

*На правах рукописи*

**ЛАДЫГИН Константин Владимирович**

**ТЕХНОЛОГИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ  
ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИХ МЕМБРАН ПРИ  
ОБЕЗВРЕЖИВАНИИ ФИЛЬТРАТА ПОЛИГОНОВ  
ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Специальность 03.02.08 – Экология (в химии и нефтехимии)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2016

Диссертационная работа выполнена в федеральном бюджетном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ) на кафедре «Техника переработки отходов и техносферная безопасность»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Гонопольский Адам Михайлович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Ксенофонтов Борис Семенович**  
профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность» Московского государственного технического университета им.Н.Э.Баумана

доктор технических наук, профессор  
**Кручинина Наталья Евгеньевна**  
заведующая кафедрой промышленной экологии  
Российского Государственного  
химико-технологического университета  
им. Д.И. Менделеева

Ведущая организация: **ФГУП Российский научный центр  
«Прикладная Химия» г.Санкт-Петербург**

Защита состоится «27» сентября 2016 г. в 10 часов в ауд. 202 на заседании диссертационного совета Д 212.200.12 при ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 65, корп.1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» и на сайте <http://www.gubkin.ru/>

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.200.12  
кандидат технических наук, доцент

Л.В. Иванова

## **Актуальность темы**

Ни одна из известных на сегодня технологий очистки фильтрата полигонов ТБО, используемых в развитых странах, не может быть применена там, где не организован селективный сбор ТБО: в России, в странах Юго-Восточной Европы, Южной Америки, Азии и др. странах. В России фильтрат полигонов ТБО представляет собой многокомпонентную токсичную жидкость, у которых ХПК и БПК<sub>5</sub> превышают 40000. Для увеличения степени очистки фильтрата до экологического норматива, позволяющего его сброс на ландшафт, необходимы дополнительные стадии очистки. В качестве такой финишной стадии наиболее эффективно применение фильтрации с использованием мембран обратного осмоса. Как правило, для продления срока службы обратноосмотических мембран, фильтрат подвергают предварительной многостадийной физико-химической очистке, но и после этого период эффективной работы мембраны не превышает 2-4 месяцев в теплое время года и 1 месяца - зимой. Так как, важным экологическим требованием к технологическому процессу и оборудованию, работающему на полигоне захоронения ТБО, является ресурс безостановочной работы не менее 1 года, то весьма **актуальной** является задача исследования и разработки эффективных методов очистки обратноосмотических мембран в установках круглогодичной очистки фильтрата полигонов захоронения несортированных ТБО, с целью снижения их негативного влияния на окружающую среду. Также важным аспектом является сокращение использования реагентов при функционировании обратноосмотических систем и тем самым снижение воздействия на окружающую среду, на всех этапах подготовки реагентов, их транспортировки, хранения, аварий и тд.

## **Цель работы**

Изучить влияние ультразвукового воздействия (УЗВ) на обратноосмотические мембраны в установках очистки фильтрата полигонов ТБО;

Определить параметры УЗВ, при которых эффективность очистки мембраны максимальна;

Разработать технологический процесс, подобрать аппаратуру и создать Установку эффективной очистки фильтрата полигонов ТБО для снижения негативного влияния на окружающую среду.

### **Научная новизна**

1. Экспериментально установлена наиболее эффективная технология ультразвукового воздействия и физико-химических методов предварительной очистки фильтрата полигона захоронения несортированных ТБО. Определены режимы удаления загрязнений рулонных обратноосмотических мембран после длительной непрерывной работы при ультразвуковом воздействии на частоте 12-24 кГц, с амплитудой колебаний от 1,0 до 5,0 мкм,
2. Разработана опытно-промышленная аппаратура и технологический процесс финишной очистки фильтрата полигонов ТБО, снижающий их негативное влияние на окружающую среду.

### **Практическая значимость**

1. Разработана и защищена патентом РФ новая конструкция установки для очистки обратноосмотической мембран ультразвуковым воздействием, позволяющая исключить потребность использования серной кислоты, щелочных моющих средств, других химических добавок.
2. Результаты работы апробированы на опытно-промышленной установке очистки фильтрата полигона твердых бытовых отходов «Дмитровский», в Дмитровском районе Московской области, на полигоне ТБО в Адлерском районе г. Сочи (Краснодарский край), на полигоне ТПБО (твердых промышленных и бытовых отходов «Саларьево» (Московская область, д. Саларьево) на Астраханском полигоне ТБО.

### **На защиту выносятся:**

- Результаты экспериментального исследования воздействия ультразвука на физико-химические процессы очистки обратноосмотических мембран при обез-

вреживании фильтрата полигонов несортированных ТБО;

- Новая технологическая схема финишной доочистки фильтрата, включающая блоки обратного осмоса и ультразвуковой очистки мембран;
- Инженерная методика расчета и проектирования технологического процесса очистки мембран ультразвуковым воздействием, учитывающая начальную концентрацию загрязнений и время обработки;

**Достоверность полученных результатов:** подтверждается применением в исследованиях научно-обоснованных методов экспериментальных исследований, использованием поверенных приборов и результатами внедрения.

Результаты данной работы получены при выполнении государственного контракта № 16.525.11.5003 от 25 мая 2011 г. по теме: «Разработка новой комплексной опытно-промышленной технологии для обеспечения нормативной экологической безопасности высоконагруженного полигона захоронения органосодержащих отходов производства и потребления и его санитарно-защитной зоны» в рамках ФЦП Минобрнауки РФ «Разработки и исследования по перспективным направлениям развития технологического комплекса РФ на 2007-2013 годы». По результатам выполнения государственного контракта № 16.525.11.5003 от 25 мая 2011 г. получено положительное заключение заказчика - Минобрнауки РФ.

**Личный вклад:** состоит в проведении экспериментальных исследований, обработке, разработке теоретической модели и проведении расчетов, интерпретации и обобщении полученных результатов, а также в формулировке выводов.

**Апробация работы:**

Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- V Международной конференции «Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток» (ROOGD-2014), 29 октября 2014 г. Московская область, п. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»;
- Всероссийском Форуме «Новейшие технические решения в газовой отрасли: перспективы внедрения», 17-18 апреля 2014 года, Москва;

- Сетевом совещании ОАО «РЖД» «Инновационные решения в области очистки сточных вод, 24-25 сентября, г. Сочи.

**Публикации:** По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 3 работы - в изданиях, рекомендованных ВАК для защиты кандидатских диссертаций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация включает в себя: введение; аналитический обзор литературы; методическую часть; экспериментальную часть; технологическую и расчетную части, общие выводы.

Содержание работы изложено на 102 страницах, включая 21 рисунок и 1 таблицу и приложения, библиография содержит 110 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** показана актуальность выбранной темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе** обобщены и систематизированы литературные данные по технологиям и аппаратуре для очистки обратноосмотических мембран от загрязнений при очистке широкого спектра сточных вод. Из обзора патентной литературы следует, что наиболее распространенные химические и гидродинамические методы очистки обратноосмотических мембран позволяют эффективно восстанавливать их фильтрующую способность в различных технологических процессах. Однако, недостатком указанных методов является необходимость в периодической остановке технологических процессов и в применении на очистных сооружениях аппаратов для реагентов, разрушающих загрязнения. Среди физических методов очистки обратноосмотических мембран наиболее перспективным является ультразвуковая обработка, однако, ни экспериментальных, ни теоретических исследований по ультразвуковой очистке фильтрата полигонов твердых бытовых отходов в литературе не обнаружено. На основании представлен-

ного аналитического обзора обоснованно показано, что задачами диссертационного исследования являются:

- разработка экспериментального стенда и исследование влияния ультразвуковых колебаний на разрушение концентрационного поляризационного слоя загрязнений поверхности обратноосмотических мембран;
- разработка и исследование конструкции обратноосмотического картриджа со встроенным ультразвуковым излучателем;
- разработка математической модели разрушения концентрационного поляризационного слоя загрязнений обратноосмотической мембраны;
- разработка экспериментального технологического процесса финишной ультразвуковой очистки фильтрата полигонов твердых бытовых отходов.

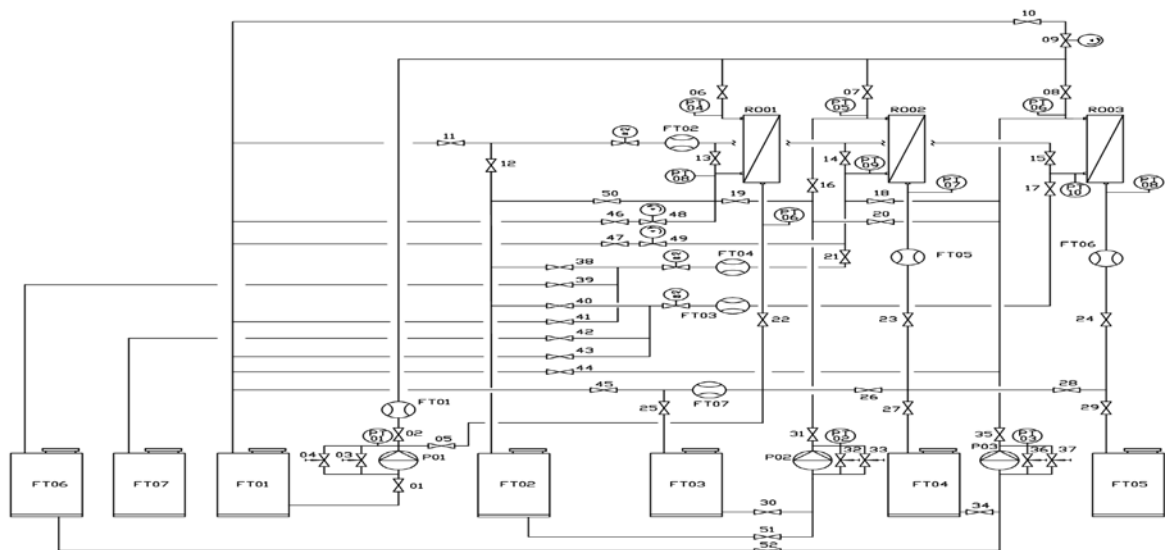
**Во второй главе** представлены результаты разработки экспериментального стенда и исследования технологии ультразвуковой очистки обратноосмотических мембран. Лабораторный экспериментальный стенд создан автором в рамках диссертационной работы на кафедре «Техника переработки отходов и техносферная безопасность» для исследования концентрационного поляризационного слоя загрязнения у поверхности мембран и разработки способов его разрушения.

Стенд оснащен электронными приборами контроля и измерений, данные от которых получает программируемый логический контроллер (ПЛК). ПЛК имеет интерфейс обмена информацией с персональным компьютером, что позволяет записывать и обрабатывать все данные от приборов КИП.

Как показано на рис. 1, стенд состоит из основания, на котором закреплены три емкости объемом 60 л, два насоса  $N=2,2$  кВт, три мембранных блока, стоящих из корпуса и мембраны, блок контроля расхода, состоящий из шести ротаметров, блок управления и блок питания. В состав стенда входят емкости, насосы, мембранные блоки, шесть ротаметров, для контроля расхода фильтрата, пермеата и концентрата, соединенных между собой трубопроводом  $D=0,5$ ". Контур также соединены между собой трубопроводом  $D=0,5$ ". Стенд может работать в нескольких режимах: три контура соединены последовательно, три контура соединены параллельно, два контура (любых) соединены параллельно, а третий последова-

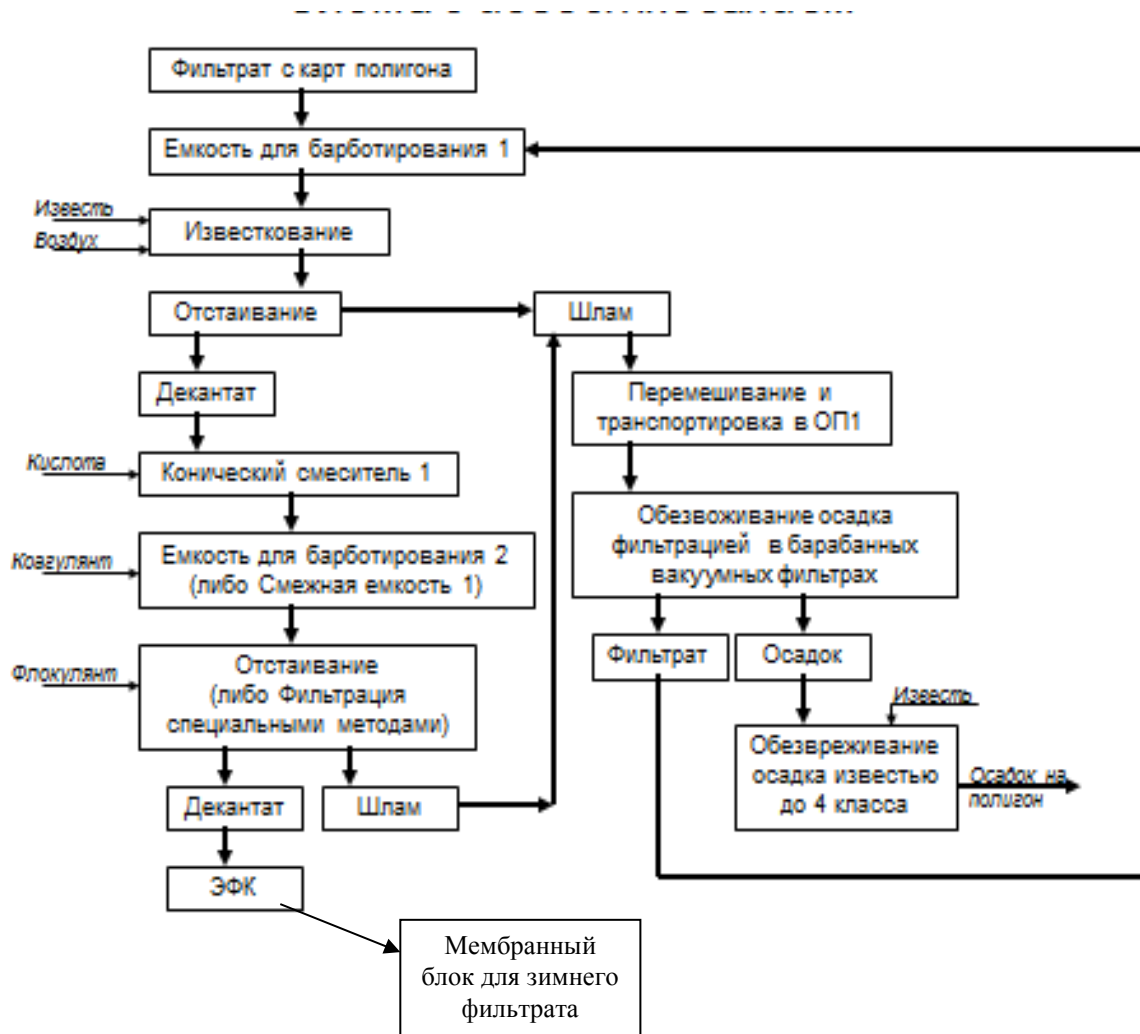
тельно. Также имеется возможность работать отдельно на любом контуре. Производительность стенда по входящему потоку зависит от типа мембранных блоков и изменяется от 0,16м<sup>3</sup>/час до 2м<sup>3</sup>/час, соответственно заменяются ротаметры (марки 0,25 ЭМ210-025 БЖ). Стенд включает в себя: приемный резервуар для очищаемого стока, трубопроводы, герметичный корпус, содержащий мембранный блок, штуцера для ввода очищаемого стока и вывода очищенного стока. Трубопровод, соединяющий приемный резервуар и штуцер в герметичном корпусе мембранного блока для ввода очищаемого стока содержит входной трехпозиционный быстродействующий клапан, соединенный одним дополнительным трубопроводом с отстойником а другим трубопроводом со штуцером в герметичном корпусе мембранного блока, штуцер для вывода очищенного стока соединен трубопроводом с выходным трехпозиционным быстродействующим клапаном, дополнительным нагнетающим насосом и дополнительным трубопроводом с резервуаром очищенного стока. Соотношение концентрат-пермеат может устанавливаться приводной арматурой CV01 как вручную, с пульта, так и может быть заданно для управления в автоматическом режиме. В автоматическом режиме контроллер управляет арматурой CV01 так, чтобы обеспечить заданный расход концентрата. Расход исходного раствора фиксирует расходомер FT01, расход концентрата – FT02, расход пермеата – FT07. Манометр PT01 фиксирует исходное давление на нагнетании насоса P01. Манометры PT04 и PT08 перепад давления концентрата на первой мембране RO01, манометры PT05 и PT09 перепад давления концентрата на второй мембране RO02, манометры PT06 и PT10 перепад давления концентрата на третьей мембране RO03. Манометры PT06, PT07 и PT08 фиксируют давление пермеата.





**Рисунок 1. Лабораторный экспериментальный стенд для исследования технологии ультразвуковой очистки обратноосмотических мембранных элементов (обозначения в тексте)**

На полученном в зимнее время фильтрате, концентрация загрязнителей, стабильность их химических соединений и агрегатных состояний не позволяют в приведенной схеме добиться очистки до норматива стока культурно-бытового назначения. При этом, как было показано предварительными исследованиями, фильтрат других сезонов может быть очищен до заданного уровня. Для обеспечения работы созданного опытно-промышленного оборудования в зимнее время было предложено установить в качестве финишной ступени очистки блок мембран обратного осмоса. Однако, стоимость такого блока, рассчитанного на полную пропускную способность оборудования, представленного на схеме рис.2, в  $8\text{ м}^3/\text{час}$ , по данным всех без исключения фирм-поставщиков слишком велика для всего проекта, а очистка фильтрата до рыбохозяйственного норматива стока в проекте не требовалась.

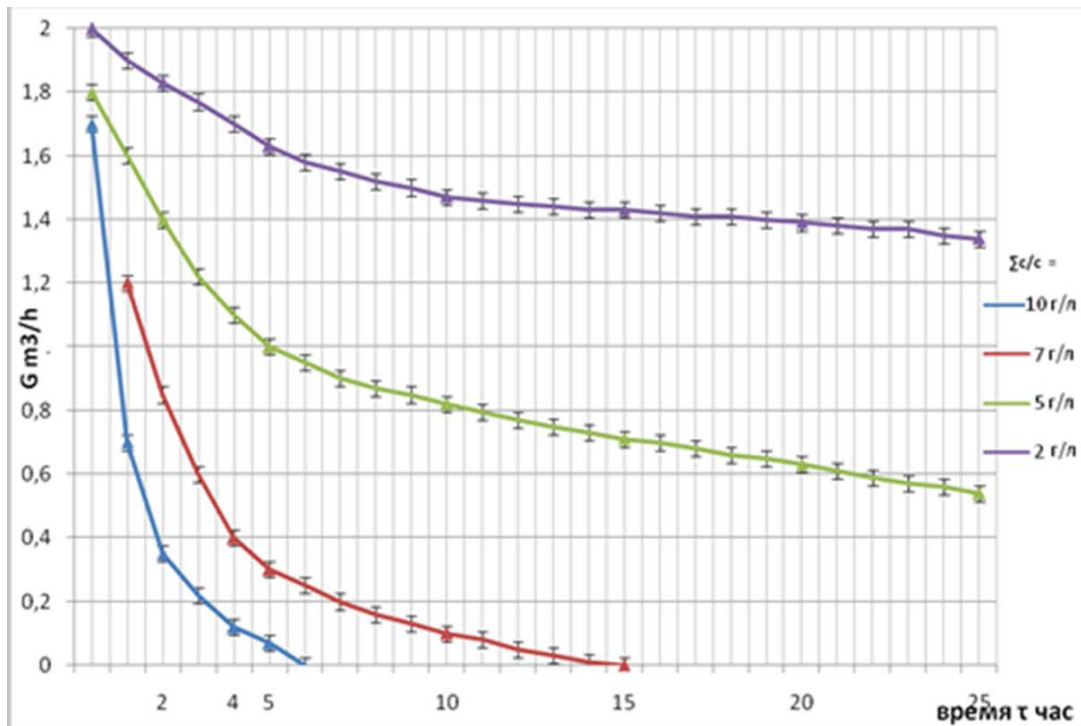


**Рисунок 2. Общая схема установки для глубокой круглогодичной очистки фильтрата полигона несортированных ТБО**

Поэтому была принята схема с разделением потоков пермеата после электрофлоккоагулятора на прямой сброс в смеситель и на сброс через блок мембран обратного осмоса. С отношении расходов определялось достижением после смесителя норматива стока культурно-бытового назначения.

Анализы проб исходного и очищенного фильтрата проводили в Экоаналитической лаборатории МГУП «Промотходы» (свидетельство об аккредитации № РОСС RU.0001.510426). Также осуществлялся анализ pH среды, ХПК и БПК<sub>5</sub>. Для приближенного определения толщины концентрационного поляризационного слоя, мембранный рулон после экспериментов извлекали из картриджа и просушивали без промывки в сушильном шкафу при температуре +60<sup>0</sup>с в трех течение суток. Измерения толщины осушенного слоя на мембране проводили с по-

мощью мерной решетки на оптическом поле металлографического микроскопа РВ-21 при увеличении 1000 раз на срезе торца мембраны после работы. Зависимость толщины слоя от времени работы мембранного блока хорошо коррелирует с падением расхода через картридж (см. рис 3).



**Рисунок. 3. Зависимость расхода через картридж от времени при различной суммарной засоленности пермеата  $\Sigma c/c$  после предварительной очистки зимнего фильтрата полигона "Дмитровский", но без регламентной промывки**

Отсюда можно сделать вывод о том, что преобладающую часть слоя сухого осадка на мембране составляют разного рода частицы концентрационного слоя, образующегося у поверхности мембраны при фильтрации. Как показали наши 10-и часовые эксперименты по очистке зимнего фильтрата полигона твердых бытовых отходов, на финишной стадии, после электрофлотокоагуляции, толщина слоя осадка на обратноосмотической мембране, при котором прекращается фильтрация, составляет 2,2-2,6 мкм.

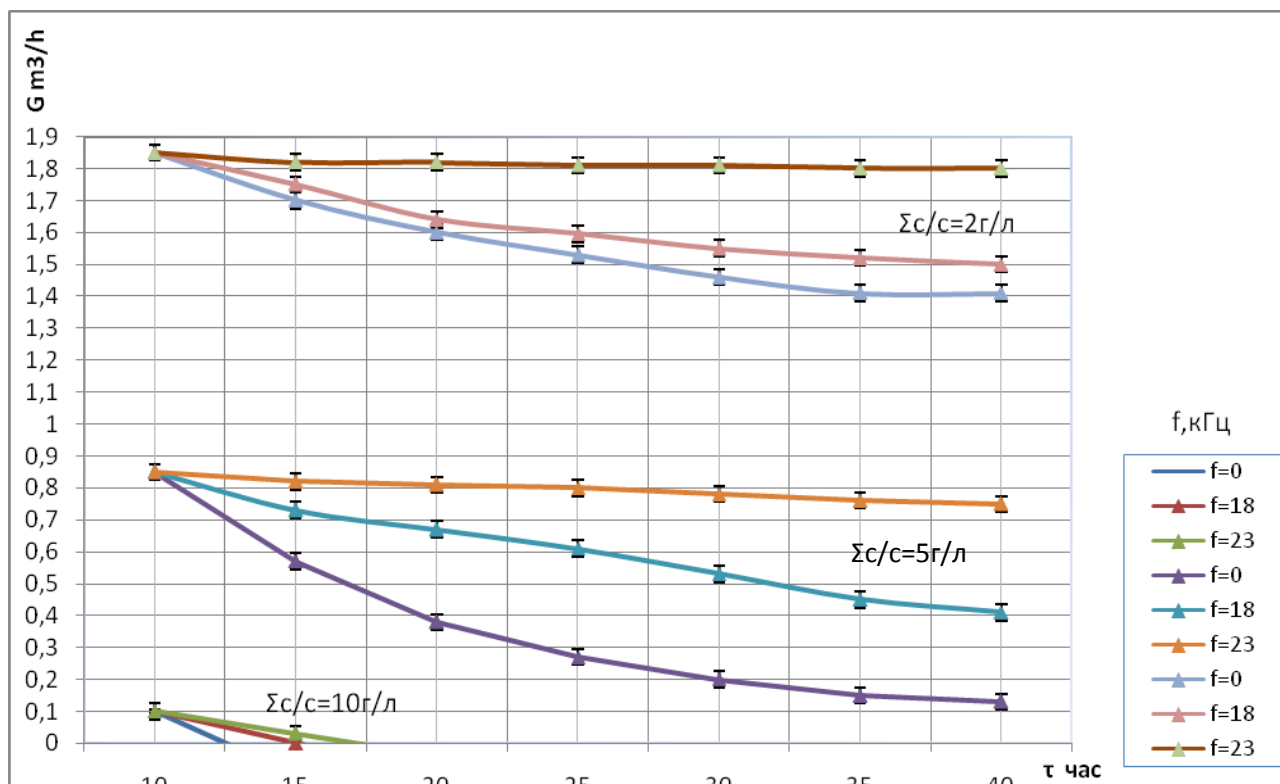
Необходимо отметить, что регламентный период между промывками фильтрующих обратноосмотических мембран для очистки фильтрата без периодической промывки мембранного блока 6 реверсивным потоком очищенного стока 9 составил 42 - 46 суток для весенне-летнего фильтрата и 12-14 суток для зимнего фильтрата. При этом, если для летнего фильтрата степень восстановления расхода

пермеата через мембранный картридж составляла 99,4% - 99,6% после каждой промывки, то для зимнего фильтрата степень восстановления давления не превышала 87,6%-88,1%. Поэтому срок службы обратноосмотических мембран для очистки зимнего фильтрата с регламентной периодической промывкой мембранного блока 6 реверсивным потоком очищенного стока 9 составил 205-215 суток, т.е для климатических условий средней полосы России – один сезон, что в 2-3 раза ниже заявляемых фирмами параметров, определенных по летнему фильтрату в странах Европы.

На стенде установлен ультразвуковой технологический аппарат «Алена» модели УЗТА-0,15/22-О, предназначенный для интенсификации физико-химических процессов в дисперсных системах с жидкой фазой за счет кавитационной обработки. В торец корпуса мембранного картриджа рулонной обратноосмотической встроен волновод ультразвукового генератора, который создает колебания потока фильтрата на мембране. Регулировка УЗ-воздействия производилась в диапазоне АЧХ штатными органами управления УЗГ в диапазоне частот от 10кГц до 23кГц и в диапазоне мощностей от 50 Вт до 180 Вт. В соответствие с паспортными данными УЗГ точность поддержания параметров по АЧХ составляет 2%, а по мощности излучателя 5%.

Как показано на рис.4, в отсутствие УЗ-колебаний, расход через картридж для пермеата с солесодержанием более 10,0г/литр равен нулю уже после 12,5 часов непрерывной работы. Однако УЗО позволяет увеличить этот срок до 14 часов при той же амплитуде. Но после этого процессы концентрационной поляризации слоя, по-видимому, превалируют над процессами диспергирования загрязнений и расход через картридж в условиях эксперимента прекращается.

Иная картина наблюдается при очистке пермеата с общим солесодержанием 2 г/л и 5 г/л. При УЗО снижение расхода со временем здесь существенно замедляется, что свидетельствует о том, что скорость разрушения загрязнений стала сопоставима со скоростью образования концентрационного поляризационного слоя. Полученные данные позволяют сделать вывод о целесообразности непрерывного УЗ-воздействия на картридж с целью увеличения срока его эксплуата-



**Рис. 4. Временная зависимость расхода пермеата через картридж от частоты УЗ-обработки, с амплитудой  $\Delta = 5$  мкм, при различной суммарной засоленности  $\Sigma c/c$ , после предварительной очистки зимнего фильтрата полигона "Дмитровский" на различных режимах**

ции. Физически понятно влияние амплитуды УЗО, т.к. с ее увеличением скорость разрушения слоя, из-за его турбулизации, увеличивается за счет увеличения энергии колебаний.

При этом во всех экспериментах общее солесодержание, измеряемое по показаниям лабораторного ареометра, снизилось до (1,2 – 1,7) г/литр. Эксперименты на пермеате с общим солесодержанием 30 г/литр провести не удалось, т.к. на всех режимах работы и с УЗО и без неё расход через картридж был равен 0.

В ходе исследований были поставлены эксперименты по динамике восстановления расхода пермеата через загрязненный картридж после предварительных испытаний в течение  $\tau_{\text{предв}} = 10$  часов (рис. 5,6). Как показали эксперименты, во всем диапазоне параметров после начала УЗО ( $\tau = 0$ ) существует некоторый период «индукции», величина которого зависит от общего солесодержания и АЧХ. Однако, из общих соображений следует, что величина периода «индукции» зависит и от импеданса среды, и от размера пор мембраны, и от периода предвари-

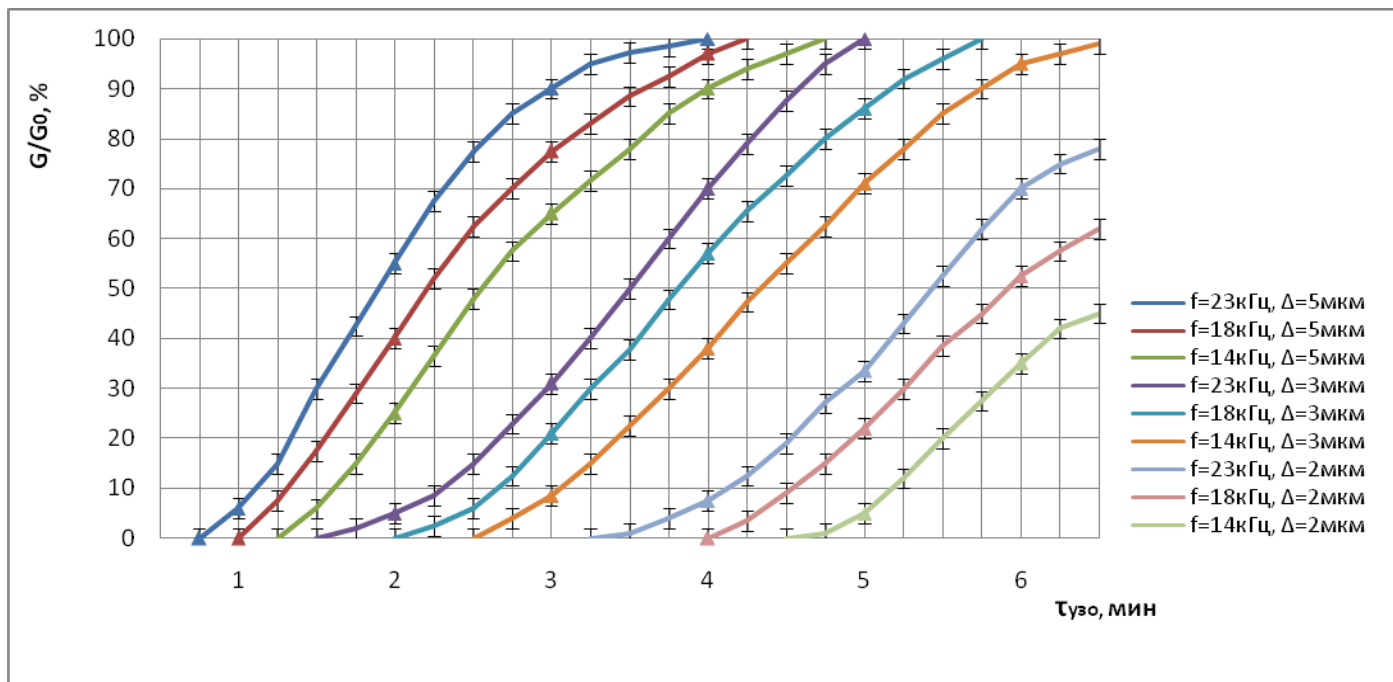


Рис.5. Влияние параметров УЗ-обработки картриджа обратноосмотической мембраны на восстановление расхода пермеата зимнего фильтрата полигона "Дмитровский",  $G_0=2\text{м}^3/\text{час}$  – паспортная величина;  $\Sigma c/c = 2$  г/литр, после предварительных испытаний в течение  $\tau_{предв}=10$  часов

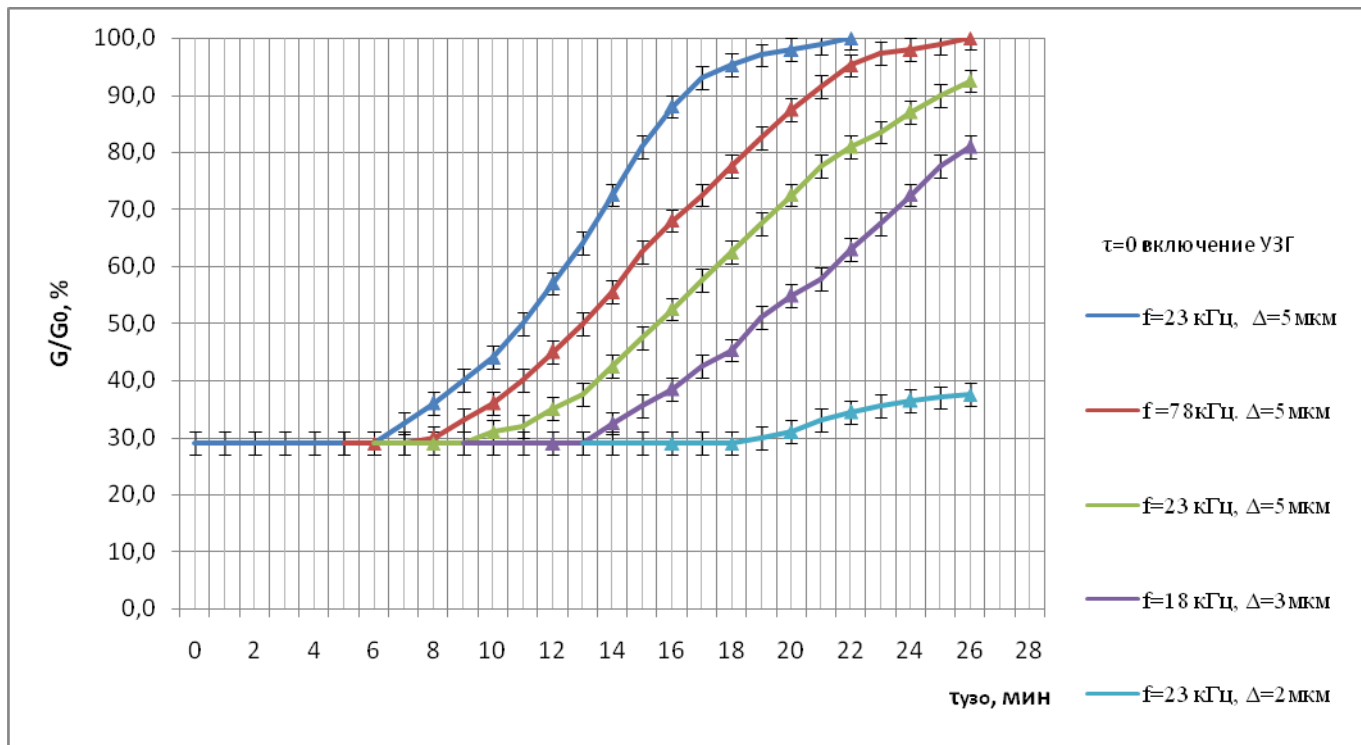


Рис. 6. Влияние параметров УЗ-обработки картриджа обратноосмотической мембраны на восстановление расхода пермеата зимнего фильтрата полигона "Дмитровский",  $G_0=2\text{м}^3/\text{час}$  – паспортная величина;  $\Sigma c/c = 10$  г/литр, после предварительных испытаний в течение  $\tau_{предв}=10$  часов

тельной работы картриджа. Если предположить, что УЗО турбулизует концентрационный поляризационный слой у поверхности мембраны, то период «индукции» соответствует периоду турбулентного разрушения слоя в межслоевом зазоре.

Таким образом, одним из результатов представленных экспериментов является экспериментально доказанная на пермеате фильтрата полигона ТБО, возможность увеличения периода эксплуатации фильтрующих обратноосмотических мембран за счет ультразвукового сопровождения процесса фильтрации. Вторым результатом является экспериментально доказанная в тех же экспериментах возможность периодической очистки загрязненных мембран в течение 1-6 минут УЗО.

**В третьей главе приведено** обобщение результатов экспериментальных исследований, в виде безразмерных комплексов измеряемых величин процесса и физико-химических свойств очищаемой среды. Обработка экспериментальных данных в критериальной форме дала соотношение:

$$\mathcal{E}f = 0.007 \cdot Eu^{0.038} \cdot Sc^{-0.0046} \cdot Ga^{0.23} \cdot Ho^{0.11} Re_w^{-0.651}$$

где  $\mathcal{E}f = (C_k - C_n) / C_n$  – эффективность процесса очистки мембраны,  $C_k$  – масса загрязнителей на мембране до УЗО, в мг/м<sup>2</sup>,  $C_n$  – масса загрязнителей на мембране после УЗО, в мг/м<sup>2</sup> за одно и тоже время.

Диапазоны изменения безразмерных комплексов:

$\mathcal{E}f =$  от 0,3 до 0,9.  $Eu =$  от 16,24 до 14883,98.  $Fr \approx 1$

$Sc =$  от  $7,25 \cdot 10^7$  до  $1,63 \cdot 10^9$ ;  $Ga =$  от  $7,79 \cdot 10^{10}$  до  $5,00 \cdot 10^{11}$ ;  $Re_w =$  от  $1,6 \cdot 10^9$  до  $2,8 \cdot 10^9$ ;  $Re =$  от 100 до 320;  $Ho =$  от  $10^2$  до  $2 \cdot 10^3$ .

Погрешность данного уравнения по отношению к экспериментальным данным составляет  $\pm 12\%$  во всем диапазоне изменения экспериментальных параметров процесса. Наибольшие показатели степени оказались у критерия гомохронности (Ho) диффузионного критерия Галилея (Ga) и критерия Рейнольдса для ультразвукового движения ( $Re_w$ ). При этом гидродинамические факторы ( $Re_w$ ) оказываются превалирующими. Отсюда следует, что при использовании модели разрушения плоского концентрационного поляризационного слоя загрязнений мембра-

ны, целесообразно воспользоваться уравнением Лапласа для пульсирующего течения у поверхности мембраны, определив, тем самым условный характерный размер сферической частицы концентрационного поляризационного слоя. За характерный размер частицы слоя примем размер турбулентного моля в межслоевом зазоре мембранного картриджа. Для данного случая потенциал  $\Phi$  пульсирующей скорости возмущенного движения частицы слоя и окружающей частицу среды удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (1)$$

здесь  $r, \theta, \varphi$  - сферические координаты.

При этом скорости возмущения связаны с  $\Phi$  - соотношениями его определяющими

$$v_r = \frac{\partial \Phi}{\partial r}; v_\varphi = \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi}; v_\theta = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \quad (2)$$

Давление определяется интегралом Лагранжа-Коши, который для малых возмущений скоростей имеет вид

$$\frac{p}{\rho} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{v^2}{2}; v^2 = v_r^2 + v_\varphi^2 + v_\theta^2 \quad (3)$$

где  $t$  - время. Решения (2) будем искать в виде

$$\Phi_1(r, \varphi, \theta, t) = u_1(r, \varphi, \theta) \cdot T_1(t)$$

$$\Phi_2(r, \varphi, \theta, t) = u_2(r, \varphi, \theta) \cdot T_2(t) \quad (4)$$

где индексы 1,2 относятся к стоку и частицам слоя соответственно;  $u, T$  - модельные функции. В качестве граничных условий рассмотрим непрерывность нормальных составляющих

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial r} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial r} \text{ при } r = R \quad (5)$$

и равенство разности давлений внутри  $P_1$  и вне  $P_2$  сферы поверхностному натяжению

$$\sigma H = p_1 - p_2 \quad (6)$$



где  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения частицы слоя,  $H$  - средняя кривизна возмущенной поверхности частицы, которая в соответствии с уравнением Пуассона может быть записана в виде

$$H = -\frac{2}{R^2}\xi - \frac{1}{R^2} \cdot \left\{ \frac{1}{\sin\theta} \cdot \frac{\partial}{\partial\theta} \left( \sin\theta \frac{\partial\xi}{\partial\theta} + \frac{1}{\sin^2\theta} \cdot \frac{\partial^2\xi}{\partial\varphi^2} \right) \right\} \quad (7)$$

где  $\xi$  - радиальное смещение поверхности, определяемое соотношением:  
 После ряда преобразований и замены переменных уравнение, в предположении, что колебания поверхности частицы имеют гармонический характер, уравнение (7) приводится к уравнению Матье, как к частному виду уравнения Хилла. При исследовании устойчивости колебаний частицы концентрационного поляризационного слоя у поверхности мембраны, обратимся к диаграмме устойчивости решений уравнения Матье. Как следует из диаграммы, часть решений представляют собой ограниченные по амплитуде гармонические функции, описывающие устойчивые колебания поверхности под воздействием пульсаций давления в окружающем потоке. При этих условиях разрушения частиц слоя у мембраны не происходит, расход через нее падает, и процесс очистки фильтрата со временем прекращается. В случае решений, при которых амплитуда колебаний неограниченно возрастает, жидкая частица дробится из-за турбулизации слоя. Оценить время распада частицы можно, зная скорость нарастания колебаний ее поверхности  $Z$ . При этом выражение для оценки времени распада слоя частиц можно записать как

$$t_{\text{расч}} = -\frac{1}{Z_{\text{max}}} \ln \frac{\xi_{0\text{max}}}{R} = -\frac{\ln \xi_{0\text{max}}}{Z_{\text{max}}}$$

где  $\xi_0$  - отклонение поверхности частицы до начала колебаний. При этом (8)  $\xi$  может рассматриваться, как функция разности скоростей фаз, лобового сопротивления частицы, ее начального радиуса и теплофизических свойств.

Результаты расчета, для частиц концентрационного поляризационного слоя обратноосмотической мембраны высокого давления, приведены на рис. 7, в виде

зависимости  $t_{расп}$  от  $We$  при условии, что жидкие частицы распадаются по крайней мере на две части, т.е.  $n=2$ .

Если учесть, что для выпускаемых промышленностью мембранных картриджей в их объеме находится одномоментное количество фильтрата около  $10\text{дм}^3$ , то  $t_{проб.}$  можно оценить в  $\sim 10^{-2}$  с. Размеры турбулентного моля для концентрационного поляризационного слоя, рассчитанные по результатам экспериментальных исследований вязкости фильтрата полигона «Дмитровский» будем полагать равными  $R \approx 10^{-2} - 10^{-3}$  м., Следовательно, при ( $We > 2,5$ ) все частицы гарантированно подвергнутся однократному дроблению.

**В четвертой главе** приведены результаты опытно-промышленной апробации технологии финишной ультразвуковой очистки обратноосмотических мембран при обезвреживании зимнего фильтрата полигонов твердых бытовых отходов.

С точки зрения выбора источника ультразвуковых колебаний, используемого для получения кавитационного эффекта в фильтрате, основным технологическим показателем, является кавитационный порог для фильтрата ( $L_c$ ) Анализ результатов экспериментов, приведенных в главе 2 показал, что разрушение концентрационного поляризационного слоя у поверхности обратноосмотической мембраны начинается при  $LC=5$  Вт/см<sup>2</sup>. Поэтому, если ставить задачу получения средней интенсивности излучателя в картридже по всей его ширине  $L_0 \geq 5$  Вт/см<sup>2</sup>, то исходная интенсивность на поверхности излучателя будет равна  $I_0 = 7$  Вт/см<sup>2</sup>. Таким образом, может быть определена мощность ультразвукового генератора для разработанной схемы.

Для реализации результатов диссертационной работы была разработана и реализована в опытно-промышленном технологическом процессе Установка, включающая в себя: приемный резервуар для очищаемого стока, резервуар очищенного стока, трубопроводы, герметичный корпус, содержащий мембранный блок, основной нагнетающий насос, штуцера для ввода очищаемого стока и вывода очищенного стока из корпуса, достигается путем:

- установки на трубопроводе, соединяющем приемный резервуар, основной нагнетающий насос и штуцер для ввода очищаемого стока, входного трехпозици-

онного быстродействующего клапана, соединенного дополнительным трубопроводом с отстойником,

- установки на штуцере для вывода очищенного стока трубопровода с выходным трехпозиционным быстродействующим клапаном, дополнительным нагнетающим насосом и дополнительным трубопроводом, соединенным с резервуаром очищенного стока. При этом мембранный блок соединен с волноводом ультразвукового генератора, который создает колебания на мембране с частотой от 3,0 до 22,0 кГц.

- установки блока управления трехпозиционными быстродействующими клапанами, дополнительным нагнетающим насосом и ультразвуковым генератором, таким образом, что при включении дополнительного нагнетающего насоса, входной трехпозиционный быстродействующий клапан перекрывает трубопровод ввода очищаемого стока из приемного резервуара, открывает дополнительный трубопровод, соединенный с отстойником, выходной трехпозиционный быстродействующий клапан открывает дополнительный трубопровод, соединенный через дополнительный нагнетающий насос с резервуаром очищенного стока и включает ультразвуковой генератор. При этом блок управления срабатывает по сигналу от датчика давления из-за изменений перепада давлений на устройстве  $\geq 10\%$  от номинального значения.

Предлагаемое устройство работает следующим образом (см. схему на рис. 7). Очищаемый сток 1, например, фильтрат полигона захоронения твердых бытовых отходов, из приемного резервуара 2 по трубопроводу 3 с помощью основного нагнетающего насоса 4 подают во входной трехпозиционный быстродействующий клапан 5, который при перепаде давления на мембранном блоке 6 меньшем  $110\%$  номинального значения, соединен со штуцером 7 для ввода очищаемого стока 1 в мембранный блок 6, а при перепаде давления на мембранном блоке большем  $110\%$  номинального значения по сигналу от блока управления 15 перекрывает ввод очищаемого стока 1 в мембранный блок 6 и соединен дополнительным трубопроводом 8 с резервуаром очищенного стока 9. Штуцер 10 для вывода очищенного стока при перепаде давления на мембранном блоке 6 мень-

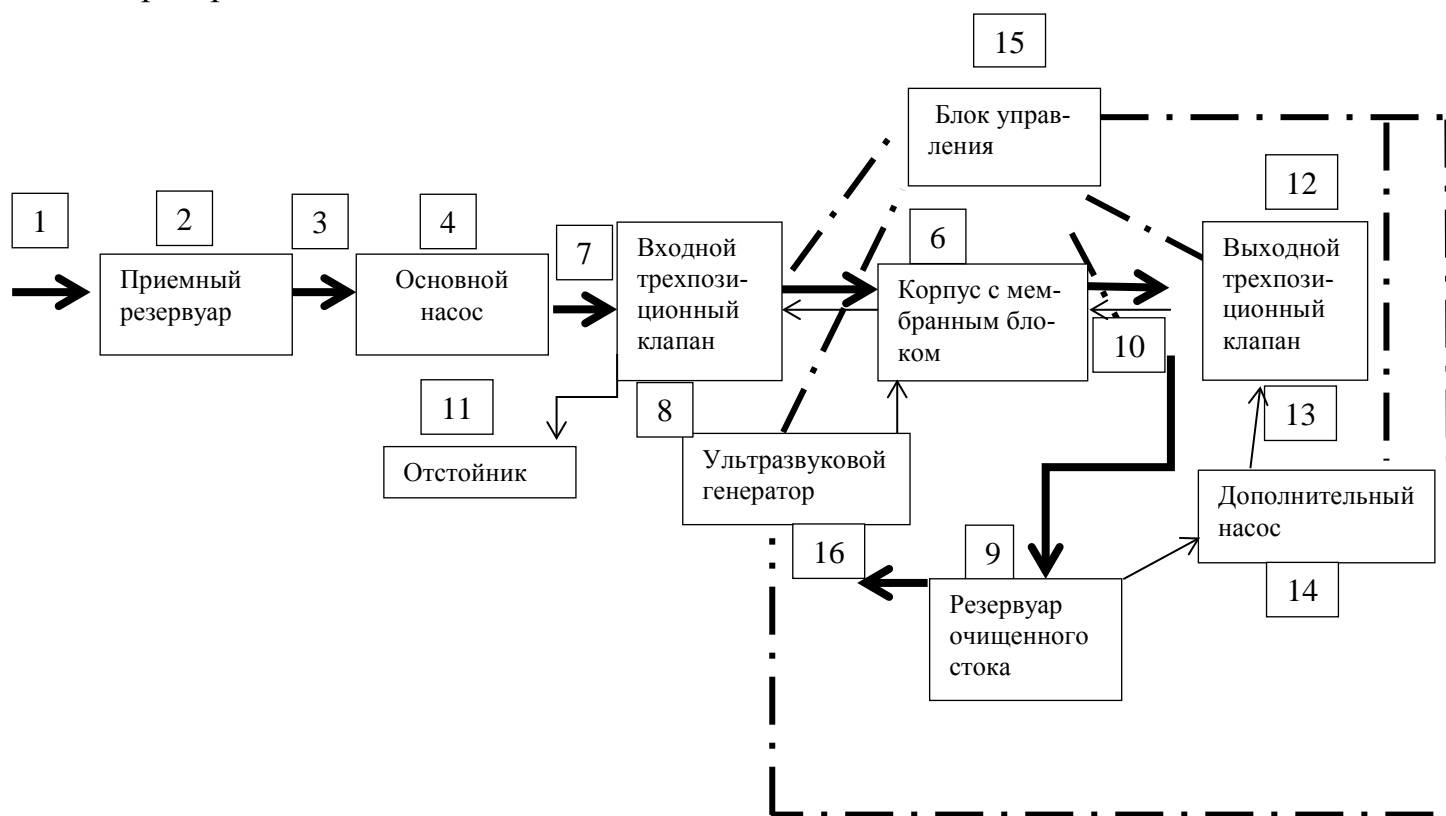
шем 110% номинального значения, соединен с резервуаром очищенного стока 9, а при перепаде давления на мембранном блоке большем 110% номинального выходной трехпозиционный быстродействующий клапан 12 перекрывает вывод очищенного стока 9 из мембранного блока 6 через и трубопровод 13 соединяется с дополнительным нагнетающим насосом 14, подающим очищенный сток 9, через штуцер 10, в мембранный блок 6. Т.е. происходит периодическая промывка мембранного блока 6 реверсивным потоком очищенного стока 9 со сбросом продуктов промывки в отстойник 11. С целью снижения давления, создаваемого дополнительным нагнетающим насосом 14 для промывки мембранного блока 6 и во избежание повреждения мембранного блока 6, на мембранном блоке 6 соединенным с ультразвуковым генератором 16, создают колебания с частотой от 3,0 до 22,0 кГц. Как показали наши эксперименты по очистке фильтрата полигона твердых бытовых отходов, толщина слоя, при котором прекращается фильтрация, составляет 22-26 мкм. Измерение толщины слоя проводилось путем фотографирования межслоевого зазора рулонного картриджа через окно в торцевой крышке, с последующей расшифровкой снимков на мониторе компьютера при увеличении до 1500 раз. Зависимость толщины слоя от времени работы мембранного блока носит линейный характер. Наиболее рациональным на практике оказалось наложение ультразвуковых колебаний на слой толщиной 1,0-1,5 мкм. При этом уменьшение расхода фильтрата через мембранный блок составляло 20%-25% от номинального значения. Наложение ультразвуковых колебаний в течение 30-50 секунд один раз за 10 суток работы позволило поддерживать постоянство расхода очищаемого стока с точностью 1,5%.

Срок службы фильтрующих обратноосмотических мембран для очистки фильтрата без периодической промывки мембранного блока 6 реверсивным потоком очищенного стока 9 составил 92-96 суток.

Срок службы фильтрующих обратноосмотических мембран для очистки фильтрата с периодической промывкой мембранного блока 6 реверсивным потоком очищенного стока 9 составил 205-215 суток.

Срок службы фильтрующих обратноосмотических мембран для очистки фильтрата с периодической промывкой мембранного блока 6 реверсивным потоком очищенного стока 9 и наложением ультразвуковых колебаний с частотой от 3,0 до 22,0 кГц составил 725-760 суток.

Причина увеличения срока службы мембран была выяснена при исследовании плоских фрагментов загрязненных мембран в ультразвуковой ванне с встроенными в стенки пьезокерамическими излучателями, заполненной очищенным стоком 9. Как показали эксперименты, при наложении ультразвуковых колебаний концентрационный поляризационный слой у поверхности мембраны разрушается, образуя, хорошо заметный визуально, псевдооживленный слой, который удаляется реверсивным потоком.



- ➔ трубопроводы для работы в режиме очистки стока
- ← трубопроводы для работы в режиме очистки обратноосмотической мембраны
- . . . линии управления

**Рисунок 7. Блок-схема устройства для очистки обратноосмотической мембраны**

Экономическая эффективность предлагаемого изобретения определяется значительным снижением потребности в мембранных блоках при очистке сточных вод.

### **ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ**

1. Экспериментально установлено наиболее эффективное сочетание ультразвукового воздействия и физико-химических методов очистки фильтрата полигона захоронения несортированных ТБО. Определены режимы удаления загрязнений рулонных обратноосмотических мембран при ультразвуковом воздействии на частоте 12-24 кГц, с амплитудой колебаний от 1,0 до 5,0 мкм, после длительной (более 10 часов) работы;
2. Разработана и защищена патентом РФ новая конструкция установки для очистки обратноосмотической мембран ультразвуковым воздействием, позволяющая исключить потребность использования серной кислоты, щелочных моющих средств, других химических добавок.
3. Разработана инженерная методика расчета и проектирования технологического процесса очистки мембран ультразвуковым воздействием, учитывающая начальную концентрацию загрязнений и время обработки;
4. Результаты работы апробированы на опытно-промышленной установке очистки фильтрата полигона твердых бытовых отходов «Дмитровский», в Дмитровском районе Московской области, на полигоне ТБО в Адлерском районе г. Сочи (Краснодарский край), на полигоне ТПБО (твердых промышленных и бытовых отходов «Саларьево» (Московская область, д. Саларьево), на Астраханском полигоне ТБО.
5. Показано, что полученные результаты могут быть использованы при модернизации действующих и проектировании новых схем очистки фильтрата полигонов ТБО, включающих блоки обратного осмоса и ультразвуковой очистки мембран.

## **Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

**Публикации автора.** По теме диссертации опубликованы следующие работы общим объемом 5 печатных листов:

1. Гонопольский А.М., Ладыгин К.В., Стомпель С.И. Расчетно-теоретический анализ ультразвукового воздействия на загрязнения обратноосмотических мембран. Известия МГТУ «МАМИ», Серия 4. Химическое машиностроение и инженерная экология, №3(17), т.4, 2013г., стр.187-192.

2. Гонопольский А.М., Кудрявцев С. А. Стомпель С.И., Ладыгин К.В. Экспериментальные исследования процесса ультразвуковой очистки обратноосмотических мембран. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, №4, апрель, 2014, стр45-50.

3. Гонопольский А.М., Стомпель С.И., Ладыгин К.В. Критериальное обобщение результатов экспериментальных исследований процесса ультразвуковой очистки обратноосмотических мембран. Экология и промышленность России, №8, 2014, стр. 28-31

4. Ладыгин К.В. «Система водоподготовки и водоотведения с использованием обратноосмотических систем». Доклады V Международной конференции «Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток» (ROOGD-2014), 29 октября 2014 г. Московская область, п. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»;

5. Ладыгин К.В. «Применение системы распределенного компримирования, с использованием мобильных компрессорных установок, мембранные технологии». Материалы Всероссийского Форума «Новейшие технические решения в газовой отрасли: перспективы внедрения», 17-18 апреля 2014 года, Москва;

6. Ладыгин К.В. «Комплекс централизованного отопления объектов, с использованием тепловой энергии, полученной при обезвреживании сточных вод (хозяйственно-бытовых, производственных). Установки доочистки стоков с использованием мембранных систем. Опыт и перспектива». Материалы сетевого совещания ОАО «РЖД» «Инновационные решения в области очистки сточных вод, 24-25 сентября, г. Сочи.