

На правах рукописи



ЕВСТИГНЕЕВ
Вячеслав Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ**

05.14.01 – энергетические системы и комплексы
05.23.04 – водоснабжение, канализация, строительные системы
охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2012

Работа выполнена на кафедре Теплотехники и гидрогазодинамики
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кулагин Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты:

Дубровский Виталий Алексеевич, доктор технических наук, доцент;
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» / кафедра Тепловых
электрических станций, профессор кафедры

Яковлева Марина Геннадьевна, кандидат технических наук; ООО
«Красноярский жилищно-коммунальный комплекс» / Управление водоснаб-
жения, заместитель начальника цеха – технолог

Ведущая организация: **Научно-исследовательское учреждение Специальное
конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН
(Красноярск)**

Защита состоится 28 марта 2012 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертацион-
ного совета ДМ 212.099.07 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный
университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Сибирский
федеральный университет».

Автореферат разослан 28 февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чупак Татьяна Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования систем кондиционирования технических и сточных вод тепловых электрических станций (ТЭС) на базе новых наукоёмких технологий с целью повышения экономичности, надежности и безопасности существующих энергетических систем и комплексов.

В настоящее время кондиционирование сточных вод в большинстве своём осуществляется на морально и физически изношенном оборудовании с использованием традиционных технологий и методов механической и физико-химической обработки. Все большее значение приобретают задачи комплексного и рационального использования водных ресурсов, повышения качества и эффективности очистки и обеззараживания постоянно возрастающих объемов сточных вод, применения инновационного оборудования, современных материалов, технологий и механизмов.

Одним из путей решения проблемы повышения эффективного водопользования, в некоторых случаях, является переход на оборотное водоснабжение. Лишь на единичных очистных сооружениях сток направляют на доочистку с использованием современных способов очистки и обеззараживания (озонирование, ультрафильтрация, обработка ультрафиолетовым излучением, электрохимическая обработка и др.). Каждый из перечисленных способов наряду с положительными сторонами имеет и специфические недостатки, что заставляет искать новые пути развития ресурсо- и энергосберегающих методов и технологий очистки сточных вод.

Возникающие проблемы энергоресурсосбережения и экобезопасности при очистке больших объемов воды тепловых электростанций энергетических комплексов могут быть решены с использованием термодинамических эффектов кавитации – кавитационной технологии. Однако вопросы изменения физико-химических свойств воды (реологических, структурных и др.) и их влияния (на макроуровне) на ход и результат технологических процессов очистки промышленных стоков на современном этапе изучены недостаточно.

В связи с этим возникает много вопросов, определяющих важность и актуальность данной работы: о нахождении устойчивых режимов обработки воды, о влиянии кавитационного воздействия на физико-химические характеристики и релаксацию полученных свойств, о механизмах разрушения загрязнителей стоков при кавитационном воздействии, ответы на которые должны быть найдены в процессе всесторонних исследований.

Результаты, полученные в диссертации, обсуждаются на примере кавитационной установки, включенной в схему оборотной системы водопользования автомоечных комплексов и правобережных очистных сооружений г. Красноярска, которые можно использовать и для ТЭС в силу практической идентичности состава сточных вод.

Работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники РФ Пр–577 «Энергосберегающие технологии» (критические технологии «Системы жизнеобеспечения и защиты человека» и «Энергосбережение») по открытому плану НИР ФГАОУ ВПО «Сибирский федераль-

ный университет» «Разработка энергоэффективных и экобезопасных технологий» в 2005-2008 годах, а также в рамках Федеральной целевой программы «Чистая Вода» на 2011-2017 годы.

Основная идея диссертационного исследования заключается в комплексном использовании эффектов кавитации в процессах обработки стоков с целью обеспечения наилучших технико-экономических показателей новых технологических решений на стадии проектирования.

Объект исследования - оборудование для обработки и кондиционирования сточных вод.

Предмет исследования - технологические процессы обработки и коррекции свойств воды.

Цель диссертационной работы состоит в усовершенствовании методов, технологических схем и устройств для повышения эффективности работы систем кондиционирования сточных вод тепловых электростанций с использованием кавитационной технологии.

В соответствии с поставленной целью были решены **задачи**:

1. Проведены анализ и оценка современного состояния теории и практики существующих методов кондиционирования сточных вод в энергетических системах и комплексах. Определены направления по повышению их эффективности;

2. Обосновано применение кавитационной технологии для реализации процесса очистки сильнозагрязненных сточных вод на основе изучения теплофизических и гидродинамических факторов, влияющих на степень их очистки;

3. Разработана полупромышленная установка и технологические схемы очистки сточных вод в энергетических системах и комплексах с использованием кавитации;

4. Исследована в натуральных условиях возможность практического применения предлагаемых устройств для очистки стоков тепловых электрических станций с использованием гидродинамической кавитации при постоянно изменяющемся качественном составе сточной воды. Выбраны и научно обоснованы рациональные режимы обработки.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались современные физико-химические методы исследования: UV/Vis-спектрофотометрия, потенциометрия, хроматография, стандартные методики кинетических измерений, статистические методы обработки результатов на ПЭВМ.

Научная новизна защищаемых в диссертации положений заключается в следующем:

1. Впервые установлено влияние режимных параметров кавитационной обработки (температуры, водородного показателя рН, солесодержания, скорости и времени обработки и др.) на изменение физико-химических, бактериологических и биологических характеристик обрабатываемых сточных вод в условиях эксплуатации очистных систем;

2. Научно обоснованы и реализованы условия и механизм использования термодинамических эффектов кавитации для очистки или доочистки вод в трубопроводных системах энергетических комплексов от органических соединений и биоорганизмов с точки зрения экологической и экономической целесообразности;

3. Разработан и аппаратурно реализован метод очистки сточных вод с использованием гидродинамической кавитации, в отличие от известных, позволяющий снизить загрязнение окружающей среды органическими соединениями, биоорганизмами и продуктами их жизнедеятельности и метаболизма.

Значение для теории. Предложенный метод очистки сточных вод с использованием гидродинамической кавитации, а также рекомендации по применению кавитационной технологии в сооружениях очистки сточных вод энергетических систем и комплексов создают базу для развития теоретических основ разработки и проектирования новых энергоэффективных методов и оборудования.

Практическая значимость и использование результатов работы. Разработаны практические рекомендации по применению кавитационной технологии в сооружениях очистки сточных вод энергетических систем и комплексов, позволяющие повысить точность определения оптимальных режимов кавитационной обработки с учетом надежности и долговечности проектируемого оборудования.

Предложены и апробированы в опытно-промышленных условиях предприятий технологические схемы кондиционирования сточных вод, содержащих различные загрязнители, до уровня требований, предъявляемых к сбросу в системы городской канализации и повторно используемой технической воде. Разработана, экономически обоснована и доведена до стадии практической реализации технология предварительной обработки стоков содержащих нефтепродукты и эмульгированные масла. На основе полученных в работе результатов сконструировано устройство кавитационной обработки сточных вод.

Разработанная новая технология обработки воды для систем очистки сточных вод в энергетических комплексах, а также методика проектирования технологического оборудования использована на энергетических предприятиях ООО «Красноярский жилищно-коммунальный комплекс» и автомоечных станциях.

Кавитационная технология обработки воды, методики исследования и результаты практической реализации работы включены в курс лекций «Водоподготовка» для студентов ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Теплоэнергетика», а также использованы в научно-исследовательской деятельности Проблемной лаборатории кавитационной нанотехнологии кафедры Теплотехники и гидрогазодинамики СФУ.

Достоверность полученных результатов базируется на применении общенаучных методов исследования, знании фундаментальных законов теплофизики, гидрогазодинамики и подтверждается метрологическими характеристиками использованного оборудования и приборов, а также на сравнении расчетных данных с экспериментальными результатами.

Личный вклад автора. Научные и практические результаты, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены автором. Общая научная идея, направления и задачи исследований были разработаны и реализованы при участии научного руководителя. Автор выражает глубокую признательность до-

центам кафедры Инженерных систем зданий и сооружений: канд. техн. наук О. Г. Дубровской, канд. хим. наук А. Ф. Коловой и канд. техн. наук Т. Я. Пазенко за методическую помощь в проведении анализов проб сточных вод.

Апробация результатов работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (Красноярск, 2009); Всероссийской научно-технической конференции «Гидродинамика больших скоростей» (Красноярск, 2010); Всероссийской научной конференции «Актуальные вопросы современной науки и образования» (Красноярск, 2010); Региональной научно-практической конференции «Образование, наука, инновации» (Кемерово, 2010); Международной научно-технической конференции «Наука и образование - 2010» (Мурманск, 2010); Общероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и образования» (Красноярск, 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них: четыре статьи в периодических изданиях по списку ВАК, две - в сборниках научных трудов, пять работ в трудах Международных и Всероссийских научно-технических конференций и конгрессов.

Объем и структура работы. Материалы диссертации изложены на 123 страницах основного текста, включающих 37 рисунков и 7 таблиц. Работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников из 140 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, определены задачи, научная новизна и практическая значимость исследования, а также основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первом разделе рассмотрено современное состояние методов кондиционирования сточных вод тепловых электрических станций, промышленных предприятий и городских сооружений, даётся общая оценка химико-биологического состояния стока. Выделены основные стадии очистки сточных вод с учетом снижения эксплуатационных затрат на их обработку при использовании энергосберегающих технологий.

Особенности накопления вредных веществ, их химические трансформации и воздействия на организмы подробно рассмотрены в работах Ю. А. Кирпенко, Л. А. Сиренко, О. М. Кожовой, С. С. Тимофеевой и др. Наиболее распространенными на сегодня методами доочистки, обладающие необходимым потенциалом обеззараживания воды, являются хлорирование, озонирование, обработка диоксидом хлора и УФ-облучение. Однако все выше перечисленные методы имеют ряд недостатков, которые не позволяют отнести данные технологии водоочистки к экологически безопасным и эффективным в оборотных системах предприятий промышленного и энергетического комплексов.

Изучение состава сточных вод предприятий энергетического комплекса (ТЭЦ, котельные) выявило основные загрязнители, которые классифицированы по фазово-дисперсному состоянию, химическому составу и по классификациям

Л. А. Кульского и М. И. Лапшина. Стоки энергетических предприятий имеют схожий состав. Преимущественное использование эти воды находят в системах охлаждающего оборотного водоснабжения, а также в ряде технологических операций, где требования к воде соответствуют показателям качества вод открытых водоисточников, в некоторых случаях эти требования могут быть менее жесткие, чем к качеству воды перед сбросом в водоёмы.

Изменение структуры и, следовательно, физико-химических свойств воды рассмотрено в работах Э. В. Миллера, В. И. Классена и др. по омагничиванию водных систем, Ф. А. Летникова и др. – по термической активации, Ю. А. Сикорского, И. К. Никишина – по исследованиям свойств талой воды и др. Время релаксации свойств модифицированной воды может составлять от нескольких минут до нескольких лет, в зависимости от метода воздействия и условий хранения. Целый ряд методов обработки воды основан только на механическом воздействии. Физико-химические аспекты изменения свойств воды с использованием ультразвуковых генераторов кавитации рассмотрены в работах С. П. Зубрилова, М. А. Маргулиса и др.

В работах В. М. Ивченко впервые было обращено внимание на комплексное кавитационное воздействие на гомогенные и гетерофазные жидкости, которое возможно использовать в технологических целях. В работах В. М. Ивченко, В. А. Кулагина, А. М. Кривцова, А. Ф. Немчина и др. показано, что кавитационное воздействие на обрабатываемую среду является одним из эффективных методов интенсификации химико-технологических, гидромеханических и массообменных процессов в жидкостях, деструкции веществ и т.п.

Специфика определенного круга задач, связанных с применением кавитации при очистке сточных вод в энергетических системах и комплексах обуславливает необходимость подробных исследований в этом направлении. Результаты проведенного анализа литературных источников подтверждают актуальность выбранной темы диссертационного исследования и целесообразность решаемых задач.

Во втором разделе изложена техника эксперимента: представлены химический состав исследуемых растворов, описаны методы анализов и обработки результатов, полученных при проведении исследований, рассмотрены физико-химические параметры жидкости, оказывающие различное влияние на очистку воды при кавитационном воздействии.

Определение количественного и качественного содержания органических веществ проводилось с помощью жидкостного хроматографа Agilent 1200 с масс-селективным детектором на основе трех квадрупольных 6410 при длине волны 256 нм, газового хроматографа Agilent 7890А с квадрупольным детектором Agilent 5975С, на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02», а также на анализаторе содержания нефтепродуктов «Концентратомер КН-2». Вспомогательное измерительное оборудование обеспечило возможность исследования влияния гидродинамической кавитации на следующие показатели воды: температуру; концентрацию растворенного кислорода; показатель рН; электропроводность и др.

В целях обеспечения точности и достоверности результата использовались три параллели исследований и обработки результатов по трем независимым методикам:

1. Определение загрязнений в воде флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02» (методика М 01-05-2007; ПНД Ф 14.1:2:4.128-98; МУК 4.1.1262-03);

2. Определение загрязнений в воде хроматографическим методом на газовом хроматографе Agilent 7890А с квадрупольным детектором Agilent 5975С и жидкостном хроматографе Agilent 1200 с масс-селективным детектором на основе трех квадрупольей 6410;

3. Использование фотометрического метода определения нефтепродуктов, жиров и НПАВ в четыреххлористом углероде на анализаторе «Концентратомер КН-2» в инфракрасной области спектра на длине волны 3,42 мкм.

В качестве рабочего органа генератора кавитации использована двухлопастная крыльчатка с клиновидным профилем с различными углами раскрытия клина. Рабочие числа оборотов регулировались до 12000 об/мин, что обеспечило получение чисел кавитации до $\chi = 0,05$.

Результаты экспериментальных исследований и методы регрессивного анализа позволили установить рациональную продолжительность кавитационной обработки, рисунок 1. Наиболее интенсивным участком изменения скорости общей концентрации органических веществ является кавитационное воздействие в диапазоне 15-30 с, этот же диапазон оказался наиболее эффективен при обеззараживании воды.

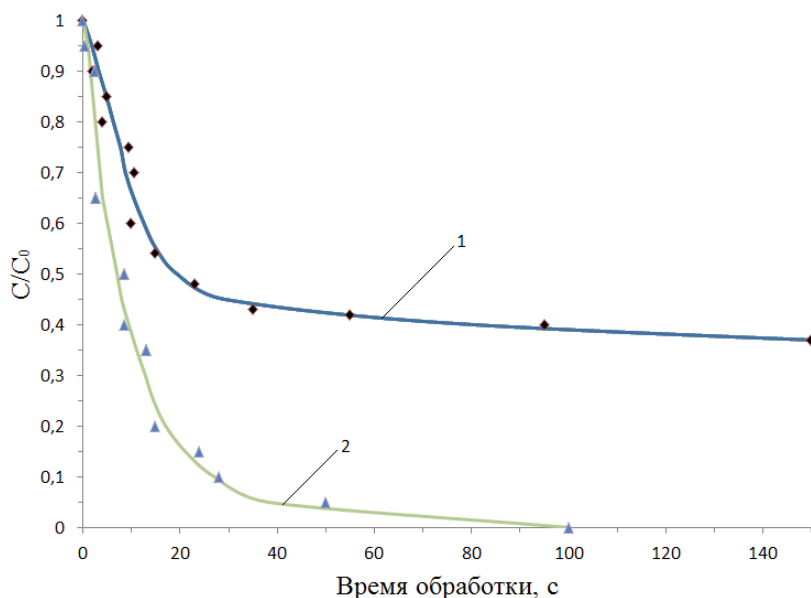


Рисунок 1 – Зависимость безразмерной концентрации C/C_0 от времени кавитационной обработки: 1 – обработка стоков содержащих кремнийорганические вещества группы Silicon Oil; 2 – обработка стоков содержащих биоорганизмы

В течение этого времени общая концентрация органических веществ снижается на 55 %, а содержание биоорганизмов - на 95 %, т.е. скорость протекания реакций при кавитационном воздействии в диапазоне 15-30 с существенно выше скорости протекания реакций при воздействии в диапазоне 30-150 с.

В третьем разделе представлены результаты анализа существующих генераторов гидродинамической кавитации. Описаны экспериментальные стенды и оборудование. Рассмотрено применение кавитационной технологии в процессе водоочистки. Представлены результаты экспериментальных исследований, поставленные на модельных растворах промышленного стока, содержащих нефтепродукты, силиконовые масла, биоорганизмы, образующиеся при промывке

силовых машин и технологических агрегатов, автомобильного транспорта. Предложена возможность применения технологий кондиционирования сточных вод на базе эффектов кавитации, возможность повторного использования очищенных промышленных сточных вод, выявлено влияние различных физико-химических параметров исходного стока на процесс их кондиционирования.

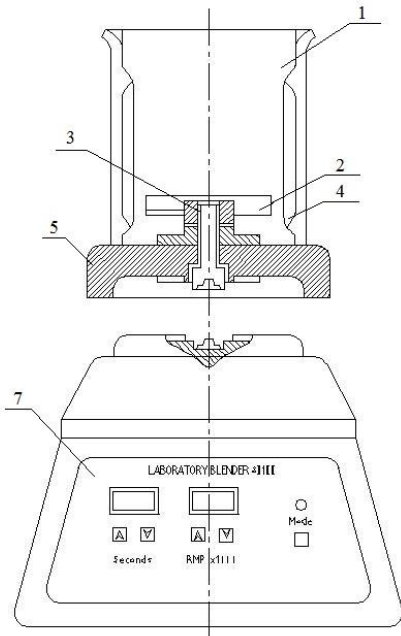


Рисунок 2 – Схема лабораторного кавитационного миксера: 1 – гидротормоз; 2 – кавитатор; 3 – вал кавитатора; 4 – дополнительный гидротормоз стенки реактора; 5 – станина реактора; 6 – вал электродвигателя; 7 – блок управления

Конструкция использованного в работе лабораторного блендера (рисунок 2) основана на применении в качестве рабочего органа суперкавитирующей крыльчатки 2, представляют собой клиновидный профиль с углом 30° . Наличие основного гидротормоза 1 и дополнительного 4 позволяют предотвращать раскручивание жидкости. Раздельный вал кавитатора 3 и электродвигателя позволяет плавно изменять число оборотов ротора и время обработки в широких диапазонах. Объём каждой отбираемой пробы составлял 100 см^3 . Анализ качества воды проводился по следующим параметрам: мутности, цветности, взвешенным веществам, общему числу биоорганизмов, общей концентрации органических и неорганических соединений, pH.

Первоначально моделировался сток, образующийся при обмывке автомобильного транспорта и технологических аппаратов. Исходные концентрации стока автомоечного комплекса представлены в таблице 1. Наложение баз хроматограмм обеспечивает достоверность результата 93 % и позволяет сделать вывод о качественном составе растворённых нефтепродуктов, представленной группой высокомолекулярных кремнийорганических соединений, соединений железа и сложных эфиров.

Качественный анализ присутствующих в воде органических и неорганических соединений представлен на рисунке 3. Определение качественного и количественного состава биообрастаний водоводов, фильтров, стенок РЧВ и узлов оборудования проводился по методике прямого подсчета на камерах Горяева. Подсчет клеток проводился по формуле:

$$N = \frac{n \cdot B}{k \cdot V}, \quad (1)$$

где N - количество организмов в 1 мл воды исследуемого пробы; n - количество организмов, обнаруженных на просмотренных дорожках (квадратах); B - количество дорожек (квадратов), на которых производился подсчет водорослей; k - первоначальный объем отобранной пробы (см^3); V - объем сгущенной пробы, см^3 .

Таблица 1 – Исходная концентрация стока автомоечного комплекса

Параметры	Расход сточных вод, $\text{м}^3/\text{сут.}$	Взвешенные вещества		pH	Органические соединения		Биоорганизмы клеток в мл
		кг/сут	мг/л		кг/сут	мг/л	
Количественный состав	5,52	4,28	777	10	1,5	100	1155133

Quality : 93
 ID : Iron, monocarbonyl-(1,3-butadiene-1,4-dicarboxylic acid, diethyl ester) a,a'-dipyridyl \$\$ IRON, (2,2'-BIPYRIDINE-N,N')CARBONYL[(2,3,4,5-ETA.)-DIETHYL 2,4-HEXADIENEDIOATE \$\$ SILIKONFETT SI ELS)

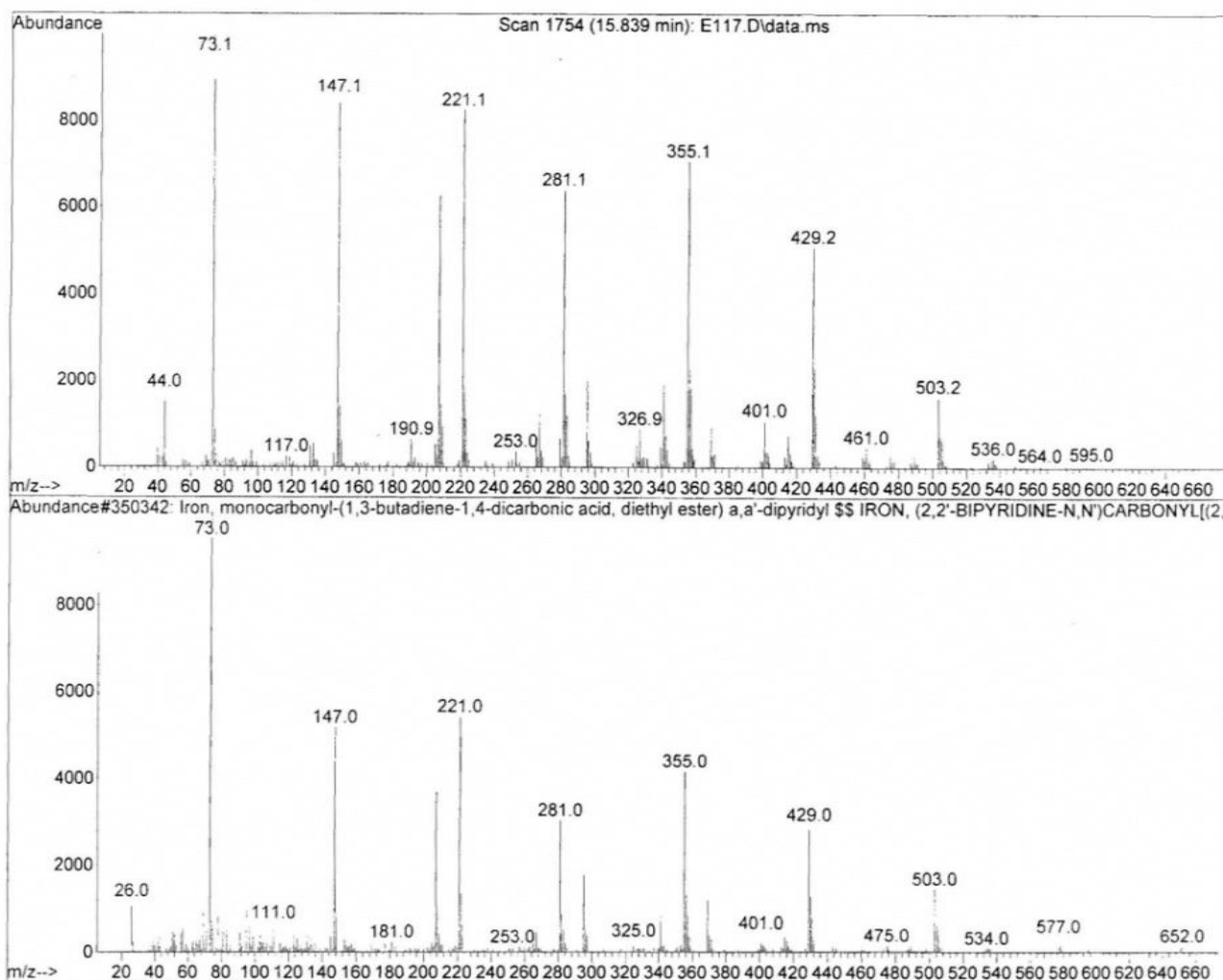


Рисунок 3 – Качественный анализ состава органических и неорганических соединений в стоке автомоечной станции

Для субстрактных прикрепленных водорослей таких как *Melozira* расчёт производится по формуле:

$$N = nV/S \quad (2)$$

где N - количество организмов на 10 см^2 поверхности субстрата; n - число организмов в просчитанной капле воды объемом $0,1 \text{ см}^3$; V - объем пробы, см^3 ; S - площадь сечения трубки в микробентометре (для бентосных проб) или площадь поверхности субстрата, с которого смыты водоросли (для проб обрастания), см^2 . Анализ полученных результатов качественного и количественного состава биообрастаний отражен в таблице 2 и произведен в соответствии с ГОСТ 18963-73 (2011) «Методы санитарно-бактериологического анализа».

Таблица 2 – Качественный и количественный анализ биообрастаний трубопроводов и технологических аппаратов

Схемы	Классификационная принадлежность	Количество клеток в 1 мл	Наносимый ущерб системе
Действующая технология очистки	<i>Chlorella</i>	105000	Образует биоконплекс с бактериями-спутниками, продукты метаболизма которых способствуют биокоррозии внутренних поверхностей оборудования.
	<i>Draparnaldia glomerata</i> var. <i>remota</i>	133	Образует стойкие обрастания распыляющей части автомоечного оборудования, стенок РЧВ и кольцевых трубопроводов. В случае попадания на фильтры вызывает полное их засорение. Вызывает повышение давления в трубопроводах оборудования, что приводит к последующему их порыву.
	<i>Heterothrix exilis</i>	150000	
	<i>Nostoc</i>	420000	
	<i>Nostoc Geosiphon</i>	15000	
	<i>Uronema terrestre</i>	15000	
	<i>Melozira</i>	450000	Образует стойкие обрастания фильтрующих кассет содержащих керамическую загрузку. Снижается скорость фильтрации и степень очистки стока.
Предлагаемая технология кавитационной обработки	Все выше обнаруженные группы водорослей не выявлены	-	Снижение ущерба вызываемого биообрастаниями (стойкий дезинфицирующий эффект)

После определения качественного состава органических соединений и выявлении их основной группы был произведен расчет их общей концентрации:

$$C = \frac{C_{\text{изм}} V_1 K_1}{V_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где C – массовая концентрация НП в пробе воды, мг/дм^3 ; $C_{\text{изм}}$ – массовая концентрация НП в гексановом экстракте пробы мг/дм^3 ; V_1 – объем гексана, взятый в экстракции см^3 ; K_1 – коэффициент разбавления, который равен единице; $V_{\text{пр}}$ – объем пробы.

Далее производился подбор режима кавитации для устранения органических соединений, биообрастаний, при компоновке оборотной системы водо-

подготовки с качеством воды соответствующим европейским и российским стандартам регламентирующим надлежащее качество технической воды. Массовая концентрация загрязняющих веществ после обработки модельного стока, при различных режимах работы кавитационного миксера, выполненная флуориметрическим методом, представлена на рисунке 4.

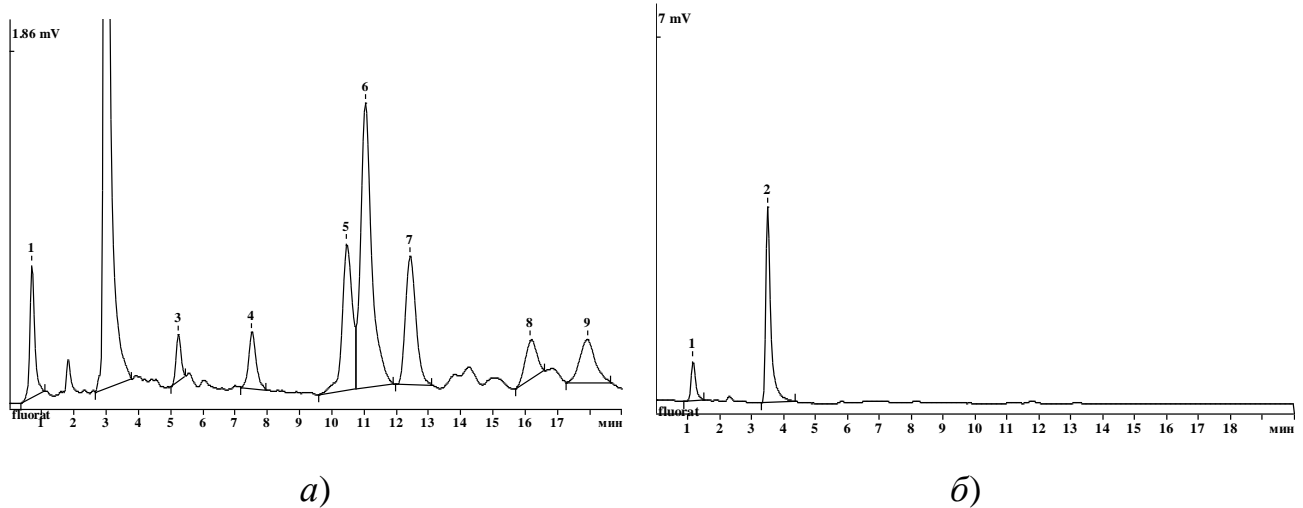
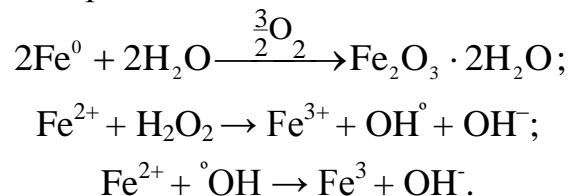


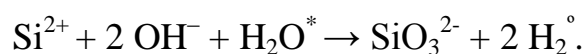
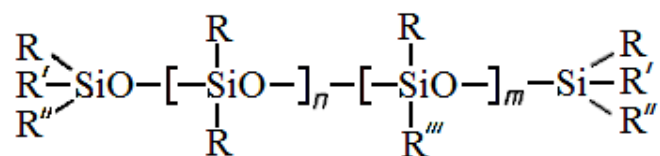
Рисунок 4 – Хроматограммы: а) - обработка при скорости 9000 об/мин, б) - 12000 об/мин

Концентрация пробы с режимом кавитации 30 с и 9000 об/мин составила $C_1 = 0,0348$ мг/л, при 12000 об/мин - $C_2 =$ следы, т.е. менее 0,0005 мг/л. Анализ результатов, полученных на газовом хроматографе, различных проб исследуемой воды свидетельствует о том, что в режиме кавитации продолжительностью 30 с и числом оборотов 12000 об/мин в воде не обнаруживаются растворённые нефтепродукты, а хроматограмма (рисунок 5 б) представляет собой пики фона. Как видно из представленных данных, наблюдается удаление вредных веществ из начального стока.

Анализ литературных данных и экспериментальных результатов, позволяет сделать вывод о наиболее вероятных направлениях реакций окисления железа, эфиров и разложения кремнийорганических жидкостей. Окисление железа протекает в соответствии с реакциями:



Механическое воздействие кавитации на частицы железа заключается в разрушающем воздействии ударных волн и кумулятивных микроструек. Увеличение количества H_2O после кавитации, позволяет предположить, что окисление эфиров происходит до простых органических веществ CO_2 и H_2O . Разложение же силиконовых масел происходит из-за разрушения цепочки макромолекул с образованием водорода, углекислого газа и осадка, состоящего из силиката и диоксида кремния:



Наиболее вероятное направление реакции разложения кремнийорганических соединений под воздействием гидродинамической кавитации следующее - при нагревании высокомолекулярного кремнийорганического соединения вначале происходит деполимеризация макромолекул с образованием смеси циклических полидиалкилсилоксанов, из которых низкокипящие удаляются из сферы реакции, высококипящие же снова деполимеризуются, и, таким образом, конечными продуктами реакции являются только низкомолекулярные соединения.

Для подтверждения полученных результатов по очистке сточных вод от нестойкого мономерного деметилсиланона R_2SiO (который немедленно полимеризуется), кремнийорганических соединений, эфиров и биоорганомов были проведены серии опытов на модельном и натурном стоке, которые подтвердили первоначальные результаты.

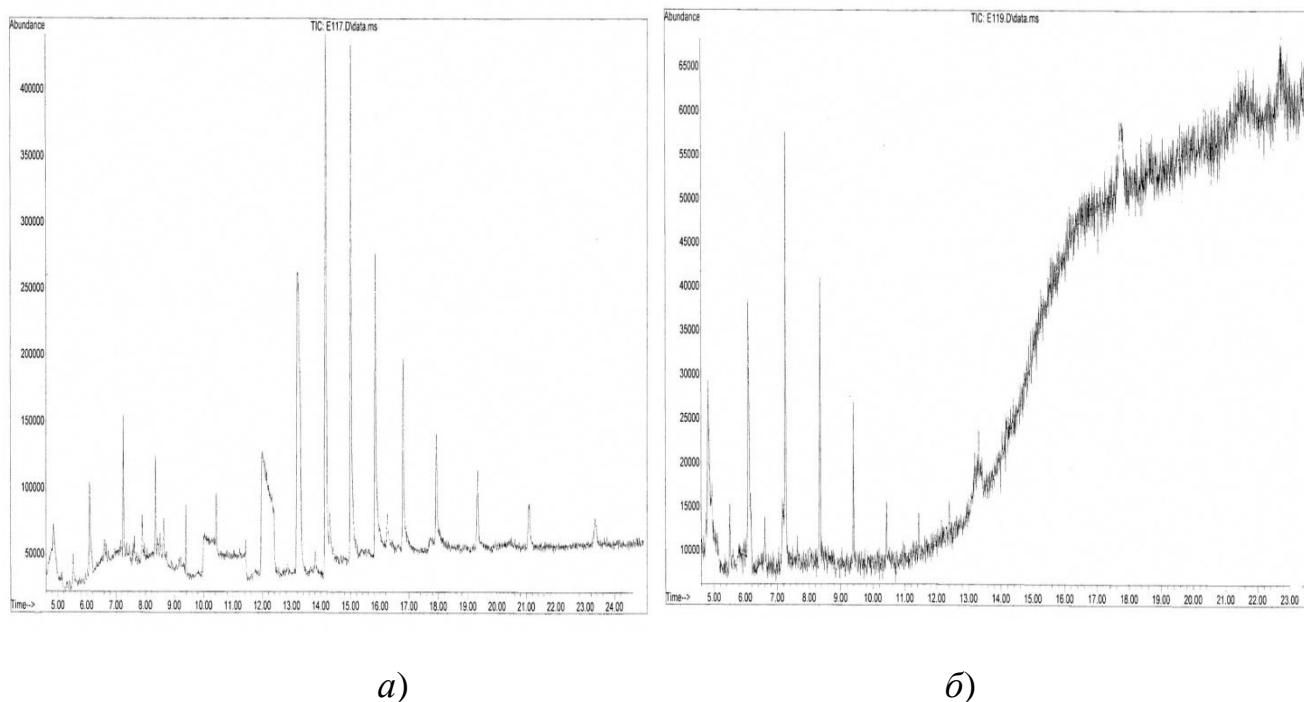


Рисунок 5 – Хроматограммы: а) - обработка при скорости 9000 об/мин; б) - 12000 об/мин

Производственные сточные воды, прошедшие предварительную очистку на фильтрах, в основном загрязнены эмульгированными органическими веществами (пики № 7, 8, 9, 10, 11), входящими в группу силиконовых масел, и неорганические вещества с высокой степенью дисперсности (пики № 1, 2, 3, 4, 5, 6) (рисунок 6). Начальная концентрация органических соединений в такой воде была 115,7 мг/л. После кавитационной обработки пробы наблюдается разложение кремнийорганических соединений до неорганических, концентрация которых составила 47,7 мг/л. Сравнительный анализ проб на токсичность, проведенный по методике биотестирования на *Daphnia*, указывает на снижение

токсичности стока в 63 раза. Это обстоятельство подтверждает предполагаемый ход реакции разложения кремнийорганических соединений до низкомолекулярных не канцерогенных соединений и экоэффективность данной технологии.

Интенсификация химических процессов с помощью эффектов кавитации зависит не только от характеристик работы кавитационного оборудования или его конструкции, но и от характеристик среды, в которой возникает кавитация, в частности, от ее солевого состава. Присутствие таких солей как NaCl, KSO₄, CaCO₃ изменяет распределение водной и органической фаз, изменяя коэффициент распределения, увеличивает интенсивность схлопывания кавитационных пузырьков, а также инициирует сильные окислительные реакции.

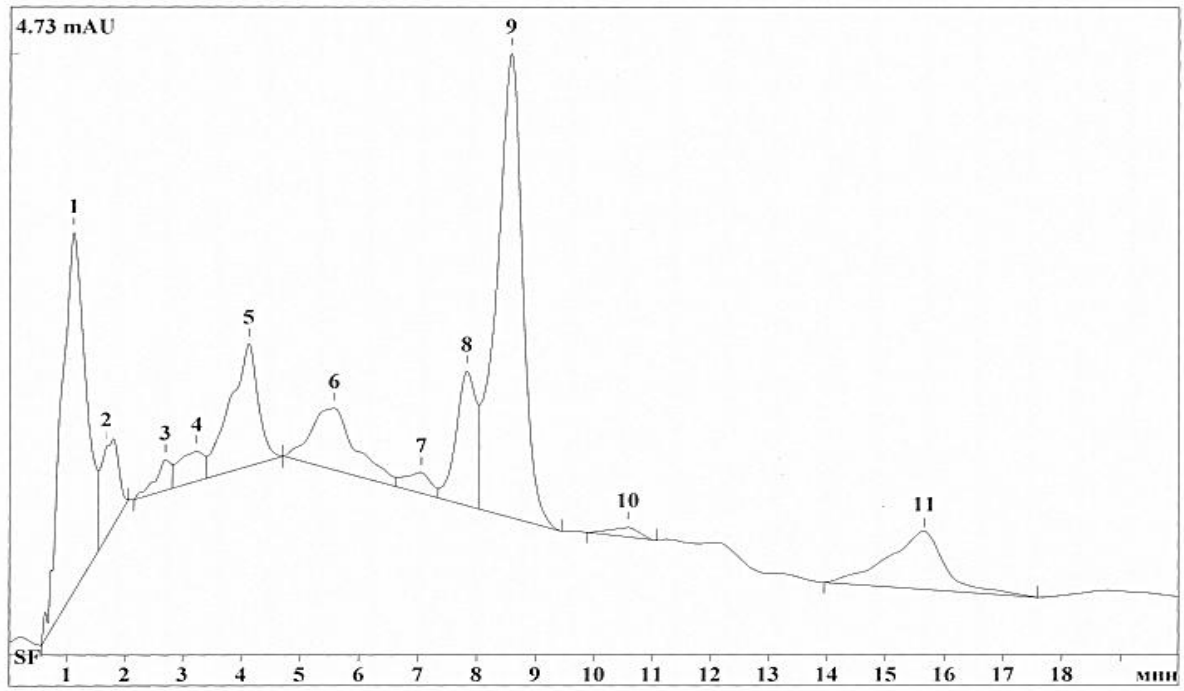
Влияние солевого состава водной среды на эффективность процесса очистки стока изучалось путем проведения очистки на растворах, приготовленных на водопроводной воде с добавлением солей включающих катионы Na⁺, K⁺, Ca²⁺ и дистиллированной воде. Кинетические зависимости, характеризующая степерь очистки представлены на рисунке 7. Видно, что при отсутствии ионов солей окисление органических соединений идёт медленнее, т. к. хлориды являются катализаторами окислительных реакций, а сульфаты являются деполимеризаторами макромолекул.

Влияние pH среды определялось путем подщелачивания модельного раствора, приготовленного на водопроводной водой с нейтральным pH. При увеличении значений pH скорость реакций падает, как и интенсивность кавитационного воздействия. Лучшие результаты окисления достигаются в слабощелочной среде (pH = 7,2-8,5), рисунок 8.

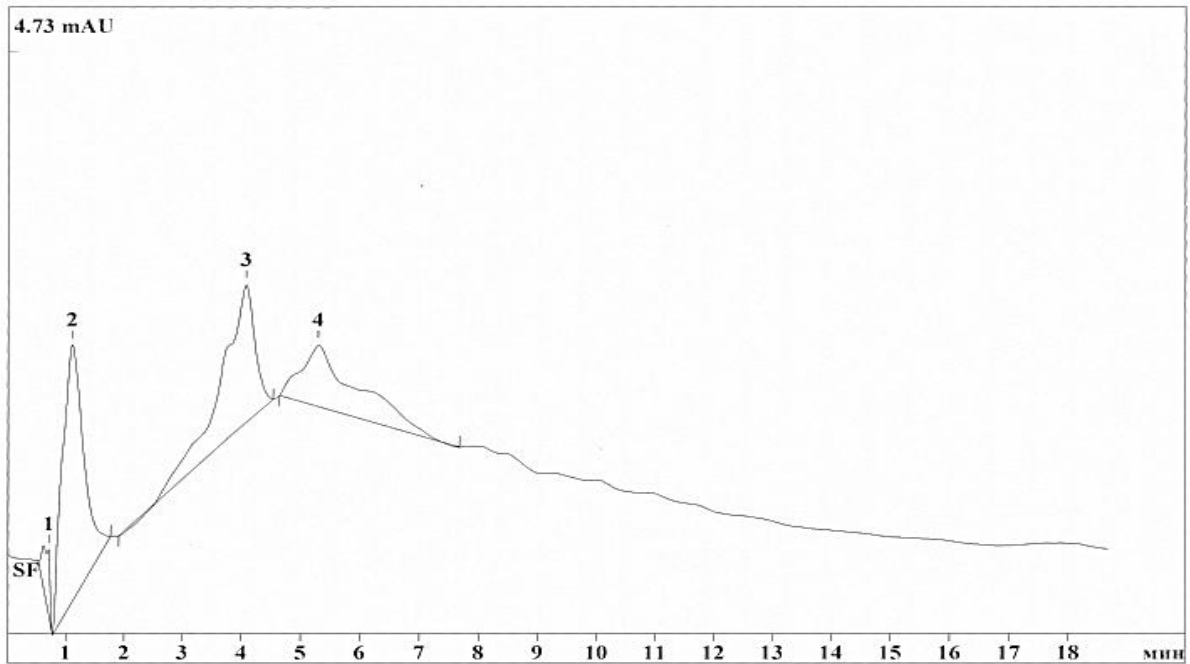
В щелочной среде при кавитационной обработке идёт быстрое образование гидроксида кремния, который, образуя коллоид, «блокирует» реакции ионизации и возбуждения молекул воды, а также диссоциации молекул H₂O, т.е. связывая молекулы воды не химически, а удерживая их адсорбцией.

Одним из способов повторного использования сточных вод в энергетических системах и комплексах является условие обеззараживания очищенного стока и освобождении его от клеток выносимого ила. С повышением требований, предъявляемых к сбросной воде, возникает необходимость в более высокой степени очистки, которую используемые очистные сооружения обеспечить не могут. Это связано с двумя основными недостатками: плохой очисткой в холодное время и большим загрязнением водорослями в теплое время года. Окончательное отмирание водорослей происходит уже в водоёмах принимающих очищенные сточные воды и связано с процессами разложения и гниения. Кроме того, наличие остатков водорослей и продуктов их разложения вызывает нежелательное увеличение биогенных элементов в водоеме.

При кавитационном воздействии происходит полное разрушение микроорганизмов и обеззараживание выносного ила (см. таблицу 3), что позволяет рекомендовать внедрение кавитационной технологии в сооружениях доочистки стока в энергетических системах на заключительном этапе. Она должна отвечать следующим требованиям: процесс окисления активными частицами, возникающими при гидродинамической активации, должен происходить во всем объеме потока обрабатываемой воды, обеспечивать высокую эффективность и производительность при очистке различных по составу стоков, долговечность конструктивных элементов оборудования и т.п.



a)



б)

Рисунок 6 – Хроматограммы: а) - исходная вода; б) - обработанная при скорости 10000 об/мин

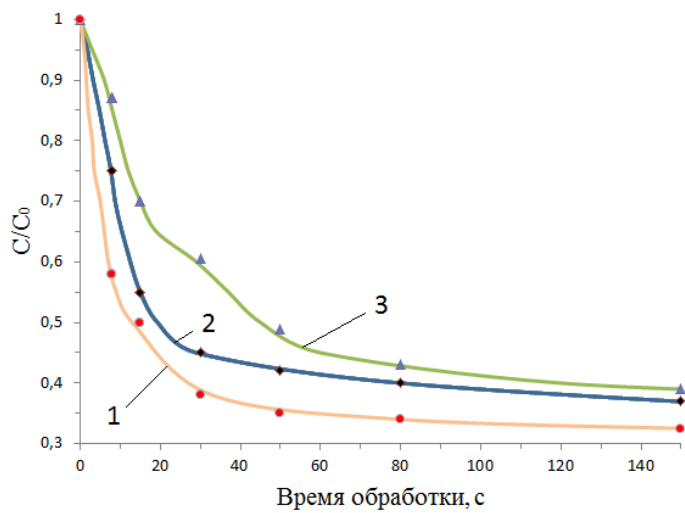


Рисунок 7 – Влияние солесодержания на процесс очистки: 1 – с добавлением солей; 2 – на водопроводной воде; 3 – на дистиллированной воде

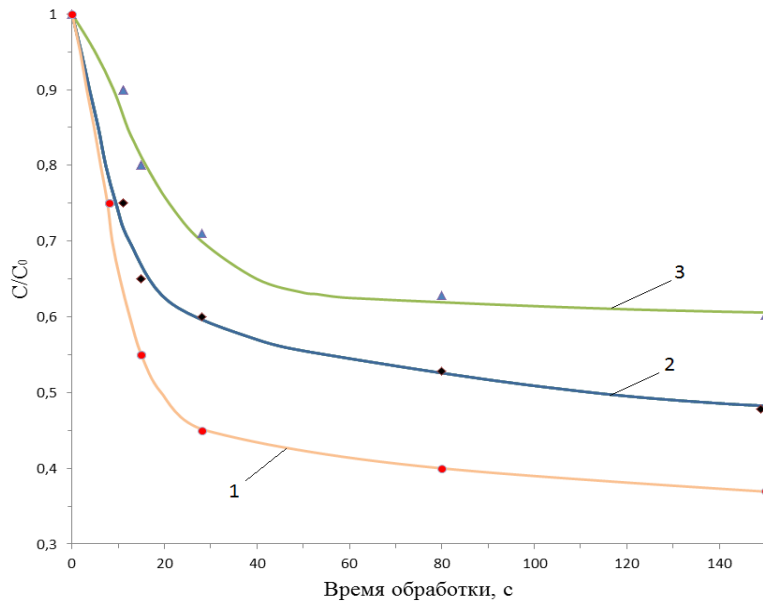


Рисунок 8 – Влияние pH на процесс очистки:
1 – pH = 7,2; 2 – pH = 8,5;
3 – pH = 11

Таблица 3 – Качественный состав сточной воды

Режимы обработки	Термотолерантные колиформные бактерии (КОЕ в 100 мл)	Химическое потребление кислорода(мг/дм ³)
Без обработки	9010	17,6
10000 об/с, 30 сек	900	34,8
10000 об/с, 60 сек	60	42,6
10000 об/с, 90 сек	Не обнаружены	48,7

В четвертом разделе представлены результаты промышленных испытаний кавитационных установок, использованных в системе доочистки промышленных стоков энергетических систем. Представлены разработанные технологические схемы для предприятий, в основе которых лежит использование струйного кавитатора для очистки сточных вод, содержащих органические вещества и различные виды биоорганизмов. Исходный сток pH - 10; обратная вода до реконструкции pH - 8,2; обратная вода рекомендуемой схемы pH - 7,2. Разработана технология и схемы многократного использования очищенных сточных вод, рекомендованные для использования в оборотной системе водопользования энергетических систем и комплексов, транспортных цехов предприятий, а также для предприятий со схожим качественным составом стока.

Основными задачами внедрения кавитационной установки в оборотную систему водоснабжения (рисунок 9) являлись: доведение стока до норм ПДК по нефтепродуктам, удаление всех биоорганизмов, возможность многократного использования воды и снижение водопотребления в целом. Преимущества данной системы: предлагаемая схема оборотного водоснабжения является замкнутой, следовательно, сброса в централизованную канализационную сеть города не осуществляется; рекомендуемая к применению кавитационная установка позволяет достичь 100 % очистки оборотной воды; срок окупаемости полтора года, высокая экономическая эффективность; технология экологически безопасна и соответствует задаче реализации программы энергосбережения.

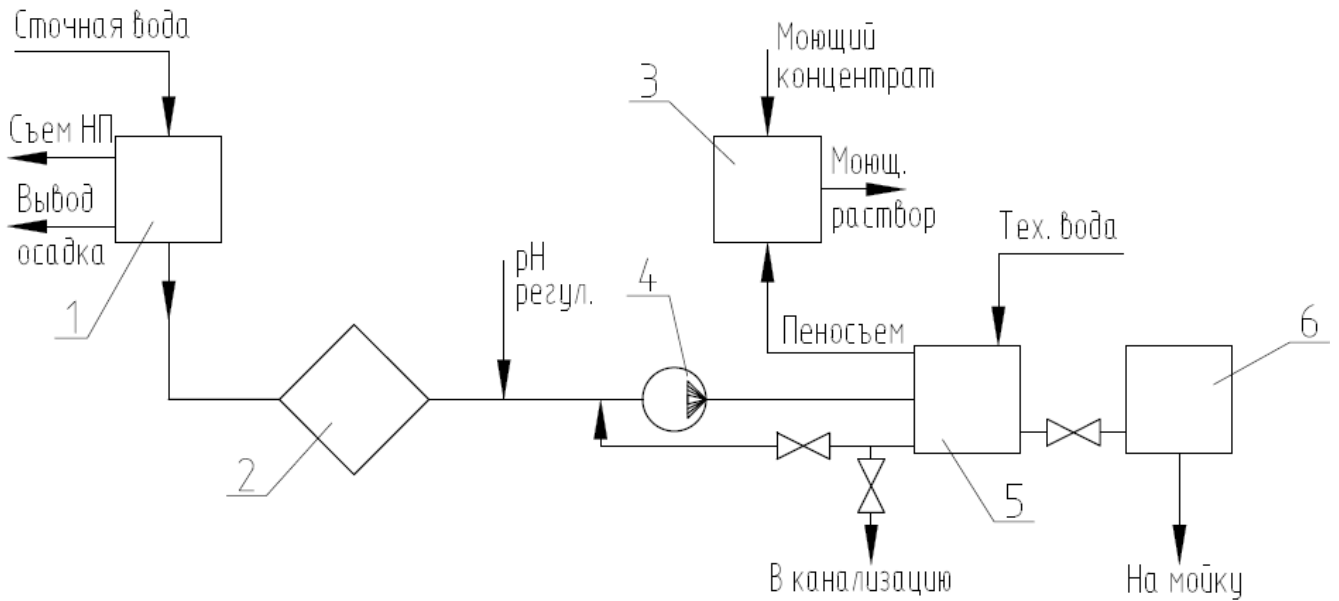


Рисунок 9 – Блок-схема очистки сточных вод: 1 – отстойник со встроенной песколовкой; 2 – скорый фильтр; 3 – емкость моющего концентрата; 4 – насос; 5 – емкость с кавитирующей установкой; 6 – резервуар чистой воды

Разработанная технология и схемы использования биологически очищенных сточных вод, рекомендованные для внедрения на очистных сооружениях, позволяют использовать доочищенную воду для технических нужд предприятий, что является весьма перспективным на сегодняшний день. Предлагаемая технологическая схема (рисунок 10) позволяет обеззараживать практически весь объем очищенных сточных вод после вторичных источников загрязнения.

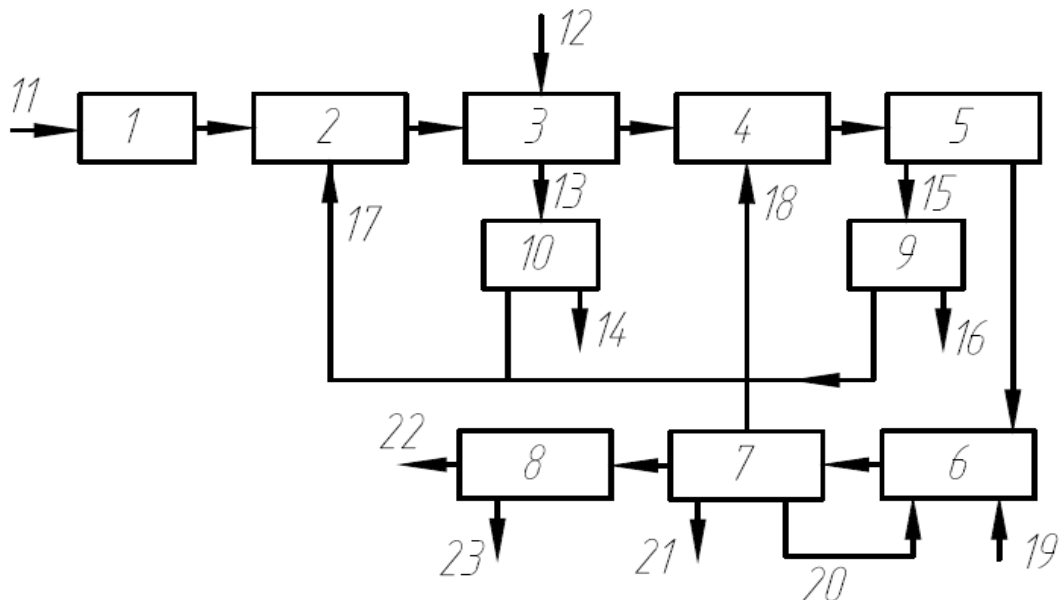


Рисунок 10 – Предлагаемая технологическая схема очистки сточных вод: 1 – насосная с решётками; 2 – приёмная камера; 3 – песколовка; 4 – преаэратор; 5 – первичный отстойник; 6 – аэротенки; 7 – вторичный отстойник; 8 – модуль с кавитационной очисткой; 9 – иловые площадки; 10 – песковые бункеры; 11 – поступающая сточная вода; 12 – техническая вода; 13 – песковая пульпа; 14 – песок в отвал; 15 – осадок первичных отстойников; 16 – осадок на иловые площадки; 17 – дренажная вода; 18 – циркуляционный активный ил; 19 – воздух; 20 – избыточный ил; 21 – очищенная вода в р. Енисей; 22 – обеззараженная техническая вода в город; 23 – обеззараженная вода для технических нужд предприятий

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе комплексного подхода решена задача усовершенствования методов, технологических схем и устройств для повышения эффективности работы оборудования для кондиционирования сточных вод энергетических систем с использованием термодинамических эффектов кавитации и получен ряд новых научных и практически важных результатов, в том числе:

1. Впервые установлено влияние режимных параметров кавитационной обработки (температуры, водородного показателя рН, солесодержания, скорости и времени обработки и др.) на изменение физико-химических, бактериологических и биологических характеристик обрабатываемых сточных вод в энергетических системах и комплексах. Разработаны практические рекомендации по применению кавитационной технологии в сооружениях доочистки стоков, позволяющие повысить точность определения оптимальных режимов кавитационной обработки с учетом надежности и долговечности проектируемого оборудования;

2. Научно обоснованы и реализованы условия и механизм использования термодинамических эффектов кавитации для очистки вод в трубопроводных системах энергетических комплексов от органических соединений и биоорганизмов с точки зрения экологической и экономической целесообразности;

3. Разработан и аппаратурно реализован метод очистки сточных вод с использованием гидродинамической кавитации, в отличие от известных, позволяющий снизить загрязнение окружающей среды органическими соединениями, биоорганизмами и продуктами их жизнедеятельности и метаболизма;

4. Предложены и апробированы в промышленных условиях технологические схемы с использованием ГДК-реактора кондиционирования сточных вод, содержащих различные загрязнители, до уровня требований, предъявляемых к сбросу в системы городской канализации и повторно используемой технической воде. Разработана, обоснована и доведена до стадии практической реализации технология предварительной обработки стоков содержащих нефтепродукты и эмульгированные масла;

5. Разработан гидродинамический кавитационный реактор для очистки сточных вод в энергетических системах и комплексах, исследованы его характеристики, установлены его окислительная способность и эффективность, определены зависимости изменения этих параметров от различных физических и химических факторов обрабатываемых сред.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:

1. Дубровская, О. Г. Проблемы биообрастания в оборотных системах замкнутых циклов водопользования и пути их решения / О. Г. Дубровская, **В. В. Евстигнеев**, В. А. Кулагин // Безопасность жизнедеятельности. 2012. - № 3. - С. 26-30;

2. Дубровская, О. Г. Кондиционирования сточных вод энергетических систем и комплексов / О. Г. Дубровская, **В. В. Евстигнеев**, В. А. Кулагин // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 6 (2011 4) 665-675;

3. **Евстигнеев, В. В.** Кавитация в технологиях очистки сточных вод / В. В. Евстигнеев, В. А. Кулагин // В мире научных открытий. 2010. - № 5 (11). Ч. I. – С. 87-90;

4. **Евстигнеев, В. В.** Гидротермодинамическая технология обработки сточных вод / В. В. Евстигнеев, В. А. Кулагин // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. 2009. – Т. 14. – № 6. – С. 242-245;

Статьи, опубликованные в других изданиях и материалы научно-технических конференций:

5. **Евстигнеев, В. В.** Современное состояние очистки сточных вод автомоечных станций / В. В. Евстигнеев, О. Г. Дубровская // Вестник Ассоциации выпускников КГТУ. – Красноярск: ПИК «Офсет», 2010. - Вып. 19. – С. 83-85;

6. **Евстигнеев, В. В.** Гидротермодинамическая технология обработки сточных вод / В. В. Евстигнеев // Вестник Ассоциации выпускников КГТУ. – Красноярск: ПИК «Офсет», 2010. - Вып. 18. – С. 59-61;

7. **Евстигнеев, В. В.** Оценка влияния кавитационной обработки на вредные вещества сточных вод / В. В. Евстигнеев, В. А. Кулагин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Матер. XI Всеросс. НПК. – Красноярск: МВДЦ «Сибирь», 2010. – С. 275-279;

8. **Евстигнеев, В. В.** Анализ влияния кавитационной обработки природных и сточных вод в суперкавитационном миксере / В. В. Евстигнеев, В. А. Кулагин // Энергетика в глобальном мире: сб. тезисов докладов первого Международного научно-технического конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010. - С. 421-423;

9. **Евстигнеев, В. В.** Гидротермодинамическая обработка природных и сточных вод с использованием эффектов кавитации / В. В. Евстигнеев // Наука и образование – 2010: Материалы НТК. – Мурманск, 2010. - С. 75-78;

10. **Евстигнеев, В. В.** Использование кавитационной обработки для очистки сточных и природных вод от объектов живой природы / В. В. Евстигнеев // Образование, наука, инновации: Материалы региональной НПК. – Кемерово: КузГТУ, 2010. – С. 65-68;

11. **Евстигнеев, В. В.** Перспективы обработки сточных и природных вод методом кавитационного воздействия / В. В. Евстигнеев, В. А. Кулагин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Матер. X Всеросс. НПК. – Красноярск: МВДЦ «Сибирь», 2009. – С. 295-300.

Евстигнеев Вячеслав Викторович

Совершенствование технологии кондиционирования сточных вод энергетических систем и комплексов

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать _____

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,0

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано:

Полиграфический центр Библиотечно-издательского комплекса

Сибирского федерального университета

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а