical Company. FilmTec Reuerse Osmosis Membranes Technical Manual. Form no. 609-00071 -0705 Dow Liquid Separations, 2007. 287 p.
- 50. Дытнерский, Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация / Ю.И. Дытнерский. М.: Химия, 1978. 352 с.
- 51. Бобе, Л.С. Процессы совместного тепло- и массоопереноса: учебное пособие / Л.С. Бобе. М.: Изд-во МАИ, 1985. 56 с.
- 52. Spalding, D.B. Proceedings of the Royal Society of London / D.B. Spalding // 1954. Ser A, vol. 221/ P. 78-104.
- 53. Леонтьев, А.И. Инженерные методы расчета трения и теплообмена на проницаемой поверхности / А.И. Леонтьев // Теплоэнергетика. 1972. № 9. С. 19-24.

- 54. Кочаров, Р.Г. Теоретические основы обратного осмоса: учебное пособие / Р.Г. Кочаров. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. 143 с.
- 55. Advanced membrane technology and applications / Edited by N.N. Li, A.G. Fane, W.S. Ho, T. Matsuura. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 994 p.
- 56. Эккерт, Э.Р. Теория тепло- и массообмена: [пер. с англ.] / Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк; под ред. А.В. Лыкова. М. Л.: Госэнергоиздат, 1961. 680 с.
- 57. Исаев, С.И. Теория тепломассообмена: Учебник для вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожинов, В.И. Кофанов и др.; под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. 495 с.
- 58. Борисов, Г.С. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др.; под ред. Ю.И. Дытнерского. М.: Химия, 1991. 496 с.
 - 59. Dresner, L. Oak Ridge natl. / L. Dresner // Lab. Rept. 1964. № 3621
- 60. Sourirajan, S. Reverse Osmosis / S. Sourirajan. London: Logos, 1970. 578 p.
- 61. Ланге, К.Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение / К.Р. Ланге; под науч. ред. Л.П. Зайченко. СПб.: Профессия, 2005. 240 с.
- 62. Кривова, А.Ю. Технология производства парфюмернокосметических продуктов / А.Ю. Кривова, В.Х. Паронян. – М.: ДеЛи принт, 2009. – 668 с.
- 63. Пат. 2625247 Российская Федерация, МПК С02F 1/44. Способ обратноосмотической очистки санитарно-гигиенической воды в замкнутом контуре в условиях невесомости / Бобе Л.С., Кочетков А.А., Рыхлов Н.В., Сальников Н.А., Коробков А.Е., Цыганков А.С., Халилуллина Х.Ш., Рукавицин С.Н.; заявитель и патентообладатель АО «НИИхиммаш». № 2015137625; заявл. 04.09.2015; опубл. 12.07.2017.

- 64. Пат. 174887 Российская Федерация, МПК С02F 9/02, 1/44, 1/32, 1/38, 1/50. Устройство обратноосмотической очистки санитарногигиенической воды в замкнутом контуре в условиях невесомости / Бобе Л.С., Кочетков А.А., Рыхлов Н.В., Сальников Н.А., Коробков А.Е., Цыганков А.С., Халилуллина Х.Ш., Рукавицин С.Н.; заявитель и патентообладатель АО «НИИхиммаш». № 2016134638; заявл. 25.08.2016; опубл. 09.11.2017.
- 65. Измайлов, Н.А. Электрохимия растворов / Н.А. Измайлов. М.: Химия, 1976. – 328 с.
- 66. Бобе Л.С. Анализ и расчет процесса низконапорного обратного осмоса при регенерации санитарно-гигиенической воды / Л.С. Бобе, Н.А. Сальников // Космическая техника и технологии. 2019. № 2 (25) С. 28 36.
- 67. Бобе, Л.С. Тепло- и массообмен в парогазовой фазе при конденсации пара из смесей паров и парогазовых смесей / Л.С. Бобе, Д.Д. Малышев, В.В. Раков, Н.М. Самсонов, В.А. Солоухин // Тепло- и массоперенос. АН БССР, Минск. 1972. т. П, ч.1. С. 475-480.
- 68. Леонтьев, А.И. Инженерные методы расчета тепло- и массообмена при конденсации из турбулентного неоднородного пограничного слоя / А.И. Леонтьев, Д.Д. Малышев // Теплоэнергетика. 1976. № 6. С. 8-12.
- 69. Кутателадзе, С.С. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
- 70. Бобе, Л.С. Влияние неконденсирующихся газов на процесс тепломассообмена в центробежном дистилляторе системы регенерации воды из урины [электронный ресурс] / Л.С. Бобе, В.В. Раков, Д.В. Аракчеев, П.А. Канаев // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=29414. (Дата обращения: 24.09.2018).
- 71. Жужиков, В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий / В.А. Жужиков. М.: Химия, 1971. 440 с.

- 72. Ефремов, А.В. Кинетика процесса разделения растворов методом обратного осмоса с использованием ацетатцеллюлозных и боросиликатных мембран: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Ефремов Александр Вячеславович. Москва, 2014. 153 с.
- 73. Адажио. Жидкое крем-мыло, перламутровое, 5 л, Алоэ Вера, с антибактериальным эффектом, Интернет-сайт ГК Аквалон [электронный ресурс]. URL: http://www.aqualongroup.ru/catalog/sredstva-lichnoy-gigieny/adazhio-zhidkoe-krem-mylo-perlamutrovoe-5-l-aloe-vera-s. (Дата обращения: 24.09.2018).
- 74. Химия. Справочное руководство: [пер. с нем.] / под ред. Ф.Г. Гаврюченкова, М.И. Курочкиной, А.А. Потехина, В.А. Рабиновича. Л.: Химия, 1975.-576 с.
- 75. Сальников Н.А. Оценка характеристик отечественных обратноосмотических модулей для организации оборотного водоснабжения малотоннажных производств / Н.А. Сальников, Н.Е. Николайкина // Экология и промышленность России. 2018. т. 22. № 3. С. 22-27.
- 76. Хванг, С.-Т. Мембранные процессы разделения: [пер. с англ.] / С.-Т. Хванг, К. Каммермейер; под ред. Ю.И. Дытнерского. М.: Химия, 1981. 464 с.
- 77. Тимащев, С.Ф. Физико-химия мембран / С.Ф. Тимащев. М.: Химия, 1988. – 240 с.
- 78. Технологические процессы с применением мембран / под ред. Ю.А. Мазитова. М.: Мир, 1976. 370 с.
- 79. Сравнительная стоимость запуска полезного груза в космос на разных РН [электронный ресурс] // Все о космосе. URL: https://aboutspacejornal.net/ (Дата обращения: 07.03.2020).

Приложение А Результаты экспериментов по очистке модельных растворов NaCl методом низконапорного обратного осмоса

Таблица А.1 – Результаты эксперимента по очистке водно-солевого раствора с концентрацией соли (NaCl) C=2 г/л

Рраб	u	Re	Q _{вых}	Q_{ϕ}	C _{cp}	УЭПф	С _ф (NaCl)	Селект. фн
МПа	м/с		л/ч	л/ч	г/л	мкСм/см	г/л	%
			337,5	6,5	2,02			
	0,16	160	335,6	6,7	2,02	697	0,34	83,1
0,2			336,5	6,6	2,02			
0,2			112,9	6,4	2,05			
	0,06	55	112,9	6,4	2,05	816	0,40	80,1
			112,9	6,4	2,05			
			112,9	20,4	2,17	368	0,18	91,2
	0,06	59	114,9	20,9	2,17			
0.4			113,9	20,6	2,17			
0,4		126	256,2	23,0	2,08	335	0,16	92,0
	0,12		254,3	23,0	2,08			
			255,2	23,0	2,08			
	0.06		112,9	38,6	2,32			
	0,06	64	116,8	39,0	2,31	271	0,13	93,6
0.6			114,9	38,8	2,32			
0,6			182,6	39,4	2,20			
	0,09	95	178,8	39,4	2,21	254	0,12	94,0
			180,7	39,4	2,21			
)6 66	112,9	54,1	2,45	256	0,12	94,0
0,8	0,06		109,1	55,0	2,47			
			111,0	54,5	2,46			

Обозначения: P_{pa6} — рабочее давление; и — расчетная скорость потока в напорном канале аппарата; Re — число Рейнольдса; $Q_{вых}$ — расход очищаемого раствора на выходе из аппарата; Q_{φ} — производительность по очищенной воде (фильтрату); C_{cp} — средняя расчетная концентрация NaCl по длине напорного канала обратноосмотического аппарата; УЭ Π_{φ} — удельная электропроводность получаемого фильтрата; C_{φ} — концентрация NaCl в фильтрате; ϕ_{H} — селективность, рассчитанная по концентрации раствора на входе в аппарат.

Таблица А.2 – Результаты эксперимента по очистке водно-солевого раствора с концентрацией соли (NaCl) C=3 г/л

Р _{раб}	u	Da	$Q_{\scriptscriptstyle \mathrm{BMX}}$	Q_{Φ}	C _{ep}	УЭΠф	C _{\phi} (NaCl)	Селект. фн
МПа	м/с	Re	л/ч	л/ч	г/л	мкСм/см	г/л	%
			43,2	9,2	3,28			
	0,02	23	43,2	10,1	3,31	715	0,35	88,6
			43,2	9,6	3,30			
			112,9	10,5	3,13		0,28	
0,4	0,06	56	112,9	10,9	3,13	578		90,8
			112,9	10,7	3,13			
			271,7	10,9	3,06			92,5
	0,12	130	267,8	11,4	3,06	474	0,23	
			269,8	11,2	3,06			
			43,2	22,2	3,71			92,2
	0,02	26	43,2	22,2	3,71	492	0,24	
			43,2	22,2	3,71			
		60	112,9	26,5	3,33			
0,6	0,06		112,9	26,5	3,33	365	0,18	94,8
			112,9	26,5	3,33			
			202,0	26,9	3,19	318		95,0
	0,09	101	198,1	27,8	3,20		0,15	
			200,1	27,3	3,20			
			43,2	29,9	3,96			
	0,02	28	43,2	30,8	3,99	440	0,21	93,1
0,7			43,2	30,4	3,98			
0,7			112,9	34,7	3,44			
	0,06	62	112,9	35,1	3,44	325	0,16	94,9
			112,9	34,9	3,44			
	0.02		43,2	38,6	4,25			
	0,02	30	45,2	39,4	4,22	414	0,20	93,5
0,8			44,2	39,0	4,23			,
0,8			112,9	45,5	3,58		0,14	95,3
	0,06	64	111,0	46,3	3,60	302		
05			112,0	45,9	3,59			

Таблица А.3 — Результаты эксперимента по очистке водно-солевого раствора с концентрацией соли (NaCl) C=4 г/л

Рраб	u	Re	$Q_{\scriptscriptstyle m BMX}$	Q_{Φ}	C_{cp}	УЭΠф	C _{\phi} (NaCl)	Селект. фн
МПа	м/с		л/ч	л/ч	г/л	мкСм/см	г/л	%
1	2	4	5	6	7	8	9	10
			12,0	5,0	4,65			
	0,006	7	12,0	5,6	4,72	1806	0,91	92,6
			12,0	5,3	4,68			
			43,2	5,3	4,21			
	0,02	22	43,2	5,8	4,23	1236	0,61	85,5
0.4			43,2	5,5	4,22	1		
0,4			112,9	5,8	4,09			87,0
	0,06	55	112,9	6,2	4,10	1076	0,53	
			112,9	6,0	4,09			
			271,7	6,6	4,04			
	0,12	130	271,7	6,6	4,04	908	0,44	89,0
			271,7	6,6	4,04			
			12,0	10,1	5,44			
	0,006	8	12,0	10,9	5,56	1147	0,57	89,7
			12,0	10,5	5,50			
			43,2	17,0	4,73			94,1
	0,02	25	43,2	16,5	4,71	579	0,28	
0.6			43,2	16,8	4,72			
0,6		58	112,9	20,0	4,33		0,25	94,2
	0,06		112,9	20,4	4,34	519		
			112,9	20,2	4,34			
			202,0	21,7	4,20			
	0,09	100	198,1	22,2	4,21	470	0,23	94,6
			200,1	21,9	4,21			
			12,0	14,4	6,07			
	0,006	9	12,0	14,4	6,07	1122	0,55	90,9
			12,0	14,4	6,07			
			43,2	23,9	5,02			
	0,02	26	43,2	23,5	5,01	599	0,29	94,2
0,7			43,2	23,7	5,02			
			112,9	27,8	4,47			
			112,9	27,8	4,47	440	0,21	95,3
	0,06	60	112,9	27,8	4,47			
			112,9	33,4	4,56	-		
			112,9	33,6	4,57			

Продолжение таблицы А.3

1	2	4	5	6	7	8	9	10
			12,0	20,0	6,96			93,6
	0,006	10	12,0	21,3	7,15	925	0,45	
			12,0	20,6	7,05			
		28	43,2	30,8	5,33	565	0,27	94,9
0,8	0,02		43,2	29,9	5,29			
			43,2	30,4	5,31			
		62	112,9	36,8	4,62			96,0
	0,06		112,9	36,8	4,62	390	0,19	
			112,9	36,8	4,62			

Обозначения те же, что в таблице А.1.

Таблица А.4 – Результаты эксперимента по очистке водно-солевого раствора с концентрацией соли (NaCl) C=5 г/л

Рраб	u	Re	$Q_{\scriptscriptstyle \mathrm{BMX}}$	Q_{Φ}	C_{cp}	УЭΠф	С _ф (NaCl)	Селект. фн
МПа	м/с		л/ч	л/ч	г/л	мкСм/см	г/л	%
			43,2	10,1	5,51			
	0,02	23	43,2	10,9	5,56	1237	0,61	88,9
			43,2	10,5	5,53			
			112,9	12,2	5,25			
0,6	0,06	57	112,9	13,1	5,26	933	0,46	91,3
			112,9	12,7	5,25	1		
			221,4	12,7	5,13			92,9
	0,09	107	217,5	13,1	5,14	754	0,37	
			219,4	12,9	5,14			
			112,9	18,7	5,38	887	0,43	91,9
	0,06	58	112,9	18,7	5,38			
0.7			112,9	18,7	5,38			
0,7			43,2	16,5	5,86			
	0,02	25	43,2	17,0	5,88	1062	0,52	91,1
			43,2	16,8	5,87			
			112,9	27,3	5,56			
	0,06	60	112,9	26,9	5,55	776	0,38	93,2
0,8			112,9	27,1	5,56			
0,8			43,2	23,9	6,26	921	0,45	92,8
	0,02	26	43,2	23,9	6,26			
			43,2	23,9	6,26			

Таблица А.5 – Результаты эксперимента по очистке водно-солевого раствора с концентрацией соли (NaCl) C=6 г/л

Рраб	u	Re	$Q_{\scriptscriptstyle B b i X}$	Q_{φ}	C_{cp}	УЭПф	С _ф (NaCl)	Селект. фн
МПа	м/с		л/ч	л/ч	г/л	мкСм/см	г/л	%
			43,2	7,9	6,47			
	0,02	23	43,2	8,8	6,52	1783	0,89	85,7
			43,2	8,4	6,49			
			112,9	7,9	6,18			
0,6	0,06	56	112,9	8,4	6,19	1513	0,75	87,9
			112,9	8,1	6,19			
			227,2	8,4	6,10	1214		90,4
	0,09	108	221,4	9,2	6,11		0,60	
			224,3	8,8	6,11			
		02 24	43,2	12,2	6,75	1432	0,71	88,6
	0,02		43,2	12,7	6,77			
0,7			43,2	12,4	6,76			
0,7			112,9	16,1	6,39			
	0,06	57	112,9	16,1	6,39	1113	0,55	91,2
			112,9	16,1	6,39			
			43,2	18,7	7,16			
	0,02	25	43,2	19,6	7,22	1250	0,62	90,1
0,8			43,2	19,1	7,19			
0,8			112,9	23,9	6,59	912		92,8
	0,06	59	112,9	24,3	6,60		0,45	
			112,9	24,1	6,59			

Таблица А.6 – Результаты эксперимента по очистке водно-солевого раствора с концентрацией соли (NaCl) C=7 г/л

Рраб	u	Re	$Q_{\scriptscriptstyle \mathrm{BMX}}$	Q_{Φ}	C_{cp}	УЭΠф	С _ф (NaCl)	Селект. фн
МПа	м/с	Ke	л/ч	л/ч	г/л	мкСм/см	г/л	%
1	2	4	5	6	7	8	9	10
			43,2	6,0	7,40	2570	1,31	
	0,02	22	43,2	6,2	7,41			81,18
			43,2	6,1	7,40			
			112,9	6,4	7,17	2097	1,06	84,7
0,6	0,06	55	112,9	6,4	7,17			
			112,9	6,4	7,17			
			209,7	6,6	7,09			
	0,09	100	209,7	6,6	7,09	2159	1,09	84,3
			209,7	6,6	7,09			

Продолжение таблицы А.6

1	2	4	5	6	7	8	9	10
0,7	0,02	23	43,2	8,4	7,58	2046	1,03	85,1
			43,2	8,4	7,58			
			43,2	8,4	7,58			
	0,06	56	112,9	8,4	7,23	1820	0,91	86,9
			112,9	9,2	7,25			
			112,9	8,8	7,24			
0,8	0,02	26	43,2	12,7	7,90	1716	0,86	87,6
			43,2	13,5	7,96			
			43,2	13,1	7,93			
	0,06	58	112,9	15,3	7,42	1444	0,72	89,6
			114,9	15,3	7,42			
			113,9	15,3	7,42			

Приложение Б

Результаты экспериментов по очистке растворов моющего средства в воде методом низконапорного обратного осмоса с концентрированием растворенных веществ в циркуляционном контуре

Таблица Б.1 – Результаты проверки производительности ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) на дистиллированной воде перед работой на имитаторе СГВ с использованием МС «Адажио»

Р _{раб} , МПа	Q _{вых} , л/ч	Qф, л/ч
0,20	426,6	20,4
0,40	376,2	39,0
0,60	325,9	57,1
0,80	262,0	73,5

Таблица Б.2 – Результаты экспериментальных исследований очистки имитатора СГВ (с использованием МС «Адажио») на ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) при постоянной концентрации МС ($C_{MC} = 10 \text{ г/л}$; ХПК_{исх. СГВ} = 1428 мгО₂/дм³; УЭП_{исх. СГВ} = 727 мкСм/см)

Р _{раб}	$Q_{\scriptscriptstyle m BMX}$	Q_{Φ}	$Q_{\phi \ yд}$	$X\Pi K_{\phi}$	УЭПф	фн
МПа	л/ч	л/ч	л/(м ² ·ч)	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
0,2	445,9	8,4	7,6	2	9	99,4
0,4	395,6	19,3	17,6	2	7	99,4
0,6	355,9	30,4	27,6	2	5	99,4
0,8	300,7	41,1	37,4	0	5	99,6

Обозначения:

Р_{раб} – рабочее давление в аппарате;

Q_{пирк. вых} – расход очищаемого раствора на выходе из аппарата;

 $Q_{\text{оч}}$ – производительность обратноосмотического аппарата по фильтрату;

 $Q_{\text{оч. уд}}$ – удельная производительность обратноосмотического аппарата по фильтрату;

 t_{κ} — температура разделяемого раствора в циркуляционном контуре (измеряется термопарой);

 $t_{\rm e}$ — температура разделяемого раствора в емкости постоянного объема (измеряется термосопротивлением);

 $X\Pi K_{\varphi}$ – химическое потребление кислорода фильтрата (бихроматная окисляемость); $Y \ni \Pi_{\varphi}$ – удельная электропроводность фильтрата;

ф_н – наблюдаемая селективность, рассчитанная по ХПК.

Таблица Б.3 – Результаты экспериментальных исследований очистки имитатора СГВ (с использованием МС «Адажио») на ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) при постоянной концентрации МС ($C_{MC} = 20 \text{ г/л}$; ХПК_{исх. СГВ} = 2567 мгО₂/дм³; УЭП_{исх. СГВ} = 1463 мкСм/см)

Р _{раб}	$Q_{\scriptscriptstyle \mathrm{BMX}}$	Q_{Φ}	$Q_{\phi \ yд}$	$X\Pi K_{\phi}$	УЭПф	фн
МПа	л/ч	л/ч	л/(м ² ·ч)	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
0,2	449,8	6,0	5,5	10	14	99,5
0,4	397,5	14,0	12,7	5	12	99,6
0,6	356,9	24,3	22,1	7	9	99,6
0,8	302,7	34,5	31,3	6	8	99,6

Таблица Б.4 – Результаты экспериментальных исследований очистки имитатора СГВ (с использованием МС «Адажио») на ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) при постоянной концентрации МС ($C_{MC} = 30 \ \Gamma/\pi$; ХПК_{исх. СГВ} = 3948 мгО₂/дм³; УЭП_{исх. СГВ} = 2156 мкСм/см)

Р _{раб}	$Q_{\scriptscriptstyle m BMX}$	Q_{Φ}	$Q_{\phi \ yд}$	$X\Pi K_{\phi}$	УЭПф	фн
МПа	л/ч	л/ч	л/(м²⋅ч)	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
0,2	453,7	4,8	4,4	13	21	99,6
0,4	399,5	12,7	11,5	12	19	99,6
0,6	358,8	23,0	20,9	10	14	99,7
0,8	306,5	33,4	30,3	10	12	99,7

Таблица Б.5 – Результаты экспериментальных исследований очистки имитатора СГВ (с использованием МС «Адажио») на ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) при постоянной концентрации МС ($C_{MC} = 40 \ \Gamma/\pi$; $X\Pi K_{HCX, C\Gamma B} = 5152 \ M\Gamma O_2/дм^3$; $Y \ni \Pi_{HCX, C\Gamma B} = 2782 \ MK CM/cM$)

Р _{раб}	$Q_{\text{вых}}$	Q_{ϕ}	$Q_{\phi \ yд}$	$X\Pi K_{\phi}$	УЭΠф	фн
МПа	л/ч	л/ч	л/(м²∙ч)	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
0,2	457,5	3,8	3,4	14	28	99,7
0,4	403,3	11,4	10,3	13	30	99,7
0,6	364,6	21,1	19,2	11	19	99,7
0,8	308,5	29,9	27,2	8	16	99,8

Таблица Б.6 – Результаты экспериментальных исследований очистки имитатора СГВ (с использованием МС «Адажио») на ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) при постоянной концентрации МС ($C_{MC} = 80 \text{ г/л}$; $X\Pi K_{ucx. CГB} = 11430 \text{ мгO}_2/дм^3$; $Y \ni \Pi_{ucx. CГB} = 5845 \text{ мкСм/см}$)

Р _{раб}	$Q_{\scriptscriptstyle m BMX}$	Q_{Φ}	\mathbf{Q}_{Φ} уд	$X\Pi K_{\Phi}$	$У \ni \Pi_{\phi}$	фн
МПа	л/ч	л/ч	л/(м ² ·ч)	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
0,4	406,2	5,0	4,6	30	75	99,8
0,6	364,6	10,6	9,9	33	70	99,7
0,8	312,3	20,0	18,2	27	50	99,8

Таблица Б.7 – Результаты экспериментальных исследований очистки имитатора СГВ (с использованием МС «Адажио») на ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) при постоянной концентрации МС ($C_{MC} = 120 \text{ г/л}$; $X\Pi K_{ucx. C\Gamma B} = 16020 \text{ мгO}_2/дм^3$; $Y \ni \Pi_{ucx. C\Gamma B} = 8230 \text{ мкСм/см}$)

Р _{раб}	$Q_{\scriptscriptstyle \mathrm{BMX}}$	Q_{ϕ}	$Q_{\phi \ yд}$	$X\Pi K_{\phi}$	УЭΠф	фн
МПа	л/ч	л/ч	л/(м²⋅ч)	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
0,4	387,9	4,0	3,7	-	-	-
0,6	368,5	5,8	5,2	77	171	99,6
0,8	319,1	13,1	11,9	54	102	99,7

Таблица Б.8 – Результаты экспериментальных исследований очистки имитатора СГВ (с использованием МС «Адажио») на ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) при постоянной концентрации МС ($C_{MC} = 160 \text{ г/л}$; $X\Pi K_{ucx. C\Gamma B} = 24500 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$; $Y \ni \Pi_{ucx. C\Gamma B} = 10540 \text{ мкСм/см}$)

$P_{pa\delta}$	$Q_{\scriptscriptstyle m BMX}$	Q_{Φ}	\mathbf{Q}_{Φ} уд	$X\Pi K_{\phi}$	$У Э \Pi_{\phi}$	фн
МПа	л/ч	л/ч	л/(м²∙ч)	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
0,7	353,0	4,9	4,5	147	245	99,5
0,8	324,0	6,6	6,0	111	201	99,6

Таблица Б.9 – Результаты экспериментальных исследований очистки имитатора СГВ (с использованием МС «Адажио») на ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) при постоянной концентрации МС ($C_{MC} = 200 \text{ г/л}$; ХПК_{исх. СГВ} = 26928 мгО₂/дм³; УЭП_{исх. СГВ} = 13050 мкСм/см)

Р _{раб}	$Q_{\scriptscriptstyle \mathrm{BMX}}$	Q_{Φ}	$Q_{\phi \ yд}$	$X\Pi K_{\phi}$	УЭΠф	фн
МПа	л/ч	л/ч	л/(м²∙ч)	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
0,8	332,7	4,1	3,7	156	478	99,6
0,9	278,5	5,8	5,2	163	345	99,6

Таблица Б.10 – Результаты проверки производительности ОМ НаноРО КСН 2521Т (модуль №1) на дистиллированной воде перед экспериментом с концентрированием имитатора СГВ при использовании МС «Адажио»

Р _{раб} , МПа	$Q_{ m выx}, { m \Pi}/{ m q}$	Qф, л/ч
0,20	442,1	5,8
0,40	391,7	12,7
0,60	354,0	20,2
0,80	304,6	27,8

Таблица Б.11 – Результаты экспериментальных исследований по очистке и концентрированию имитатора СГВ (с использованием МС «Адажио») на ОМ НаноРО КСН 2521Т при рабочем давлении, равном 0,8 МПа

Номер цикла конц.	С _{МС} конт. расч.	С _{МС} конт. расч. кон	С _{МС} конт. расч. ср	$Q_{\scriptscriptstyle ext{BMX}}$	Q_{Φ}	Q_{Φ} уд	V _{отобр}	ХПК исх р-ра в конце цикла	УЭП исх р-ра в конце цикла	$X\Pi K_{\Phi \ B}$ конце цикла	УЭП _{ф в} конце цикла	Селект. фн
-	г/л	г/л	г/л	л/ч	л/ч	$\pi/(M^2 \cdot \mathbf{q})$	Л	$M\Gamma O_2/д M^3$	мкСм/см	$M\Gamma O_2/дM^3$	мкСм/см	%
1	5,0	10,7	7,9	310,4	19,6	17,8	4,0	725	1076	10	6	98,7
2	10,7	20,7	15,7	302,7	24,7	22,5	7,0	-	1862	-	9	-
3	18,7	40,7	29,7	314,3	19,6	17,8	14,0	-	3262	-	14	-
4	36,3	50,7	43,5	305,6	23,7	21,5	7,0	6991	3878	18	19	99,7
5	43,9	60,1	52,0	301,7	22,6	20,5	7,5	-	4500	-	32	-
6	53,2	80,1	66,7	295,9	23,5	21,3	14,0	-	5667	-	45	-
7	70,7	100,1	85,4	302,7	18,7	17,0	14,0	12400	6877	35	60	99,7
8	85,9	120,3	103,1	302,7	17,4	15,8	16,0	ı	8124	ı	80	-
9	105,9	140,3	123,1	298,8	16,5	15,0	14,0	18000	9200	52	104	99,7
10	120,0	160,7	140,3	308,5	12,2	11,1	17,0	21186	10870	61	129	99,7
11	137,3	180,5	158,9	303,6	10,7	9,7	17,0	24056	11660	93	181	99,6
12	154,2	200,5	177,4	311,4	8,8	7,8	17,5	25344	12410	111	197	99,6
13	171,2	220,6	195,9	309,4	7,9	7,2	18,0	28258	13170	111	248	99,6
14	188,3	240,2	214,2	306,5	6,2	5,6	18,0	-	-	-	301	-
15	210,8	250,2	230,5	254,3	8,4	7,6	7,0	32636	14780	86	289	99,7
16	213,4	260,3	236,9	236,8	5,3	4,8	12,0	-	15590	-	402	-
17	228,4	280,3	254,4	229,1	4,5	4,1	14,0	-	15740	148	440	-
18	245,9	300,3	273,1	226,2	4,5	4,1	14,0	-	16220	157	430	-
19	265,0	351,4	308,2	209,7	2,7	2,4	9,0	-	18510	279	1366	-

Обозначения в таблице Б.11: $C_{MC \text{ конт. расч. нач}}$, $C_{MC \text{ конт. расч. кон}}$ — концентрация MC «Адажио» в циркуляционном контуре в начале и в конце цикла очистки и концентрирования соответственно;

 $C_{MC \text{ конт. расч. cp}}$ – среднее значение концентрации MC «Адажио» в циркуляционном контуре за цикл концентрирования;

 $Q_{\text{вых}}$ – расход очищаемого раствора на выходе из аппарата;

 Q_{ϕ} – производительность обратноосмотического аппарата по фильтрату;

 $Q_{\varphi \, \text{уд}} - \text{удельная}$ производительность обратноосмотического аппарата по фильтрату;

 $V_{\text{отобр.}}$ – количество полученного фильтрата;

ХПК _{исх р-ра в конце цикла}; УЭП _{исх р-ра в конце цикла} – химическое потребление кислорода (бихроматная окисляемость) и удельная электропроводность очищаемого раствора в циркуляционном контуре в конце цикла очистки и концентрирования соответственно;

 $X\Pi K_{\varphi}$ в конце цикла, $Y \ni \Pi_{\varphi}$ в конце цикла – химическое потребление кислорода (бихроматная окисляемость) и удельная электропроводность фильтрата в конце цикла очистки и концентрирования соответственно;

Селект. ϕ_H – наблюдаемая селективность, определяемая по бихроматной окисляемости.

Приложение В

Программный код на языке программирования Python для расчета производительности обратноосмотического аппарата по методике расчета с применением аналогии между массообменом и теплообменом

```
Р раб = input ('Укажите рабочее давление в аппарате, атм: ')
P_pa\delta = float (P_pa\delta)
С исх = input ('Укажите исходную концентрацию моющего средства, r/\pi: ')
C \text{ ucx} = \text{float}(C \text{ ucx})
К адс = input ('Укажите коэффициент проницаемости по воде без примесей: ')
K_aдc = float (K_aдc)
K1 дист = (-0.015) * C исх + K адс
K1 дист = str (K1 дист)
print ('Коэффициент проницаемости мембранны при данной концентрации: K1 = ' + K1 дист)
K1 дист = float (K1 дист)
О вх = input ('Укажите производительность циркуляционного насоса, л/ч: ')
Q Bx = float (Q Bx)
C вх вых ср 1 = C исх
Pi расч беск 1 = 0.031 * C вх вых ср 1
deltaP эф общ 1 = P раб - Pi расч беск 1
Q оч уд расч беск 1 = K1 дист * deltaP эф общ 1
if Q оч уд расч беск 1 < Q вх:
  Q оч уд расч беск 1 = Q оч уд расч беск 1
else:
  Q оч уд расч беск 1 = Q оч уд расч беск 1 * 3 / 4
j_2_pacu_1 = C_вx_выx_cp_1 * Q_оu_уд_pacu_беск_1
Q вх вых ср 1 = Q вх -0.5 * Q оч уд расч беск 1 * 1.1
u ср 1 = Q вх вых ср 1/(1000 * 3600 * 0.78 * 10**(-3))
Re cp 1 = (u cp 1 * 2 * 0.67) / (1.01 * 0.001)
Re cp 1 = str (Re cp 1)
print (Re_cp1 = ' + Re_cp_1)
Re_{cp_1} = float (Re_{cp_1})
Pr = 7.02
PrD = 558.0
D = 2.23 * 10**(-9)
f_{ot} = 1 = 1
d \ \ 3 \text{kb} = 2 * 0.67 * 0.001
1 = 0.473
Pe_1xd_3kB_na_1 = Re_cp_1 * Pr * d_3kB / 1
Pe 1xd экв na 1 = str (Pe 1xd экв na 1)
print ('Pe*d_3\kappa B/l = ' + Pe_1xd_3\kappa B_na_1)
Pe_1xd_3\kappa B_na_1 = float (Pe_1xd_3\kappa B_na_1)
if Pe_1xd_3\kappa B_na_1 < 70:
  Nu0_1 = 7.5
else:
  Nu0_1 = 1.85 * (Re_{cp_1} * Pr * d_{3kB} / 1) * *0.33
Nu0 1 = str (Nu0 1)
print ('Nu0 = ' + Nu0_1)
```

```
Nu0_1 = float (Nu0_1)
NuD_1_{III} = Nu0_1 * f_{OT}_{B_1} * (PrD / Pr) * *0.33
betta_1 = NuD_1_шт * D / d_3кв
deltaC_\kappaaH_1 = j_2_pac4_1 / (betta_1 * 1000 * 3600)
C гр теор 1 = C вх вых ср 1 + deltaC кан 1
Pi гр теор 1 = 0.031 * C гр теор 1
deltaP эф мемб 1 = P раб - Pi гр теор 1
Q оч уд расч 1 = K1 дист * deltaP эф мемб 1
Q оч уд расч 1 = str(Q) оч уд расч 1)
print (Промежуточный результат: Q оч уд расч 1 = ' + Q оч уд расч 1)
Q оч уд расч 1 = \text{float}(Q) оч уд расч 1)
C вх вых cp 2 = 0.5 * C_ucx * (1 + Q_вx / (Q_вx - Q_ou_уд_pacu_1 * 1.1))
Q вх вых ср 2 = Q вх - 0.5 * Q оч уд расч 1 * 1.1
u ср 2 = Q вх вых ср 2/(1000 * 3600 * 0.78 * 10**(-3))
Re cp 2 = (u cp 2 * 2 * 0.67) / (1.01 * 0.001)
Pe 2xd экв na 1 = \text{Re cp } 2 * \text{Pr * d экв } / 1
Pe 2xd экв na 1 = str (Pe 2xd экв na 1)
print (Pe*d_3\kappa B/l = ' + Pe_2xd_3\kappa B_na_l)
Pe 2xd экв na 1 = float (Pe 2xd экв na 1)
if Pe_2xd_3\kappa B_na_1 < 70:
  Nu0_2 = 7.5
else:
  Nu0_2 = 1.85 * (Re_cp_2 * Pr * d_3kB / 1)**0.33
B 2 = (C вх вых ср 1 - C гр теор 1) / C гр теор 1
f_{OT}B_2 = (((1 + B_2)^{**}0.5 - 1) / (0.5 * B_2))^{**}2
Nu0_2 = str (Nu0_2)
print ('Nu0 = ' + Nu0_2)
Nu0_2 = float (Nu0_2)
NuD_2_{IIIT} = NuO_2 * f_{OT}_{B_2} * (PrD / Pr) * *0.33
betta_2 = NuD_2_шт * D / d_3кв
deltaC_кан_2 = C_вх_вых_ср_2 * Q_оч_уд_расч_1 / (betta_2 * 1000 * 3600)
C гр теор 2 = C вх вых ср 2 + deltaC кан 2
Pi гр теор 2 = 0.031 * C гр теор 2
deltaP эф мемб 2 = P раб - Pi гр теор 2
Q оч уд расч 2 = K1 дист * deltaP эф мемб 2
Q оч уд расч 2 = str(Q) оч уд расч 2)
print ('Промежуточный результат: Q оч уд расч 2 = ' + Q оч уд расч 2)
Q оч уд расч 2 = \text{float}(Q) оч уд расч 2)
Oshibka_2 = ((Q_o_{y_d}pac_{2} - Q_o_{y_d}pac_{1}) / Q_o_{y_d}pac_{1}) * 100
Oshibka 2 = str (Oshibka 2)
print ('Промежуточный результат: Точность приближения (%) = ' + Oshibka 2)
Oshibka_2 = float (Oshibka_2)
if abs(Oshibka_2) <= 5:
  Q_{0} - y_{2} - pac_{2} = str (Q_{0} - y_{2} - pac_{2})
  print ('Удельная производительность аппарата (\pi/4): = ' + Q оч уд расч 2)
  Q оч уд расч 2 = \text{float}(Q) оч уд расч 2)
  Q оч 2 = Q оч уд расч 2 * 1.1
  Q ou 2 = str(Q \text{ ou } 2)
```

```
print ('Производительность аппарата (\pi/\Psi): = ' + Q оч 2)
  Oshibka_2 = str (Oshibka_2)
  print ('Точность приближения (%): = ' + Oshibka 2)
  i = 2
  i = str(i)
  print ('Количество приближений: '+ i)
else:
  i = 2
  Q_оч_уд_расч = Q_оч_уд_расч_2
  C вх вых cp = C вх вых cp = 2
  C гр теор = C гр теор 2
  Oshibka = Oshibka_2
  while abs(Oshibka) > 5:
       Q оч уд расч 3 = Q оч уд расч
       C_Bx_Bыx_cp_3 = C_Bx_Bыx_cp
       C гр теор 3 = C гр теор
       C вх вых cp = 0.5 * C исх * (1 + Q) вх / (Q) вх - Q оч уд расч 3 * 1.1)
       j \ 2 \ pacч = C \ вх \ вых \ cp * Q \ oч \ уд \ pacч \ 3
       Q_Bx_Bыx_cp = Q_Bx - 0.5 * Q оч уд расч 3 * 1.1
       u cp = Q вх вых <math>cp / (1000 * 3600 * 0.78 * 10**(-3))
       Re cp = (u cp * 2 * 0.67) / (1.01 * 0.001)
       Pe xd экв na l = \text{Re cp * Pr * d экв / l}
       Pe xd экв na 1 = str (Pe xd экв na 1)
       print ('Pe*d_3kB/l = ' + Pe_xd_3kB_na_l)
       Pe_xd_3\kappa B_na_1 = float (Pe_xd_3\kappa B_na_1)
       if Pe_xd_Экв_na_1 < 70:
         Nu0 = 7.5
       else:
          Nu0 = 1.85 * (Re_cp * Pr * d_3 KB / 1) **0.33
          Nu0 = str(Nu0)
          print ('Nu0 = ' + Nu0)
         Nu0 = float (Nu0)
          B = (C_Bx_Bыx_cp_3 - C_гp_teop_3) / C_гp_teop_3
          f_{OT}B = (((1 + B)**0.5 - 1) / (0.5 * B))**2
          NuD_{IIIT} = Nu0 * f_{OT_B} * (PrD / Pr)**0.33
          betta = NuD шт * D/d экв
          deltaC_\kappaaH = j_2_pac4 / (betta * 1000 * 3600)
          C_{p} теор = C_{bx} вых_cp_3 + deltaC_{kah}
          Pi гр теор = 0.031 * C гр теор
          deltaP_{\rightarrow}\phi_{mem}\delta = P раб - Pi гр теор
          Q оч уд расч = K1 дист * deltaP эф мемб
          Q оч уд расч = str(Q) оч уд расч)
          print ('Промежуточный результат: Q оч уд расч (\pi/4) = ' + Q оч уд расч)
          Q оч уд расч = float (Q оч уд расч)
          Oshibka = ((Q \text{ оч уд расч - } Q \text{ оч уд расч 3}) / Q \text{ оч уд расч 3}) * 100
          Oshibka = str (Oshibka)
          print ('Промежуточный результат: Точность приближения (%) = ' + Oshibka)
```

```
Oshibka = float (Oshibka)
       if i <= 50:
         i = i + 1
         Q_{0}-y_{2}-y_{3}=Q_{0}-y_{2}-y_{3}-y_{3}
         C_Bx_Bыx_cp_3 = C_Bx_Bыx_cp
         C_{p_{\text{rp}}} = C_{p_{\text{rp}}}
       else:
         print ('Ошибка! Количество циклов превышает 50')
Q_o_y_p_a_v = str(Q_o_y_p_a_v)
print ('Удельная производительность аппарата (л/ч): = ' + Q оч уд расч)
Q оч уд расч = float (Q оч уд расч)
Q_{oq} pacч = Q_{oq} уд_расч * 1.1
Q оч расч = str (Q оч расч)
print ('Производительность аппарата (л/ч): = ' + Q_оч_расч)
Oshibka = str (Oshibka)
print ('Точность приближения (%): = ' + Oshibka)
i = str(i)
print ('Количество приближений: '+i)
```

Приложение Г

Расчет затрат массы на осуществление индивидуальных гигиенических процедур и стирку

общая выводимая масса

(3 члена экипажа, 1 год)

Количество необходимых СЛГ и одежды: $844,42 \text{ кг } (V = 1045,05 \text{ дм}^3 * 3 \text{ чел} = 3135,15 \text{ дм}^3)$ MC = Аэлита 1 бут (0,70 кг/4) в мес. на чел: 0,70/4 * 12 мес. * $3 \text{ чел} = 6,3 \text{ кг } (V = 23,4 \text{ дм}^3)$.

Вода (инд. проц.): 7.82 * 1.25 * 3 чел = 29.33 кг (V = 29.33 дм³ * 1.52 чел = 44.58 дм³)

Итого: **880,05 кг**

Объем СЛГ и одежды (3 чел 1 год): 3722,22 + 23,4 + 44,58 = 3790,20 дм³

Г.1 Расход воды и затраты массы при условии, что на космической станции осуществляются водные процедуры (без стирки): на борту умывальник и система СРВ-СГ (3 члена экипажа, 1 год)

Расход воды [умывание (мытье лица, полоскание рта), мытье рук]: 2,2 л/(чел·сут).

Всего необходимо воды: 2,2*365*3 чел = 2409 л(кг).

Система СРВ-СГ

Коэффициент извлечения чистой воды в системе СРВ-СГ: 0,97.

Сконцентрированный остаток: 72,27 кг. – Масса остатка с ЕДВ 72,27*1,25=90,34 кг.

Масса системы СРВ-СГ 130 кг. + $3И\Pi$ 10% = 130 + 13 = 143 кг.

Среднесуточная мощность СРВ-СГ 24 Вт. Эквивалентная масса СЭП и СТР 24 кг.

Установочная масса СРВ-СГ: 130 + 24 = 154 кг.

Количество замен фильтров СРВ-СГ (2409-2400):2400 \approx 0 замен (1 замена в год);

Сорбционный фильтр: $(2409-1000)/1000 \approx 2$ замены

Удельные затраты массы на эксплуатацию системы СРВ-СГ: (13 кг (ЗИП СРВ-СГ) + 17,5*2=35,0 (сорбционный фильтр СРВ-СГ) + 6*0 (фильтры)) / (2409*0,97) = 48/2336,73 = 0,021 кг/ л рег. воды.

ЗМ на обслуживание системы: 48,0 кг/ год.

Устройство для мытья рук (см. табл. Г.1*)

Масса оборудования: умывальник 8 кг. + сепаратор 14,5 кг + вентилятор 5 кг + нагреватель 2 кг + компрессор 4 кг + УФО 2 кг + ЗИП 10% = 35,5 + 3,55 = 39,05 кг.

Среднесуточная мощность оборудования для мытья рук и лица (длительность помывки 5 мин, число процедур в сутки 8): 66Вт (сепаратор)*0,67 ч + 390Вт (нагреватель)*1,25 ч + 50Вт (компрессор)*0,67 ч + 30Вт (УФО)*0,67 ч \approx (585,32* 3 чел)/24 ч \approx 73,17 Вт.

Эквивалентная масса СЭП и СТР 73,17 кг.

Установочная масса оборудования для помывки: 35,5+73,17=108,67 кг.

Количество замен оборудования: сепаратор (14,5 кг) — замена раз в год + компрессор (4 кг) — замена раз в год = 18,5 кг/год. (Число замен: 0 замен): 18,5*0 = 0 кг (1 замена в год в последующие годы)

Удельные затраты массы на эксплуатацию оборудования для помывки:

 $(3,55\ \mathrm{kr}\ (3И\Pi\ \mathrm{oборуд.}) + 0\ \mathrm{kr}\ (заменяемое\ \mathrm{oборуд.}))$ / $2409 = 3,55/\ 2409 = 0,002\ \mathrm{kr}/\ \pi$ выданной воды.

ЗМ на обслуживание оборудования: 3,55 кг/ за первый год.

Потери воды на испарение: 0,05 л/(чел·сут).

Необходимый запас воды при регенерации в системе СРВ-СГ:

2409*0,03+0,05*1год*365*3чел = $72,27+54,75\approx 127,02$ л.

С учетом массы ЕДВ: 127,02*1,25 = 158,78 кг.

Необходимый запас моющих средств (5 гМС/л): $0{,}005$ кгМС * 2409 кг воды $\approx 12{,}05$ кг.

Удельные затраты массы на эксплуатацию системы СРВ-СГ и оборудования для умывания: (48 кг (3M CPB-CΓ) + 3,55 (3M оборуд.)) / (2409*0,97) = 51,55/2336,73 = 0,022 кг/ л рег. воды (0,030 кг/ л рег. воды в последующие годы).

<u>ЗМ на проведение сан-гиг. процедур и регенерацию воды (без учета испарения):</u> (82,33 кг (влажн. полотенца) + 3,6 кг (сухие салфетки) + 41,4 кг (сухие полотенца)) *3чел* 1 года + 48 кг (СРВ-СГ) + 3,55 (22,05) кг (умывальник) + 90,34 (вода + ЕДВ) + 12,05 кг МС = $\underline{535,93}$ кг (3 чел* 1 год).

<u>Общая выводимая масса:</u> 535,93 кг (3M) + 154 кг (сист. СРВ-СГ) + 108,67 кг (умывальник) + 216,42 кг (одежда) + 73 кг (нестираемая одежда) = 1088,02 кг > 880,05 кг

Объем оборудования: (480 дм³ (СРВ-СГ) + 480 дм³ * 0,27 = 129,6 дм³ (зап. части по массе) + 480 дм³ * 0,10 = 48 дм³ (ЗИП СРВ-СГ) + 128 дм³ (умывальник) + 0 дм³ (зап. части по массе) + 128 дм³ * 0,1= 12,8 дм³ (ЗИП умывальник)) + 502,32 дм³ (влажн. полотенца) + 502,32 дм³ (сухие полотенца) + 137,32 дм³ (вода в ЕДВ) + 18,32 дм³ (МС в ЕДВ) + 1737,81 дм³ (одежда) + 587,07 дм³ (нестираемая одежда) = 4283,56 > 3790,20 дм³

Общая ежегодная масса доставок в последующие годы: 535,93 кг (3M) + 18,5 кг (доп. замен. части Умывальник) + 216,42 кг (одежда) + 73 кг (нестираемая одежда) = 843,85 кг < 880,05 кг

Общий ежегодный объем доставок в последующие годы: 480 дм 3 * 0,27 = 129,6 дм 3 (зап. части по массе СРВ-СГ) + 480 дм 3 * 0,10 = 48 дм 3 (ЗИП СРВ-СГ) + 128 дм 3 * 0,14 = 17,92 дм 3 (зап. части по массе - умывальник) + 128 дм 3 * 0,1= 12,8 дм 3 (ЗИП умывальник)) + 502,32 дм 3 (влажн. полотенца) + 502,32 дм 3 (сухие полотенца) + 137,32 дм 3 (вода в ЕДВ) + 18,32 дм 3 (МС в ЕДВ) + 1737,81 дм 3 (одежда) + 587,07 дм 3 (нестираемая одежда) = 3693,48 < 3790,20 дм 3

Г.2 Расход воды и затраты массы при условии, что на космической станции осуществляются водные процедуры (без стирки):

на борту умывальник, душевая кабина и система СРВ-СГ

(3 члена экипажа, 1 год)

Расход воды: 6 л/(чел⋅сут).

Всего необходимо воды: 6*365*1 год* 3 чел = 2190*1 год* 3 чел = 6570 л(кг)

Система СРВ-СГ

Коэффициент извлечения чистой воды в системе СРВ-СГ: 0,97.

Сконцентрированный остаток: 197,1 кг. – Macca остатка с ЕДВ 197,1*1,25 = 246,38 кг.

Масса системы СРВ-СГ 130 кг. + $3И\Pi$ 10% = 130 + 13 = 143 кг.

Среднесуточная мощность СРВ-СГ 24 Вт. Эквивалентная масса СЭП и СТР 24 кг.

Установочная масса СРВ-СГ: 130 + 24 = 154 кг.

Количество замен фильтров СРВ-СГ (6570 - 2400):2400 = 2 замены;

БКО (сорбционный фильтр) $(6570-1000)/1000 \approx 6$ замен

Удельные затраты массы на эксплуатацию системы СРВ-СГ: (13 кг (ЗИП СРВ-СГ) + 17,5*6=105 кг (БКО СРВ-СГ)) + 6*2 (фильтры) / (6570*0,97) = 130/6372,9 = 0,020 кг/ л рег. воды.

ЗМ на обслуживание системы: 130 кг/ год.

Умывальник + душевая кабина (см. табл. Г.2)

Масса оборудования: умывальник 8 кг. + душевая кабина 45 кг.(с учетом сепаратора, вентилятора, нагревателя, компрессора, УФО) + 3ИП 10% = 8 + 45 + 5, 3 = 58, 3 кг.

Среднесуточная мощность оборудования для помывки (длительность СГП 50 мин / (чел·сут)): 66Вт (МНР)*0,83 ч + 390Вт (нагреватель)*1,25 ч + 50Вт (компрессор)*0,83 ч + 30Вт (УФО)*0,83 ч \approx 608,68 * 3 чел /24 \approx 76,09 Вт. Эквивалентная масса СЭП и СТР 76,09 кг.

Установочная масса оборудования для помывки: 53 + 76.09 = 129.09 кг.

Количество замен оборудования: сепаратор (14,5 кг) — замена раз в год (0 замен) + щетка со шлангом (2 кг) — замена 4 раза в год (2 кг*4 зам* 1 год = 8 кг) + компрессор (4 кг) — замена раз в год (0 замен) = 8 кг/ год.

Удельные затраты массы на эксплуатацию оборудования для помывки:

 $(5,3 \ \text{кг} (3И\Pi \ \text{оборуд.}) + 8 \ \text{кг} (заменяемое \ \text{оборуд.})) / 6570 = 13,3/6570 = 0,002 \ \text{кг/} \ \pi \ \text{выд.}$ воды.

3М на обслуживание оборудования: 13,3 кг/ 1 год.

Потери воды на испарение: 0,1 л/(чел·сут).

Необходимый запас воды при регенерации в системе СРВ-СГ:

6570*0,03+0,1*3 чел*365*1 год = $197,1+109,5\approx306,6$ л/(3 чел· 1 год).

С учетом массы ЕДВ: $306,6*1,25 = 383,25 \text{ кг/}(3 \text{ чел} \cdot 1 \text{ год}).$

Необходимый запас моющих средств (5 гМС/л): 0,005 кгМС * 6570 кг воды * 1,25 (ЕДВ) \approx 41,06 кг.

Удельные затраты массы на эксплуатацию системы СРВ-СГ и оборудования для помывки:

(13 кг (ЗИП СРВ-СГ) + 17,5*6=105 кг (сорбционный фильтр СРВ-СГ) + 12 кг (фильтры) + 5,3 кг (ЗИП оборуд.) + 8 кг (заменяемое оборуд.)) / (6570*0.97) = 143.3/6372.9 = 0.023 кг/ л рег. воды.

<u>ЗМ на проведение сан-гиг. процедур и регенерацию воды (без учета испарения):</u> (41,4 кг (сухие полотенца) + 3,6 кг (сухие салфетки)) * 1 год * 3 чел + 130 кг (СРВ-СГ) + 13,3 кг (умывальник, душ) + 246,38 кг воды + 41,06 (МС) = $\underline{565,74 \text{ кг}}/(3 \text{ чел} \cdot 1 \text{ год})$.

<u>Общая выводимая масса:</u> 565,74 кг (3M) + 154 кг (сист. СРВ-СГ) + 129,09 кг (умывальник + душ) + 216,42 кг (одежда) + 73 кг (нестираемая одежда) = 1138,25 кг > 880,05 кг

Объем оборудования: (480 дм³ (СРВ-СГ) + 480 дм³* 0,9 = 432 дм³ (сменные части по массе) + 480 дм³* 0,1 = 48 дм³ (ЗИП СРВ-СГ) + (128 + 931 дм³ (умывальник + душ)) + 1059* 0,008= 8,47 дм³ (сменные части по массе) + 1059* 0,005= 5,3 дм³ (ЗИП умывальник + душ)) + 609,24 дм³ (сухие полотенца и салфетки) + 374,50 дм³ (вода в ЕДВ) + 62,41 дм³ (МС в ЕДВ) + 1740,45 дм³ (одежда) + 587,07 дм³ (нестираемая одежда) = 5406,44 дм³ > 3790,20 дм³

Общая ежегодная масса доставок в последующие годы: $565,74~\rm kr$ (3M) + 0 кг (доп. замен. части Умывальник) + $18,5~\rm kr$ (доп. замен. части Душ) + $216,42~\rm kr$ (одежда) + $73~\rm kr$ (нестираемая одежда) = $873,66~\rm kr$ < $880,05~\rm kr$

Общий ежегодный объем доставок в последующие годы: 480 дм³* 0,9 = 432 дм³ (сменные части по массе СРВ-СГ) + 480 дм³* 0,1 = 48 дм³ (ЗИП СРВ-СГ) + 0 дм³ (сменные части по массе – ум.) + 931 дм³* 0,41 = 382,74 дм³ (сменные части по массе – душ) + 1059* 0,005= 5,3 дм³ (ЗИП умывальник + душ)) + 609,24 дм³ (сухие полотенца и салфетки) + 374,50 дм³ (вода в ЕДВ) + 62,41 дм³ (МС в ЕДВ) + 1740,45 дм³ (одежда) + 587,07 дм³ (нестираемая одежда) = 4250,18 дм³ > 3790,20 дм³

Таблица Г.1 – Предполагаемое оборудование для приема водных процедур

Наименование	Масса, кг	Мощность при напряжении 30 В,	Срок службы
		Вт	
Сепаратор	14,5	66	1 год (13140 ч)
Нагреватель	2	390	5 лет
Компрессор	4	50	1 год
УФО	2	30	1 год
Кабина	20	-	5 лет
Умывальник	8	-	5 лет

Таблица Г.2 – Нормы потребления воды на различные санитарно-гигиенические процедуры

Наименование СГП	Минимальный объем	Частота	Еженедельное
	воды на 1 процедуру,	проведения	потребление воды,
	л/чел	процедур*	л/чел
1. Душ			
Мужчина	4,50	2 раза в неделю	9,00
Женщина	6,50		13,00
2. Мытье головы			
Мужчина	0,50	2 раза в неделю	1,00
Женщина	0,70		1,40
3. Мытье ног	0,35 - 0,70	5 раз в неделю	3,50
4. Обработка паховой			
складки:		5 non n Horiotto	
Мужчина	0,30	5 раз в неделю	1,50
Женщина	0,50		2,50
5. Умывание (мытье лица, полоскание рта)	0,10 - 0,35	4 раза в день	9,80
6. Мытье рук	0,10-0,20	4 раза в день	5,60
		∑ Мужчина	30,4 л/ (чел*нед)
		∑ Женщина	35,8 л/ (чел*нед)
		∑ Мужчина	4,34 л/ (чел*сут)
		∑ Женщина	5,11 л/ (чел*сут)
			(2,85-9,40 n/
			(чел*сут))≈ 6 л/
			(чел*сут)

Г.3 Расход воды и затраты массы при условии, что на космической станции осуществляется стирка (без водных процедур): на борту стиральная машина и система <u>СРВ-СГ</u> (3 члена экипажа, 1 год)

Количество стираемых текстильных материалов: 0,321 кг/(чел·сут).

Расход воды на стирку 1 кг сухого белья: 10 л.

Всего необходимо воды: 10*117,14*3 чел * 1 год = 3514,2 л/(3 чел· 1 год).

Система СРВ-СГ

Коэффициент извлечения чистой воды в системе СРВ-СГ: 0,97.

Остаток: 105,43 кг. – Масса остатка с ЕДВ 105,43*1,25 = 131,78 кг.

Масса системы СРВ-СГ 130 кг. + ЗИП 10% = 130 + 13 = 143 кг.

Среднесуточная мощность СРВ-СГ 24 Вт. Эквивалентная масса СЭП и СТР 24 кг.

Установочная масса СРВ-СГ: 130 + 24 = 154 кг.

Количество замен фильтров СРВ-СГ (3514,2-2400):2400 = 1 замена;

Сорбционный фильтр: $(3514,2-1000)/1000 \approx 3$ замены

Удельные затраты массы на эксплуатацию системы СРВ-СГ: (13 кг (ЗИП СРВ-СГ) + +17,5*3=52,5 (сорбционный фильтр СРВ-СГ) + 6кг* 1) / (3514,5*0,97) = 71,5/3409,07=0,021 кг/л рег. воды.

ЗМ на обслуживание системы: 71,5 кг/ 1 год.

Стиральная машина СМ

Macca CM = 50 кг.

Среднесуточная мощность СМ (длительность стирки и сушки 10 часов): 800 Bt/24 = 33,3 Bt. Эквивалентная масса СЭП и СТР 33,3 кг.

Установочная масса СМ: 50.0 + 33.3 = 83.3 кг.

Количество замен оборудования: в течение 3 лет замен не предполагается (кроме механических фильтров): 2 кг/год (воздушные фильтры).

Удельные затраты массы на эксплуатацию СМ: 2 кг (фильтры) / (117,14*3 чел*1 год)*15/14 = 0,005 кг/ кг отстиранного белья.

3M: 2 кг/год (воздушные фильтры): 2 кг (фильтры) = 2 кг/1 год

Потери воды (остаточная влага в текстильных материалах после сушки): 0,1 л/(кг сухого белья). Необходимый запас воды при регенерации в системе СРВ-СГ:

3514,2*0,03+0,1*117,14*3 чел * 1 год = 105,43+35,14=140,57 л/(чел·год).

С учетом массы ЕДВ: $140,57*1,25 = 175,72 \text{ кг/}(3 \text{ чел} \cdot 1 \text{ год}).$

Необходимый запас моющего средства: 117,14 кг белья * 3 л(кг) воды* 0,005 кг МС/л* 3 чел* 1 год = 5,27 кг/(3 чел* 1 год)* 1,25 = 6,59 кг.

Удельные затраты массы на эксплуатацию системы СРВ-СГ и стиральной машины:

(13 кг (ЗИП СРВ-СГ) + 17,5*3=52,5 (сорбционный фильтр СРВ-СГ) + 6 кг (фильтры) + 2 кг (фильтры СМ)) / (3514,2*0,97) = 73,5/3408,77 = 0,022 кг/ л рег. воды.

Примем цикл использования полотенец и одежды 14 стирок.

<u>ЗМ на стирку и регенерацию воды:</u> 71,5 кг (СРВ-СГ) + 2 кг (СМ)+ 6,59 кг МС + 131,78 кг воды = **211,87** кг/(3 чел· 1 год).

Общая выводимая масса: 117,14* 1 год* 3 чел/15=23,43 кг (текст. матер.) + 211,87 кг (3M) + 154 кг (сист. СРВ-СГ) + 83,3 кг (СМ) + 420 кг (влажн. полотенца и салфетки) + 73 кг (нестираемая одежда) = 965,6 кг > 880,05 кг

Объем оборудования: (480 дм 3 (СРВ-СГ) + 480 дм 3 * 0,45 = 216 дм 3 (замен. части по массе) + 480 дм 3 * 0,1 = 48 дм 3 (ЗИП СРВ-СГ) + 288 дм 3 (СМ) + 288 дм 3 * 0,04 = 11,52 дм 3 (замен. части по массе СМ) + 116,03 дм 3 (одежда) + 40,62 (сух. полотенца и салфетки) + 200,31 дм 3 (вода в ЕДВ) + 10,02 дм 3 (МС в ЕДВ) + 785,46 дм 3 (влажн. полотенца и салфетки) + 587,07 дм 3 (нестираемая одежда) = 2783,03 дм 3 < 3790,20 дм 3

Общая ежегодная масса доставок в последующие годы: 117,14* 1 год* 3 чел/15=23,43 кг (текст. матер.) + 211,87 кг (3M) + 420 кг (влажн. полотенца и салфетки) + 73 кг (нестираемая одежда) = 728,3 кг < 880,05 кг

Общий ежегодный объем доставок в последующие годы: 480 дм 3 * 0,45 = 216 дм 3 (замен. части по массе СРВ-СГ) + 480 дм 3 * 0,1 = 48 дм 3 (ЗИП СРВ-СГ) + 288 дм 3 * 0,04 = 11,52 дм 3 (замен. части по массе СМ) + 116,03 дм 3 (одежда) + 40,62 (сух. полотенца и салфетки) + 200,31 дм 3 (вода в ЕДВ) + 10,02 дм 3 (МС в ЕДВ) + 785,46 дм 3 (влажн. полотенца и салфетки) + 587,07 дм 3 (нестираемая одежда) = 2015,03 дм 3 < 3790,20 дм 3

4. Расход воды и затраты массы при условии, что на космической станции осуществляются водные процедуры и стирка: на борту умывальник, душевая кабина, стиральная машина и система СРВ-СГ (3 члена экипажа, 1 год)

Всего необходимо воды: 6*365*3 чел.* 1 год + 3514,2 = 10084,2 л/(3 чел· 1 год).

Система СРВ-СГ

Коэффициент извлечения чистой воды в системе СРВ-СГ: 0,97.

Сконцентрированный остаток: 302,53 кг. – Macca остатка с ЕДВ $302,53*1,25 \approx 378,16$ кг.

Масса системы СРВ-СГ 130 кг + $3И\Pi$ 10% = 130 + 13 = 143 кг.

Среднесуточная мощность СРВ-СГ 24 Вт. Эквивалентная масса СЭП и СТР 24 кг.

Установочная масса СРВ-СГ: 130 + 24 = 154 кг.

Количество замен фильтров СРВ-СГ (10084,2 - 2400):2400 \approx 4 замены.

Заменяемое оборудование ОО модуль + 2 фильтра $= 6 \times 4 = 24$ кг.

Количество замен БКО (сорбционного фильтра) $(10084,2-1000)/1000 \approx 9$ замен.

Удельные затраты массы на эксплуатацию системы СРВ-СГ: (13 кг (ЗИП СРВ-СГ) + 24 кг (фильтры) + 17,5*9=157,5 (БКО СРВ-СГ)) / (10084,2*0,97) = 194,5/9781,67 = 0,020 кг/ л рег. воды.

ЗМ на обслуживание системы: 194,5 кг/ 1 год.

Устройство для мытья рук + душевая кабина

Масса оборудования: умывальник 8 кг. + душевая кабина 45 кг. + $3И\Pi$ 10% = 8 + 45 + 5,3 = 58,3 кг.

Среднесуточная мощность оборудования для помывки (длительность СГП 50 мин / (чел·сут)): 66Вт (сепаратор)*0,83 ч + 390Вт (нагреватель)*1,25 ч + 50Вт (компрессор)*0,83 ч + 30Вт (УФО)*0,83 ч \approx 608,68* 3 чел/24 \approx 76 Вт. Эквивалентная масса СЭП и СТР 76 кг.

Установочная масса оборудования для помывки: 53 + 76 = 129 кг.

Количество замен оборудования: сепаратор (14,5 кг) — замена раз в год (0 замен) + щетка со шлангом (2 кг) — замена 4 раза в год (2 кг*4* 1 года = 8 кг) + компрессор (4 кг) — замена раз в год (0 замен) = 8 кг/ 1 год.

Удельные затраты массы на эксплуатацию оборудования для помывки:

 $(5,3\ \mathrm{K}\Gamma\ (3\Pi\Pi\ \mathrm{oборуд.}) + 8\ \mathrm{K}\Gamma\ (заменяемое\ \mathrm{oборуд.}))\ /\ (6\ \pi*365*1\ \mathrm{год*}\ 3\ \mathrm{чел}) = 13,3/6570 = 0,002\ \mathrm{K}\Gamma/\ \pi$ выд. воды.

3М на обслуживание оборудования: 13,3 кг/ 1 год.

Стиральная машина СМ

Macca CM = $50 \, \text{кг}$.

Среднесуточная мощность СМ (длительность стирки и сушки 10 часов): 800 Bt/24 = 33,3 Bt. Эквивалентная масса СЭП и СТР 33,3 кг.

Установочная масса CM: 50.0 + 33.3 = 83.3 кг.

Количество замен оборудования: в течение 3 лет замен не предполагается (кроме механических фильтров): 2 кг/год (воздушные фильтры).

Удельные затраты массы на эксплуатацию СМ: 2 кг (фильтры) / (117,14*3 чел*1 год)*15/14 = 0,005 кг/ кг отстиранного белья.

3M: 2 кг/год (воздушные фильтры): 2 кг (фильтры) = 2 кг/ 1 год

Потери воды на испарение: 0,1 л/(чел·сут).

Потери воды (остаточная влага в текстильных материалах): 0,1 л/(кг сухого белья).

Необходимый запас воды при регенерации в системе СРВ-СГ:

10084,2*0,03 + 0,1*3 чел*365*1 год + 0,1*117,14*3 чел*1 год кг = $302,53 + 109,5 + 35,14 \approx 447,17$ л/(3 чел·1 год).

С учетом массы ЕДВ: $447,17*1,25 = 558,97 \text{ кг/}(3 \text{ чел} \cdot 1 \text{ год}).$

Необходимый запас моющего средства (СМ): 117,14 кг белья * 3 л(кг) воды* 0,005 кг МС/л* 3 чел* 1 год = 5,27 кг/(3 чел* 1 год)* 1,25=6,59 кг.

Необходимый запас моющего средства (помывка): $6*\ 365*\ 3$ чел.* 1 год * 0,005 кг МС/л* = 32,85 кг/(3 чел.* 1 год)* 1,25=41,06 кг.

Удельные затраты массы на эксплуатацию системы СРВ-СГ, оборудования для помывки и стиральной машины:

 $(13 \ \text{кг} \ (3ИП \ \text{СРВ-СГ}) + 24 \ \text{кг} \ (фильтры) + 17,5*9=157,5 \ (сорбционный фильтр \ \text{СРВ-СГ}) + 5,3 \ \text{кг} \ (3ИП \ \text{оборуд.}) + 8 \ \text{кг} \ (заменяемое \ \text{оборуд.}) + 2 \ \text{кг} \ (CM)) / (10084,2*0,97) = 209,8/9781,67 = 0,022 \ \text{кг}/\ \text{л рег. воды.}$

Примем цикл использования полотенец и одежды 14 стирок.

<u>3М на эксплуатацию системы СРВ-СГ, оборудования для помывки и стиральной машины:</u> 45*3чел* 1 год/15= 9,0 кг (сух. салфеток и полотенец) + 194,5 кг (СРВ-СГ) + 13,3 кг (умывальник, душ) + 2 кг (СМ)+ 6,59 кг (МС для стирки) + 41,06 (МС для мытья) + 378,16 кг воды = 644,61 кг/(3 чел· 1 год).

Общая выводимая масса: 72,14*3чел* 1 год/15= 14,43 кг (одежда), 644,61 кг (ЗМ) + 154 кг (сист. СРВ-СГ) + 83,3 кг (СМ) + 129 кг (умывальник + душ. кабина) + 73 кг (нестираемая одежда) = 1098,34 > 880,05 кг

Объем оборудования: $(480 \text{ дм}^3 \text{ (СРВ-СГ)} + 480 \text{ дм}^3 * 1,4 = 672 \text{ дм}^3 \text{ (замен. части по массе)} + 480 \text{ дм}^3 * 0,1 = 48 \text{ дм}^3 \text{ (ЗИП СРВ-СГ)} + (128 + 931) \text{ дм}^3 \text{ (умывальник} + душ) + 1059$

 $дм^{3}*$ 0,15 = 158,85 $дм^{3}$ (замен. части по массе) + 1059 $дм^{3}*$ 0,1 = 105,9 $дм^{3}$ (ЗИП умывальник + душ) + 288 $дм^{3}$ (СМ) + 288 $дм^{3}*$ 0,04 = 11,52 $дм^{3}$ (замен. части СМ) + 116,03 $дм^{3}$ (одежда) + 40,62 $дм^{3}$ (сух. полотенца и салфетки) + 459,85 $дм^{3}$ (вода в ЕДВ) + 8,01 $дм^{3}$ (МС в ЕДВ) + 49,93 (МС для мытья) + 587,07 $дm^{3}$ (нестираемая одежда) = 4084,78 $дm^{3}$ > 3790,20 dm^{3}

Общая ежегодная масса доставок в последующие годы: 72,14*3чел* 1 год/15=14,43 кг (одежда) + 644,61 кг (3M) + 0 кг (доп. замен. части Умывальник) + 18,5 кг (доп. замен. части Душ) + 73 кг (нестираемая одежда) = 750,54 < 880,05 кг

Общий ежегодный объем доставок в последующие годы: 480 дм³* 1,4 = 672 дм³ (замен. части по массе СРВ-СГ) + 480 дм³* 0,1 = 48 дм³ (ЗИП СРВ-СГ) + 1059 дм³* 0,15 = 158,85 дм³ (замен. части по массе – ум. + душ) + 931 дм³* 0,41 = 382,74 дм³ (доп. сменные части по массе – душ) + 1059 дм³* 0,1 = 105,9 дм³ (ЗИП умывальник + душ) + 288 дм³* 0,04 = 11,52 дм³ (замен. части СМ) + 116,03 дм³ (одежда) + 40,62 дм³ (сух. полотенца и салфетки) + 459,85 дм³ (вода в ЕДВ) + 8,01 дм³ (МС в ЕДВ) + 49,93 (МС для мытья) + 587,07 дм³ (нестираемая одежда) = 2640,52 дм³ < 3790,20 дм³

Приложение Д



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ»

АО «НИИхиммаш»

Большая Новодмитровская ул., 14,

Москва, 127015 Тел.: 8(495) 685-49-74

Факс: 8(495) 685-09-85 E-Mail: Issd@niichimmash.ru

Nº56-100T 16.04.21

AKT

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Сальникова Николая Александровича

С использованием результатов проведенных Н.А. Сальниковым теоретических и экспериментальных исследований в АО «НИИхиммаш» (с участием Н.А. Сальникова) предложена схема и устройство регенерации санитарногигиенической воды для космической станции, работоспособные в условиях микрогравитации и защищенные патентами РФ на изобретение и полезную модель, разработан и испытан прототип системы регенерации санитарно-гигиенической воды для космической станции. Прототип системы прошел испытания на натурной воде, образующейся при мытье рук, принятии душа и стирке одежды, и показал свою эффективность при высокой степени извлечения (возврата) воды, которая составила 97-98%. Полученные Н.А. Сальниковым результаты являются основой для проектирования перспективных систем регенерации санитарно-гигиенической воды.

По результатам исследований Н.А. Сальниковым разработана методика расчета производительности обратноосмотического аппарата для условий высоких степеней извлечения воды и селективности, основанная на использовании аналогии между массообменом и теплообменом. Методика применяется для расчета мембранной аппаратуры, контактирующей со смесями, содержащими типичные моющие средства общего применения. Разработанная методика внедрена и используется в АО «НИИхиммаш» при проектировании обратноосмотической аппаратуры системы регенерации санитарно-гигиенической воды для космической станции, а также при дипломном проектировании студентов Московского авиационного института на базе АО «НИИхиммаш».

Главный конструктор

А.А. Кочетков