

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
(институт)

Кафедра «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение»

08.04.01 «Строительство»
(код и наименование направления подготовки)

«Водоснабжение городов и промышленных предприятий»
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Исследование возможной области применения кавитации в
системах водоснабжения»

Студент	<u>В.А. Писарев</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>И.А. Лушкин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>В.В. Петрова</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., доцент В.М. Филенков _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ Г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент М.Н. Кучеренко _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ Г.

Тольятти 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1 Анализ кавитационных процессов в системах водоснабжения и возможные направления их использования	5
1.1 Теория кавитационных процессов	6
1.2 Положительные и отрицательные аспекты кавитации	15
1.3 Опыт применения установок на основе кавитации	19
1.4 Кавитация в системах водоснабжения.....	30
1.5 Возможные направления применения кавитации в системах водоподготовки	33
Выводы по главе 1.....	42
Глава 2 Разработка конструкции кавитатора и испытательного стенда	43
2.1 Анализ направлений совершенствования существующих конструкций кавитаторов	43
2.2 Разработка модели кавитатора.....	60
2.3 Разработка схемы кавитационной установки.....	66
Выводы по главе 2.....	69
Глава 3 Возможная область применения испытанного кавитатора в системах водоснабжения.....	70
3.1 Анализ полученных результатов испытания кавитатора.....	70
3.2 Область применения кавитатора в водоподготовке	78
3.3 Возможные технологические схемы водоподготовки с кавитатором.....	80
Выводы по главе 3.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	85

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы: Задача любых очистных сооружений – бесперебойная подача потребителям требуемых расходов воды требуемого качества. Эффективность работы очистных сооружений систем водоснабжения во многом зависит от работы реагентного хозяйства. Повышение качества смешения воды с реагентами является актуальной задачей. Применение кавитаторов позволит ускорить и оптимизировать химические реакции.

Объект исследования: кавитатор в реагентном хозяйстве водоподготовки.

Предмет исследования: кавитация, как метод очистки воды.

Целью работы является исследования явления кавитации, совершенствование существующих и разработка новых кавитационных методов очистки вод в водозаборах систем водоснабжения.

Для реализации цели поставлены следующие научно-технические задачи:

1. Анализ конструкций и области применения кавитаторов;
2. Анализ направлений совершенствования существующих кавитаторов;
3. Анализ эффективности работы кавитаторов в различных схемах водоподготовки;
4. Разработка конструкции кавитаторов в технологической схеме водоподготовки.

Научная новизна заключается в:

- теоретическом обосновании конструкций кавитационных установок;
- разработке технологических схем кавитационных установок;
- анализе опытных данных при применении кавитационных установок.

Практическая значимость работы заключается в том, что предлагаемые конструктивные решения на основе гидродинамических и ультразвуковых кавитаторов позволят улучшить качество очистки воды и снизить тем самым нагрузку на очистные сооружения.

Личный вклад автора состоит в обосновании темы, цели, задач и разработке конструктивных решений кавитационных устройств на основе гидродинамических и ультразвуковых кавитаторов, создание опытной модели и её испытание.

На защиту выносятся: технологические схемы водозаборно-очистных сооружений с применением гидродинамических и ультразвуковых кавитаторов.

Апробация работы. Результаты работы представлены на конференциях и в сборниках трудов:

- 1 Международной научно-практической конференции «Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России». – Пенза, МНИЦ, 2017.
- 2 Международной научно-практической конференции «Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии». – Пенза, МНИЦ, 2017.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, общих выводов, библиографии из 60 наименований. Общий объем работы 90 - стр., включая 38 иллюстрацию и 2 таблицы.

Глава 1 Анализ кавитационных процессов в системах водоснабжения и возможные направления их использования

Кавитация (от лат. *Cavita* — пустота) – это образование полостей пара в жидкости, т.е. небольшие жидкие зон, свободных ("пузыри" или "пустоты") – это следствие сил, действующих на жидкость. Обычно это происходит, когда жидкость подвергается воздействию резкого изменения давления, которые вызывают образование полостей в жидкости, где давление относительно низкое. При воздействии высокого давления, пустоты сжимается, и может создавать мощную ударную волну.

Кавитация является основной причиной износа в некоторых технических условиях. Рушится пустоты, которые лопаются вблизи поверхности металла вызывают циклические напряжения благодаря многократной имплозии. Это приводит к поверхностной усталости металла, вызывая типа носить также под названием "кавитация". Наиболее типичными примерами такого рода одежда для насосов рабочие колеса и отводы, где внезапное изменение в направлении жидкости происходит. Кавитация обычно делятся на два класса поведения: инерционный (или переходных) кавитация и неинерциальной кавитации.

Инерционная кавитация-это процесс, в котором пустота, или пузырь в жидкости быстро разрушается, создавая ударную волну. Инерционная кавитация возникает в природе в результате ударов креветки богомола и пистолет креветки, так же, как и в сосудистых тканях растений. В рукотворных объектах, это может произойти в регулирующие клапаны, насосы, пропеллеры и турбинки.

Неинерциальные кавитация-это процесс, в котором пузырь в жидкости заставляют колебаться в размер или форму за счет некоторой формы энергии, такие как Акустическое поле. Такое кавитация часто используется в

ультразвуковой очистки ванны, а также можно наблюдать в насосы, пропеллеры и т.д.

Поскольку ударные волны образуются в результате развала пустоты являются достаточно сильными, чтобы вызвать значительные повреждения движущихся частей, кавитация, как правило, нежелательное явление. Очень часто специально избегают в конструкции машин, таких как турбины или пропеллеры, и исключения кавитации является одним из важных направлений в исследовании динамики жидкости. Однако, иногда полезно и не причиняет вреда, когда пузыри рушатся вдали от машин, например, в суперкавитации.

1.1 Теория кавитационных процессов

Инерционная кавитация была впервые изучены Лордом Рэлеем еще в конце 19 века, когда он считал крах сферической пустоты в жидкости.[1] Когда объем жидкости подвергается достаточно низкое давление, она может разорваться и образовать полость. Это явление создания кавитации и может произойти на лопасти быстро вращающегося гребного винта или на любой поверхности, вибрирующей в жидкости с достаточной амплитудой и ускорением. Река с быстрым течением может привести к кавитации на поверхности скал, особенно после подения, например на водопад.

Другие способы генерации кавитационных пустот приложить местное излучение энергии, таких как интенсивного сфокусированного лазерного импульса (оптическая кавитация) или при электрическом разряде через искровой. Паров газов испаряется в полость из окружающей среды; таким образом, полость не является идеальным вакуумом, но имеет относительно низкое давление газа. Такой пузырь низкого давления в жидкости начинает схлопываться из-за повышения давления окружающей среды. Как пузырь схлопнется, давления и температуры паров внутри увеличивается. Пузырь рано или поздно рушится в минуту фракция от его первоначального размера, после чего газ внутри рассеивается в окружающей жидкости через довольно

жестокий механизм, который вырабатывает значительное количество энергии в виде ударной волны и видимый свет. В момент полного краха, температура пара внутри пузырька может достигать нескольких тысяч градусов Кельвина, а давление-несколько сотен атмосфер.[2]

Инерционная кавитация может происходить также в присутствии акустического поля. Микроскопические пузырьки газа, которые обычно присутствуют в жидкости будет вынужден колебаться из-за применения акустического поля. Если акустическая интенсивность достаточно высока, пузырьки, сначала увеличиваются в размерах, а затем стремительно рухнуть. Следовательно, инерциальная кавитация может произойти, даже если разрежения в жидкости недостаточна для Рэлея-как пустота возникает. Высокой мощности ультразвук обычно используют инерционной кавитации микроскопических пузырьков вакуума для обработки поверхностей, жидкостей и гидросмесей.

Физический процесс кавитации возникновения схожа с кипением. Основное различие между этими двумя путями термодинамические, которые предшествуют формированию пар. Кипение происходит, когда местная температура жидкости достигает температуры насыщения, и далее тепло поступает, чтобы позволить жидкости достаточно изменения фазы в газ. Кавитация зарождения происходит, когда локальное давление достаточно далеко ниже давления насыщенных паров, значение заданной прочности жидкости при определенной температуре.[3]

Для того, для создания кавитации происходят кавитационные "пузырьки", как правило, необходимо поверхность, на которую они могут пузырькового. Эта поверхность может быть предоставлена по бокам контейнера, от наличия примесей в жидкости, или мелкие нерастворенные микропузырьков внутри жидкости. Общеизвестно, что гидрофобные поверхности стабилизирует мелких пузырьков. Эти уже существующие

пузырьки начинают увеличиваться в размере, когда они подвергаются давлению ниже порогового давления, называется порогом Блэйка.

Давление пара здесь отличается от метеорологических определения давления паров, которая описывает парциальное давление воды в атмосфере на некоторой величины менее 100% насыщения. Поэтому давление пара как связанные с кавитацией понимается давление пара в условиях равновесия и может быть более точно определен как состояние равновесия (или насыщенные) давление пара.

Неинерциальные кавитация – это процесс, при котором мелкие пузырьки в жидкости заставляют колебаться в присутствии акустического поля, когда интенсивность акустического поля недостаточен, чтобы вызвать полный крах пузыря. Эта форма кавитации приводит к эрозии значительно меньше, чем инерционная кавитация, и часто используется для очистки деликатных материалов, таких как кремниевые пластины. При развитой кавитации в жидкости образуются крупные полости (каверны), заполненные парогазовой смесью и примыкающие к движущемуся телу. Каверны могут замыкаться на теле (частичная кавитация) или простираться за телом вниз по потоку.

Факторы, влияющие на конфигурацию и динамику каверны:

- 1) скорость и глубина движения тела;
- 2) форма тела;
- 3) состояние пограничного слоя перед точкой срыва струй жидкости;
- 4) наличие и отсутствие поддува.

Гидродинамическая кавитация описывает процесс парообразования, поколение пузырь и пузырь взрыва, который происходит в текущей жидкости в результате уменьшения и последующего увеличения локального давления. Кавитация происходит только в случае, если давление снижается в какой-то момент ниже давления насыщенных паров жидкости и последующее восстановление выше давление пара. Если восстановление

давления не выше давления паров, затем мигает, как говорят, произошло. В трубопроводах, кавитации, как правило, возникает либо в результате увеличения кинетической энергии (через сужение зоны) или увеличением диаметра трубы.

Гидродинамическая кавитация может быть произведено путем прохождения жидкости через суженный канал на определенной скорости потока или путем механического вращения объекта через жидкость. В случае сужения канала и на основе конкретных (или уникальный) геометрия системы, сочетание давления и кинетической энергии может создать гидродинамические кавитационные каверны на выходе из местного сужения создавая высокие энергетические пузыри кавитации.

Процесс генерации пузыря и последующего роста и коллапса кавитационных пузырьков, приводит к очень высокой плотности энергии, и в очень высоких локальных температур и локальных давлений на поверхности пузырьков за очень короткое время. Общая жидкостной среде, поэтому остается на условия окружающей среды. При неконтролируемом, кавитация повреждения; контролируя поток кавитации, однако сила может быть использована и неразрушающие. Контролируемая кавитация может быть использована для усиления химических реакций или распространения определенных неожиданную реакцию, потому что свободные радикалы образуются в процессе из-за диссоциации паров в ловушке в кавитирующих пузырьков.

Отверстия и трубки Вентури широко используется для создания кавитации. Труба Вентури имеет неотъемлемое преимущество над отверстием из-за своей гладкой сужаются и расширяются частей, такие, что она может генерировать более высокие скорости потока в горле для данного перепада давления на нем. С другой стороны, отверстие имеет то преимущество, что он может вмещать большее количество отверстий (больше периметра отверстия) в заданном сечении трубы.[4]

Явление кавитации можно регулировать для повышения производительности высокоскоростных морских судов и снарядов, а также в технологиях обработки материалов, в медицине и т. д. Контроль кавитирующих потоков в жидкости может быть достигнуто только путем продвижения математические основы кавитационных процессов. Эти процессы проявляются по-разному, наиболее распространенные и перспективные для управления пузырьковой кавитации и суперкавитации. Первые точные классические решения, возможно, должны быть зачислены на хорошо известное решение г. Гельмгольц в 1868 году. Первых отличает исследований академического типа по теории кавитирующем потоке со свободными границами и суперкавитирующие были опубликованы в книге струй, просыпается и полостей и теории струй идеальной жидкости. широко используется в этих книгах была хорошо разработанной теории конформных отображений функций комплексной переменной, позволяющей получить большое количество точных решений плоских задач. Еще одним местом объединения существующих точных решений приближенных и эвристических моделей была исследована в работе Гидродинамика течений со свободными границами, которое позволило усовершенствовать применяемые методики расчета, основанные на праве полости расширения независимости, теории пульсаций и стабильности удлиненных осесимметричных полостей и т. д. и в размерности и методы подобия в задачах гидромеханики судов.

Естественным продолжением этих исследований была недавно представлена в Гидродинамике Кавитационных течений – энциклопедическая работа, охватывающая все лучшие достижения в этой области за последние три десятилетия, и смешивает классические методы математического исследования с современными возможностями компьютерных технологий. Они включают разработку нелинейных численных методов решения проблем с 3D-кавитацией, уточнение известных

плоскости линейной теории, развитие асимптотической теории осесимметричных и почти осесимметричных потоков и т. д. По сравнению с классическими подходами, новая тенденция характеризуется расширением теории в 3D потоков. Он также отражает определенные корреляции с текущими работами прикладного характера на гидродинамика суперкавитирующих тел.

Гидродинамическая кавитация может также улучшить некоторые промышленные процессы. Например, многопустотные кукурузы суспензии показывает более высокие урожаи в производстве этанола по сравнению с uncavitated кукурузы шлама в сухом измельчительного оборудования.

Это также используется в минерализации био-тугоплавких соединений, которые в противном случае потребуются очень высокой температуре и давлении условия, поскольку свободные радикалы, образующиеся в процессе вследствие диссоциации паров, оказавшихся в кавитационных пузырьков, что приводит к интенсификации химических реакций или даже может привести к распространению определенных реакций не представляется возможным в противном случае окружающие условия

Гипотезы зарождения кавитации и разрушения кавитационных пузырьков.

Возникновению кавитации, т.е. наступлению момента разрыва сплошности жидкой среды, должно предшествовать понижение давления по крайней мере до значения давления насыщенных паров.

Существует *две основные гипотезы* зарождения кавитации. Согласно одной из них в воде содержатся газовые пузырьки малых размеров. При давлении, меньшем, чем p_v , внутри пузырьков возникает интенсивное выделение газа, пузырек начинает расти и таким образом наступает пузырьковая кавитация. Начало роста пузырька зависит от значения соотношения его критического размера и давления внутри пузырьков. При

всей своей наглядности эта гипотеза выдвигает ряд вопросов, на которые трудно ответить. Во-первых, каков состав пузырька? Если это пар, то почему он не конденсируется при давлении $p > p_v$, а если это воздух, то почему он не растворяется? Причину существования стабилизированных газообразных ядер видят в существовании поверхностного натяжения. Но и в этом случае, остается еще не ясным, почему пузырьки не всплывают.

В связи с этим очень популярной является другая гипотеза, (Гарвей, Эпштейн), которая предполагает существование газовых включений в мельчайших трещинах на твердых частицах, взвешенных в жидкости, или на поверхности обтекаемых тел. До некоторого критического давления эти газовые полости удерживаются под действием перепада давлений и сил поверхностного натяжения. При данных условиях давление газа ниже, чем давление окружающей водной среды, и растворения газа не должно происходить. По мере снижения давления газ расширяется, газовая полость заполняет трещину, а затем и вовсе покидает ее.

Судьба кавитационного пузырька зависит от характера течения. Пока существуют условия испарения, размеры пузырька увеличиваются, но как только кавитационный пузырек попадает в область повышенного давления, он начинает деформироваться и разрушаться.

Переход от пузырьковой кавитации к развитой нельзя рассматривать как непрерывный плавный процесс постепенного накопления парогазовых включений в области пониженного давления. Наблюдения показывают, что это переход происходит скачкообразно. Признаком наступления развитой кавитации служит появление на теле устойчивой границы каверны. При последующем развитии кавитационного пузыря линия передней границы каверны не претерпевает существенных изменений.

В условиях, когда в набегающем потоке содержится небольшое число кавитационных ядер, развитая кавитация может наступить сразу, минуя пузырьковую стадию. Это тем более возможно, если в донную область

течения за плохообтекаемыми телами (диск, конус) производить хотя бы незначительный поддув газа.

Кавитационное течение характеризуют безразмерным параметром (числом кавитации):

$$\chi = \frac{2(P - P_s)}{\rho V^2},$$

где P – гидростатическое давление набегающего потока, Па;

P_s – давление насыщенных паров жидкости при определенной температуре окружающей среды, Па;

ρ – плотность среды, кг/м³;

v – скорость потока на входе в систему, м/с.

Известно, что кавитация возникает X при достижении потоком граничной скорости $V=V_c$, когда давление в потоке становится равным давлению парообразования (насыщенных паров). Этой скорости соответствует граничное значение критерия кавитации.

В зависимости от величины X можно различать четыре вида потоков:

Докавитационный – сплошной (однофазный) поток при $X>1$,

Кавитационный – (двухфазный) поток при $X\approx 1$,

Пленочный – с устойчивым отделением кавитационной полости от остального сплошного потока (пленочная кавитация) при $X<1$,

Суперкавитационный – при $X\ll 1$.

Число естественной (паровой) кавитации

В течениях с естественной (паровой) кавитацией обычно известно давление в невозмущённом потоке p_∞ и давление насыщенного пара в каверне p_v . Это даёт основание принять в качестве масштаба давления разность давлений $p_\infty - p_v$. Тогда можно ввести в рассмотрение модифицированное число Эйлера, которое обычно называют числом естественной кавитации

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_v}{\rho V^2 / 2}.$$

Число кавитации (Тома)

В течениях с искусственной кавитацией вместо давления p_v нужно применять давление в каверне p_k , тогда получаем число кавитации σ

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_k}{\rho V^2 / 2}.$$

Для анализа распределения давления удобно пользоваться безразмерным коэффициентом давления:

$$C_p = \frac{p - P_{\infty}}{\rho V^2 / 2},$$

где p – давление в данной точке.

Давление паров, находящихся в термодинамическом равновесии с конденсированной фазы (твердой или жидкой) при данной температуре в замкнутой системе. Равновесное давление пара является признаком скорости испарения жидкости. Это относится к склонности частиц к переходу из жидкого (или твердого). Вещества с высоким давлением пара при нормальной температуре часто называют фитонциды. Давление выставляется с помощью паров, присутствующих выше поверхности жидкости называется давление пара. Так как температура жидкости увеличивается, кинетическая энергия его молекул возрастает. Так как кинетическая энергия молекул возрастает, число молекул, переходящих в пар также увеличивается, тем самым увеличивая давление пара.

Давление пара любого вещества увеличивается нелинейно с температурой в соответствии с уравнением Клаузиуса–Клапейрона отношения. Точка атмосферного давления кипения жидкости (также известный как нормальная точка кипения) - температура, при которой давление паров равна атмосферному давлению. С любого приращения в этой

температуре, давление пара становится достаточно для преодоления атмосферного давления и подъем жидкости в виде пузырьков пара внутри сыпучего вещества. Образование пузырьков глубже в жидкости требует более высокого давления, и, следовательно, более высокой температуры, поскольку увеличивается давление жидкости выше атмосферного давления по мере увеличения глубины. Более важно на небольших глубинах более высокая температура, необходимая для начала образования пузырьков. Поверхностное натяжение стенки пузыря приводит к избыточному давлению в очень маленький, первоначальные пузырьки. Таким образом, термометр калибровки не должны полагаться на температуру в кипящую воду.

Давление пара, что один компонент в смеси способствует общему давлению в системе, называется парциальным давлением. Например, в воздухе на уровне моря, и насыщенный водяной пар при 20 °С, парциальных давлений около 2,3 кПа воды, кПа 78 азота, 21 кислорода, 0,9 кПа кПа и аргона, на общую сумму 102.2 кПа, создавая основу для нормального атмосферного давления.

1.2 Положительные и отрицательные аспекты кавитации

Отрицательные свойства кавитации

Химическая агрессивность газов в пузырьках, имеющих к тому же высокую температуру, вызывает эрозию материалов (рисунки 1.1 – 1.3), с которыми соприкасается жидкость, в которой развивается кавитация. Эта эрозия и составляет один из факторов вредного воздействия кавитации. Второй фактор обусловлен большими забросами давления, возникающими при схлопывании пузырьков и воздействующими на поверхности указанных материалов.



Рисунок 1.1 – Кавитационный след гребного винта



Рисунок 1.2 – Повреждения, наносимые эффектом кавитации (часть насоса)

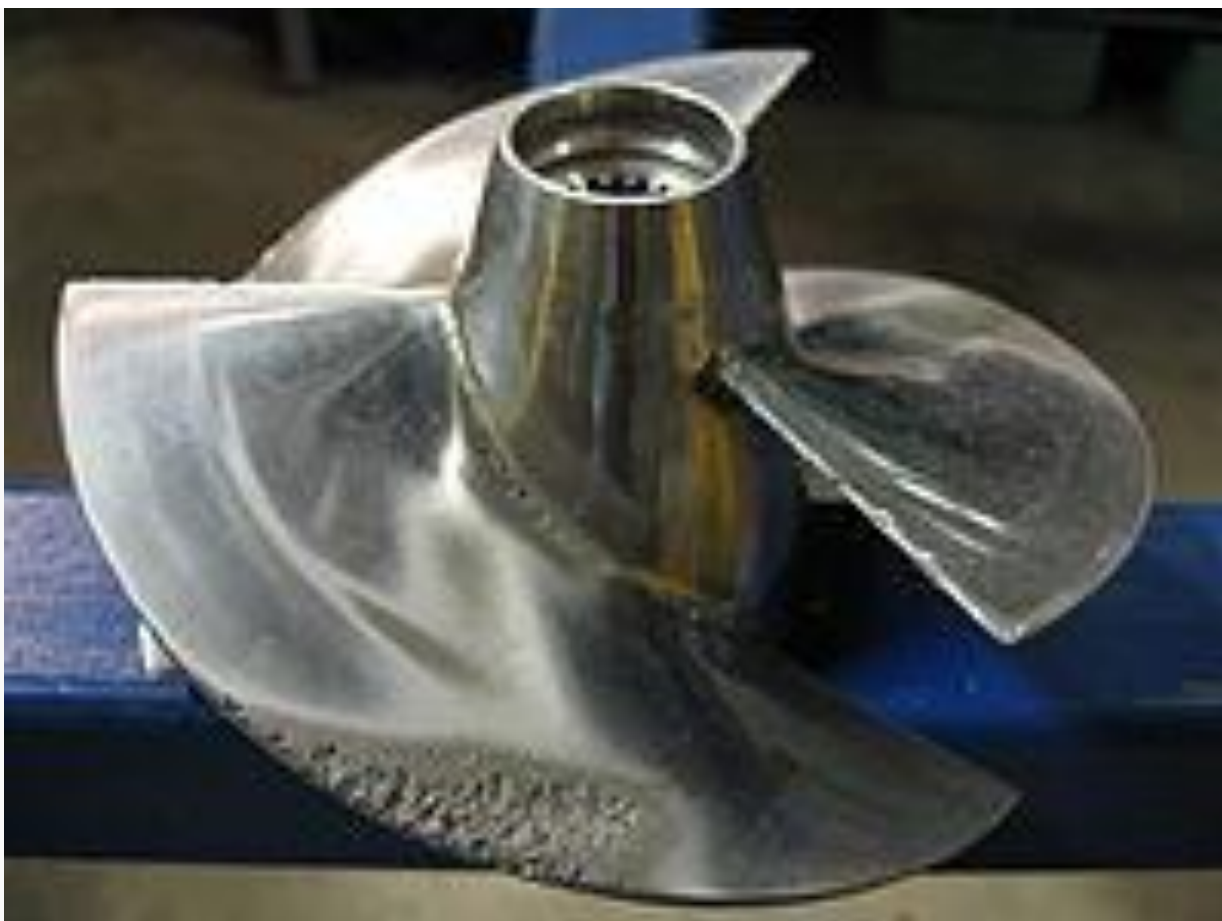


Рисунок 1.3 – Кавитационные повреждения гребного винта

«Кавитацию используют для обработки топлива. Во время обработки топливо дополнительно очищается (при проведении химического анализа сразу обнаруживается существенное уменьшение количества фактических смол), и перераспределяется соотношение фракций (в сторону более лёгких). Эти изменения, если топливо сразу поступает к потребителю, повышает его качество и калорийность, как следствие более полное сгорание и уменьшение массовой доли загрязняющих веществ. Сейчас до сих пор проходят исследования по влиянию кавитации на топливо, их проводят частные компании и институты, например, Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина.

Также были разработаны кавитационные водные устройства очистки, в которых граничные условия кавитации могут уничтожить загрязняющие вещества и органические молекулы. Спектральный анализ света,

испускаемого в результате сонохимической реакции, показывает химические и плазменные базовые механизмы энергетической передачи. Свет, испускаемый кавитационными пузырями, называется сонолюминесценцией.

Также технология кавитационного нагрева активно используется шарлатанами, которые приписывают своим установкам КПД выше 100%.

Кавитационные процессы имеют высокую разрушительную силу, которую используют для дробления твёрдых веществ, которые находятся в жидкости. Одним из применений таких процессов является измельчение твёрдых включений в тяжёлые топлива, что используется для обработки котельного топлива с целью увеличения калорийности его горения.

Кавитационные устройства снижают вязкость углеводородного топлива, что позволяет снизить необходимый нагрев и увеличить дисперсность распыления топлива.

Кавитационные устройства используются для создания водно-мазутных и водно-топливных эмульсий и смесей, которые часто используются для повышения эффективности горения или утилизации обводнённых видов топлива».

Схлопывание пузырьков сопровождается значительным ударным, а также химическим и электрическим, воздействием и слабым радиоактивным излучением. При захлопывании содержащаяся в пузырьке парогазовая смесь, адиабатически сжимается до давления 105 Па (300 атм) и нагревается до температур порядка нескольких тысяч градусов (8000–12000 К). Весь процесс увеличения и захлопывания пузырьков происходит в течение нескольких миллисекунд. Давление внутри пузырьков и в воде достигает сотен МПа, а температура нескольких тысяч градусов, что вызывает распад молекул воды и образование радикалов с высокой химической активностью. Известно, что при 2000 К около 0,01 % молекул H₂O внутри пузырька диссоциируют на водородные (H^{*}) и гидроксильные (OH^{*}) свободные радикалы (кавитационный термолиз). Эти радикалы могут рекомбинировать

с образованием электронно-возбужденных состояний молекул H_2O^* . При переходе молекул H_2O^* из электронно-возбужденного состояния в основное в объеме воды высвечивается квант света – происходит сонолюминесценция – явление возникновения вспышки света при схлопывании кавитационных пузырьков, сформированных в жидкости мощной ультразвуковой волной. Кроме того, резкое (внезапное) исчезновение кавитационных пузырьков приводит к образованию гидравлических ударов, и как следствие к созданию волны сжатия и растяжения в жидкости с ультразвуковой частотой.

Свободные H^* и OH^* радикалы могут диффундировать в раствор и вступать в реакции с растворителем или растворенными веществами, инициируя каскадные радикальные химические процессы. За счет гидродинамического кавитационного термолиза воды на H^* и OH^* происходит увеличение концентрации O_2 . Также термолиз воды приводит к синтезу перекиси водорода (H_2O_2), что способствует понижению параметра pH.

Кавитация в жидкости сопровождается различными химическими реакциями; при этом происходит ускорение одних химических реакций и инициирование других. Эти реакции происходят в чрезвычайно короткое время.

Кроме этого, вследствие концентрирования энергии в очень малых объемах ультразвук может вызывать такие явления, как разрыв химических связей макромолекул, инициирование химических реакций и свечение.

1.3 Опыт применения установок на основе кавитации

Гидродинамическая кавитация. «Возникает в тех участках потока, где давление понижается до некоторого критического значения. Присутствующие в жидкости пузырьки газа или пара, двигаясь с потоком жидкости и попадая в область давления меньше критического, приобретает способность к неограниченному росту. После перехода в зону пониженного

давления рост прекращается и пузырьки начинают уменьшаться. Если пузырьки содержат достаточно много газа, то при достижении ими минимального радиуса, они восстанавливаются и совершают несколько циклов затухающих колебаний, а если мало, то пузырек схлопывается полностью в первом цикле [14]».

Подобным способом, возле обтекаемого тела формируется кавитационная область, наполненная перемещающимися пузырьками. Снижение кавитационного пузырька совершается с огромной быстротой и сопровождается звуковым импульсом, этим наиболее мощным, нежели менее газа включает пузырек. В случае если уровень формирования кавитации такая, то что появляется и захлопывается большое число пузырьков, в таком случае проявление сопровождается мощным гулом непрерывным диапазоном с ряд сторублевых единиц вплоть до сторублевых кгц. Диапазон раздается в сфера невысоких частот согласно грани повышения наибольшего радиуса пузырьков.

Если б смесь существовала безупречно гомогенной, а плоскость жесткого туловища, с каким возлюбленная соседствует безупречно смачиваемой, в таком случае несоответствие проистекает б присутствие давления наиболее невысоком, нежели влияние интенсивного параджидкости, присутствие коем смесь делается неустойчивой. Абстрактная надежность вода несоответствие одинакова 1500 кг/см. настоящие воды меньше крепки. Наибольшая надежность в несоответствие основательно чистой вода, завоеванная присутствие растяжении вода присутствие 10 лавина. является 260 кг/см. Как правило ведь несоответствие начинается присутствие давлениях, интенсивного парочка. невысокая надежность настоящих жидкостей сопряжена с присутствием в их таким образом именуемых кавитационных эмбрионов - слабо смачиваемых зон жесткого туловища, жестких элементов, элементов, наполненных газом малых газов оберегаемых с открывания мономолекулярными базисными слоями,

гетерополярных образований, образующихся около воздействием мировых проблесков. Увеличение скорости струи уже после основы кавитации тянет из-за собою активное увеличение количества развивающихся пузырьков, следом из-за нежели совершается их соединение в единую кавитационную каверну и протяжение передается в струйчатое. Для слабо обтекаемых тел, владеющих резкими бордюрами, развитие струйчатого типа кавитации совершается весьма стремительно. присутствие кавитации отрицательно влияет в труде гидромеханических автомобилей, турбин, насосов, судовых гребных винтов и вынуждает осуществлять мероприятия к избеганию кавитации. В случае если данное в действительности неосуществимым, в таком случае в определенных вариантах целесообразно повысить формирование кавитации, сформировать таким образом именуемый порядок "суперкавитации", выделяющийся струйчатым нравом обтекания и использовав особое профилирование лопастей, гарантировать подходящие требования деятельности элементов. Перемыкание кавитационных пузырьков возле плоскости обтекаемого туловища зачастую приводит к разламыванию плоскости, - таким образом именуемой кавитационной эрозии. Для того чтобы исключить прикрытие кавитационных пузырьков, необходимо передать в сферу дешёвого давления тот или иной-нибудь газ, к примеру, воздушное пространство. Так произвели эксперты Гидропроекта. Они соорудили в водосбросе Нурекской дамбы в сфере наибольшей кавитации синтетический пункт, основав этим наиболее значительную участок дешёвого давления, какую объединили с атмосферой. Теперь же суперкавитация затягивала воздушное пространство с атмосферы и самостоятельно себе разбила. Очень зачастую применяют совершающиеся присутствие кавитации уничтожения с целью форсирования разных научно-технических действий.

А.с. N 443663: «Способ приготовления грубых кормов, включающий обработку их раствором щелочи, отличающийся тем, что с целью размягчения и ускорения влагонасыщения корма, обработку его осуществляют в кавитационном режиме».

Акустическая кавитация.

Это образование и захлопывание полостей и жидкости под воздействием звука. Полости образуются в результате разрыва жидкости во время полупериодов сжатия. Полости заполнены в основном насыщенным паром данной жидкости, поэтому процесс иногда называется паровой кавитацией в отличие от газовой кавитации интенсивных нелинейных колебаний газовых (обычно воздушных) пузырьков в звуковом поле, существовавших в жидкости до включения звука. Если газовая кавитация может протекать с большей или меньшей интенсивностью при любых значениях амплитуды давления звуковой волны, то паровая лишь при достижении некоторого критического значения амплитуды давления, так называемого кавитационного порога. Величина этого порога - от давления насыщенного пара жидкости до нескольких десятков и даже сотен атмосфер (в зависимости от содержания в жидкости зародышей). Экспериментально установлено, что величина порога зависит от многих факторов. Порог повышается с ростом гидростатического давления, после обжатия жидкости высоким (порядка 1000 атм.) статистическим давлением, при обезгаживании и охлаждении жидкости, с ростом частоты звука и с уменьшением продолжительности озвучивания. Порог выше для бегущей, чем для стоячей воды.

При захлопывании сферической полости давление в ней резко возрастает, как при взрыве, что приводит к излучению импульса сжатия. Давление при захлопывании особенно велико при кавитации на низких частотах в обезгаженной жидкости с малым давлением насыщенного пара.

Если увеличить содержание газа в жидкости, то диффузия газа в полости усилится, захлопывание полостей станет неполным и подъем давления при захлопывании - небольшим. При содержании газа в жидкости выше 50% от насыщения возникает кавитационное обезгаживание жидкости - образование и всплывание газовых пузырьков и вырождение паровой кавитации в газовую. Если образовавшиеся паровые пузырьки колеблются вблизи границы с твердым телом, около них возникают интенсивные микропотоки. Появление кавитации ограничивает дальнейшее повышение интенсивности звука, излучаемого в жидкости, что влечет за собой снижение нагрузки на излучатель.

Акустическая кавитация вызывает ряд эффектов. Часть из них, например, разрушение и диспергирование твердых тел, эмульгирование жидкостей, очистка - обязаны своим происхождением ударам при захлопывании полостей и микропотокам вблизи пузырьков. Другие эффекты связаны с ионизацией при образовании полостей, что вызывает и ускоряет химические реакции. Благодаря этим эффектам акустическая кавитация находит все более широкое применение для создания новых и совершенствования известных технологических процессов. Большинство практических применений ультразвука основано на эффекте кавитации [9]».

В А.с. 200981 «Описывается установка, использующая в своей работе явление кавитации. Назначение установки - снятие заусенцев с деталей самой различной формы. Деталь помещается в жидкость под высоким давлением, насыщенную мельчайшими абразивными частицами. При возбуждении в жидкости интенсивной акустической кавитации заусеницы отделяются от деталей; вдобавок деталь очищается от стружки и масла не только на открытых поверхностях, но и глубоких отверстиях [7]».

А.с. 285394: «Способ создания кавитации в жидкости путем возбуждения непрерывных колебаний звуковой или ультразвуковой частоты, отличающийся тем, что с целью повышения эрозионной активности

жидкости возбуждают в полупериод сжатия дополнительный пиковый импульс сжатия, соответствующий по времени концу фазы расширения или началу фазы захлопывания кавитационных полостей».

А.с. 409569: «Способ детектирования радиоактивных излучений по их воздействию на протекание акустической кавитации в жидкостях, отличающийся тем, что с целью увеличения надежности детектирования, в кавитирующее акустическое поле помещают тест-образец, определяют степень его эрозии, по изменению которой судят об интенсивности радиоактивного излучения [12]».

А.с. 446757: «Способ получения теплофизической метки, например, для измерения расхода путем воздействия излучением на исследуемый поток, отличающийся тем, что с целью расширения диапазона измеряемых сред, воздействуют на контролируемый поток ультразвуковым полем с интенсивностью выше порога кавитации, фокусируют звуковые волны в локальную область, создают кратковременный процесс кавитации и получают теплофизическую неоднородность за счет продуктов кавитации [14]».

Сонолюминисценция.

Сонолюминесценция может произойти, когда звуковая волна достаточной интенсивности вызывает газовой полости в жидкости быстро разрушаются. Эта полость может иметь форму существующего пузыря, или может быть создан посредством процесса, известного как кавитация. Сонолюминесценция в лаборатории могут быть сделаны, чтобы быть стабильной, так что один пузырь будет расширяться и опять рухнет снова и снова в периодической моды, испуская вспышки света каждый раз, когда она рухнет. Для этого нужно, стоячая звуковая волна в жидкости, и пузырек будет сидеть под давлением анти-узел стоячей волны. Частота резонанса зависит от формы и размера контейнера, в котором содержится пузырь.

Некоторые факты о сонолюминесценции.

Свет мигает из пузырей длится от 35 до нескольких сотен пикосекунд, с пиковой интенсивностью порядка 1-10 МВт.

Пузырьки очень маленькие, когда они излучают свет—около 1 микрометра в диаметре—в зависимости от наружной жидкости (например, вода) и содержание газа в пузыре (например, атмосферного воздуха).

Один пузырь импульсов сонолюминесценции могут иметь очень стабильные периоды и позиции. На самом деле, частота световых вспышек может быть более стабильным, чем Номинальная частота стабильность генератора, делающего звуковые волны гонит их. Однако, анализ устойчивости шоу мыльных пузырей, что само пузыря претерпевает значительные геометрические неустойчивостей, за счет, например, силы Бьеркнеса и неустойчивости Рэля–Тейлора.

Добавлением небольшого количества благородного газа (например, гелия, аргона или ксенона) к газу в пузырьке увеличивается интенсивность излучаемого света.

Спектральные измерения дали пузырь температурах в диапазоне от 2300 К до 5100 К точной температуры в зависимости от экспериментальных условий, включая состав жидкости и газа. Обнаружение очень высоких температурах пузыря, спектральных методов ограничено из-за непрозрачности жидкости на короткий свет длины волны характерны очень высокие температуры.

Написание в природе, химики Дэвид Дж Фланниган и Кеннет С. Саслик описать метод определения температуры, основанный на формировании плазмы. Используя пузыри аргона в серной кислоте, их данные показывают наличие ионизированного молекулярного кислорода O_2^+ , окиси серы и атомов аргона заполнения высокоэнергетических возбужденных состояний, что подтверждает гипотезу о том, что пузырьки

горячего плазменного ядра ионизации и энергии возбуждения катионы, которые они наблюдали, составляет 18 электронвольтам. Из этого они делают вывод, ядра температура достигает по крайней мере 20 000 °К (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Сонолюминисценция

Электро-гидравлический удар.

«Волну сжатия в жидкости можно вызвать также мощным импульсным электрическим разрядом между электродами, помещенными в жидкость (электрогидравлический эффект Юткина). Чем круче фронт электрического импульса, чем менее сжатая жидкость, тем выше давление в ударе и тем "бризантнее" электрогидравлический удар. Электрогидравлический удар применяется при холодной обработке металлов, при разрушении горных пород, для диамульсации жидкостей, интенсификации химических реакций и т.д.

Патент США N 3566447: «Формирование пластических тел при помощи гидравлического удара высокой энергии. Патентуется гидравлическая система в которой столб жидкости, находящийся в баке гидропушки, направляется на заготовку. Для проведения жидкости в движение в указанном столбе жидкости производят электрический разряд, в результате чего генерируется направленная

на заготовку волна, которая в сочетании с собственным высоким давлением жидкости осуществляет деформацию заготовки. Скорость струи направляемой на заготовку, составляет от 100 до 10000 м/с».

В США эффект Юткина применяют для очистки электродов от налипшего на них при электролизе металлов, а в Польше - для упрочения стальных колец турбогенераторов. При этом стоимость операций, как правило, снижается.

А.с. N 117562: «Способ получения коллоидов металлов и устройство для осуществления при применении высокого напряжения за счет электрогидравлического удара между микрочастицами материала, диспергированного в жидкости».

Ударная волна возникающая в воде при быстром испарении металлических стержней электрическим током вполне пригодна для разрушения валунов и других крепких материалов, для разбивки бетонных фундаментов, зачистки окальных оснований гидротехнических сооружений и других работ связанных с разрушением. Приведенные примеры иллюстрируют применение эффекта. Ниже даны примеры того, каким способом можно получить или усилить электрогидравлический удар [8]».

В японском патенте N 13120 (1965) «описан способ электрогидравлической формовки ртутно-серебрянными электродами. При применении таких электродов сила ударной волны в воде возрастает, так как к давлению плотной плазмы, образующейся в канале разряда прибавляется давление паров ртути. Применение этого способа позволяет заметно уменьшить емкость конденсаторной батареи».

А.с. N 119074: «Устройство для получения сверхвысоких гидравлических давлений предназначенное для осуществления способа по А.с. N 105011, выполненное в виде цилиндрической камеры, сообщенной одним концом с трубопроводом, подающим жидкость, а другим - с ресивером, отличающееся тем, что с целью создания электрогидравлических степеней сжатия применены

искровые промежутки, располагаемы по длине камеры на определенном расстоянии друг от друга».

А.с. N 129945: «Способ получения высоких и сверхвысоких давлений для создания электрогидравлических ударов, отличающийся тем, что высокие и сверхвысокие давления в жидкости получают путем испарения в ней действием эмульсного заряда токопроводящих элементов в виде проволоки, ленты или трубки, замыкающих электроды».

Установка гидростабилизации мазута на ОАО «ЖСМ» г. Жигулевска (рисунок 1.6) позволяет физически связать воду и мазут, что дает снижение химического недожога мазута за счет лучшего распыления топлива в камере сгорания, снижение несгораемых отходов, повышает температуру мазута на 4°C.

В системах водоочистки могут применяться вихревые кавитаторы (рисунок 1.5). В данном кавитаторе происходит ускорение химических реакций между очищаемой водой и реагентами.

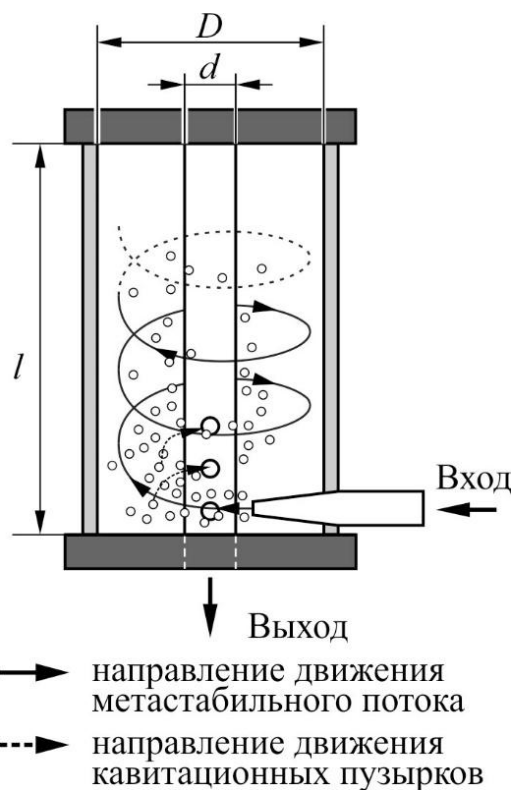


Рисунок 1.5 – Схема вихревого кавитатора

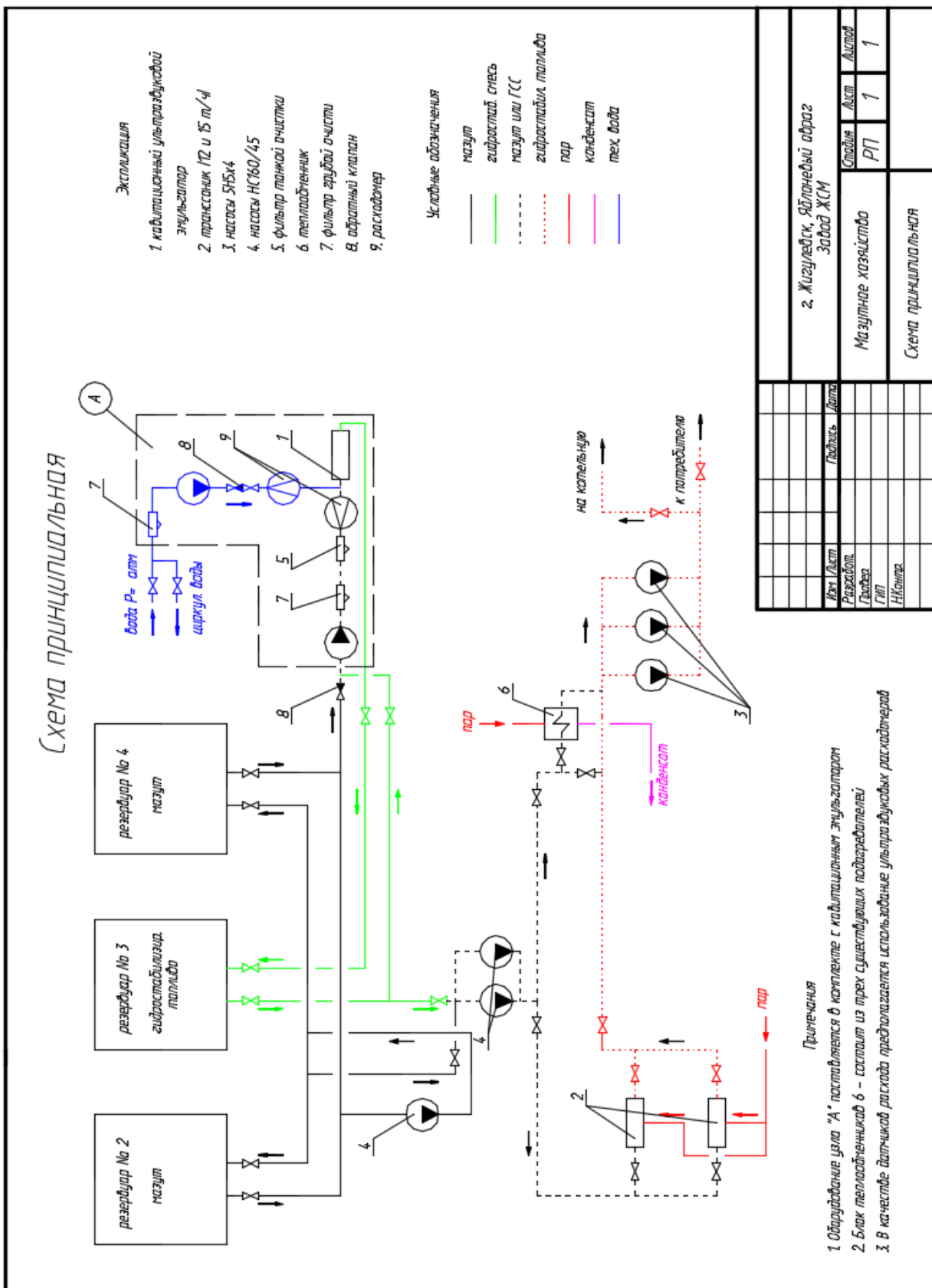


Рисунок 1.6 – Установка гидростабилизации мазута на ОАО «ЖСМ» г. Жигулевск.

1.4 Кавитация в системах водоснабжения

В системах водоснабжения кавитация наблюдается в насосах и регулирующих клапанах.

Главный источник проблем с насосами - кавитация. При движении жидкости в ней могут возникать зоны разрежения. В результате выделяются пузыри. Попадая с потоком в зону более высоких давлений, пузыри схлопываются, выделяя энергию, которая разрушает поверхность рабочих колес, улиток (рисунок 1.7) и т.д.



Рисунок 1.7 – Кавитация улитки после года работы насоса.

«Эта энергия также создает ударные волны, вызывающие вибрацию, распространяющуюся на рабочее колесо, вал, уплотнения, подшипники, повышая их износ. Возникновение кавитации обусловлено разными причинами. Любой вид кавитации связан с неучетом важных правил гидравлики и гидродинамики.

Каждый насос характеризуется величиной кавитационного запаса $\Delta h_{тр}$, обозначаемой западными насосными фирмами NPSHR. Это то минимальное давление, в пределах которого у жидкости, попадающей в насос, сохраняется состояние собственно жидкости. Величину $\Delta h_{тр}$ в номинале и кривую зависимости $\Delta h_{тр}$ от подачи/напора обязан предоставлять производитель насоса.

Насос в станцию необходимо подбирать, устанавливать и обвязывать так, чтобы он располагал в зоне своей работы (определяется наложением характеристик насосов и системы водоводов) тем допустимым кавитационным запасом $\Delta h_{доп}$ (или NPSHA), величина которого была бы выше $\Delta h_{тр}$ $NPSHA > NPSHR$ [18]».

Для того, чтобы правильно устранить кавитацию нужно использовать принцип – на входе в насос должно всегда быть жидкости больше, чем на выходе. Вот несколько простых способов как этого достичь:

- заменить диаметр всасывающего патрубка на больший;
- переместить насос ближе к питающему резервуару, но не ближе 5-10 диаметров всасывающей трубы;
- понизить сопротивление во всасывающей трубе, заменой ее материала на менее шероховатый, задвижки на шиберную, характеризующуюся меньшими местными потерями, удалением обратного клапана;
- если всасывающая труба имеет повороты, уменьшить их количество и (или) заменить отводы малых на большие радиусы поворота, сориентировав их в одной плоскости (иногда правильно заменить жесткую трубу гибкой);
- увеличить давление на всасывающей стороне насоса повышением уровня в питающем резервуаре либо снижением оси установки насоса, либо использованием бустерного насоса.

При работе регулирующих клапанов может возникнуть ситуация, когда перепад давления до и после клапана становится большим чем расчетным и

может возникнуть кавитация. Это возникает тогда, когда плунжер клапана близок к перекрытию седла клапана (рисунок 1.7, 1.8).

Производители регулирующих клапанов в своих каталогах указывают:

- диаметр клапана;
- пропускная способность клапана;
- максимальный перепад давления на клапане;
- максимальная температура регулируемой среды;
- максимальное рабочее давление и т.д.

Возникновение кавитации в регулирующих клапанах происходит либо при неправильно подобранном регулирующем клапане, либо при изменении условий рабочей среды (изменения ее давления). Устранение кавитации можно достичь установкой регулирующего клапана большего диаметра и/или установкой регулятора давления перед клапаном.



Рисунок 1.8 – Последствия кавитации корпуса двухходового клапана.



Рисунок 1.9 – Последствия кавитации корпуса трёхходового клапана.

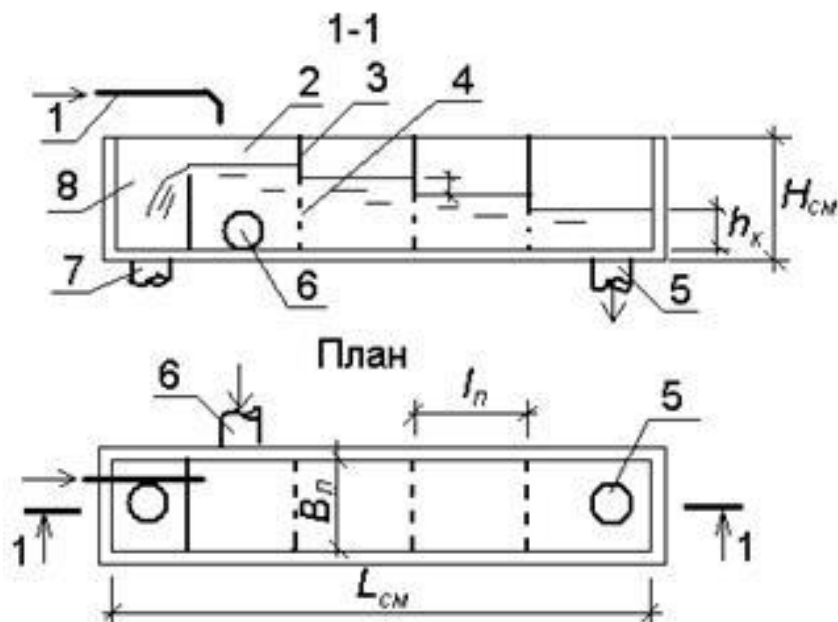
1.5 Возможные направления применения кавитации в системах водоподготовки

К показателям качества воды относятся: кислотно-щелочной баланс (рН), электрическая проводимость, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), концентрация солей и т.д.

Очистные сооружения водозабора имеют сооружения: смеситель, отстойники, реагентное хозяйство, фильтры грубой и тонкой очистки. Тщательное перемешивание реагентов и обрабатываемой воды происходит в смесителях. Процесс смешения предназначен для быстрого и равномерного распределения реагентов в обрабатываемой воде. Смешение по нормативам должно быть закончено в течение 1 – 2 мин при мокром и не более 3 мин при сухом дозировании реагентов. В то же время необходимо отметить, что эффект смешения в значительной степени зависит от первоначального смешения: чем меньше срок смешения, тем быстрее и глубже происходит коагулирование примесей, т. е. быстрее наступает хлопьеобразование.

Эффективное смешение реагентов с обрабатываемой водой достигается турбулизацией ее потока в смесителях гидравлического и механического типов.

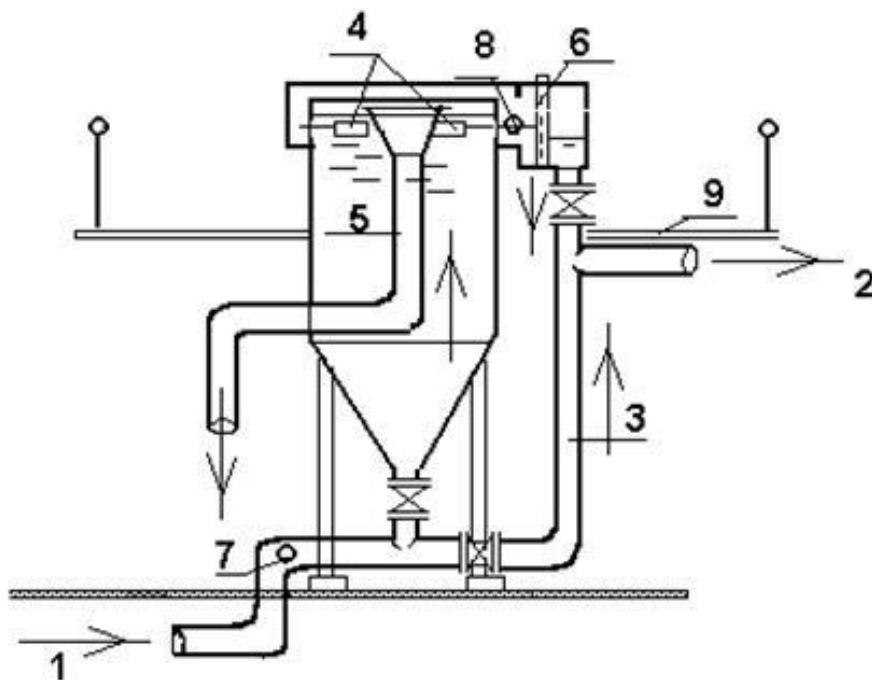
На рисунке 1.10 изображен гидравлический лотковый смеситель. Эти смесители рекомендуются при производительности очистных сооружений до $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Турбулизация потока производится за счет вихрей, образующихся при прохождении через круглые отверстия (дырчатые смесители) или щели в перегородках (перегородчатые). Скорость движения воды в лотках смесителя принимают равной $0,6 \text{ м/с}$, в отверстиях или щелях – $1,0 \text{ м/с}$. В дырчатых смесителях перегородки (обычно 3–4) устанавливаются на расстояниях не менее ширины лотка, а в перегородчатых – двойной ширины. Время пребывания воды в лотковых смесителях t должно быть не более 1,5 мин. Лотковые смесители не рекомендуют использовать для воды с большим количеством грубодисперсных примесей и при ее известковании из-за возможности заиливания.



1 – подача реагентов; 2 – лоток; 3 – дырчатая перегородка; 4 – круглые отверстия; 5 – отвод воды; 6 – подача исходной воды; 7 – переливной трубопровод; 8 – переливной карман

Рисунок 1.10 – Лотковый смеситель дырчатого типа

Вихревой (вертикальный) смеситель является одним из самых распространенных. Вихревые смесители (рисунок 1.11) рекомендуется применять при поступлении на станцию воды с крупнодисперсными взвешенными веществами и при использовании реагентов в виде суспензий или частично осветленных растворов.



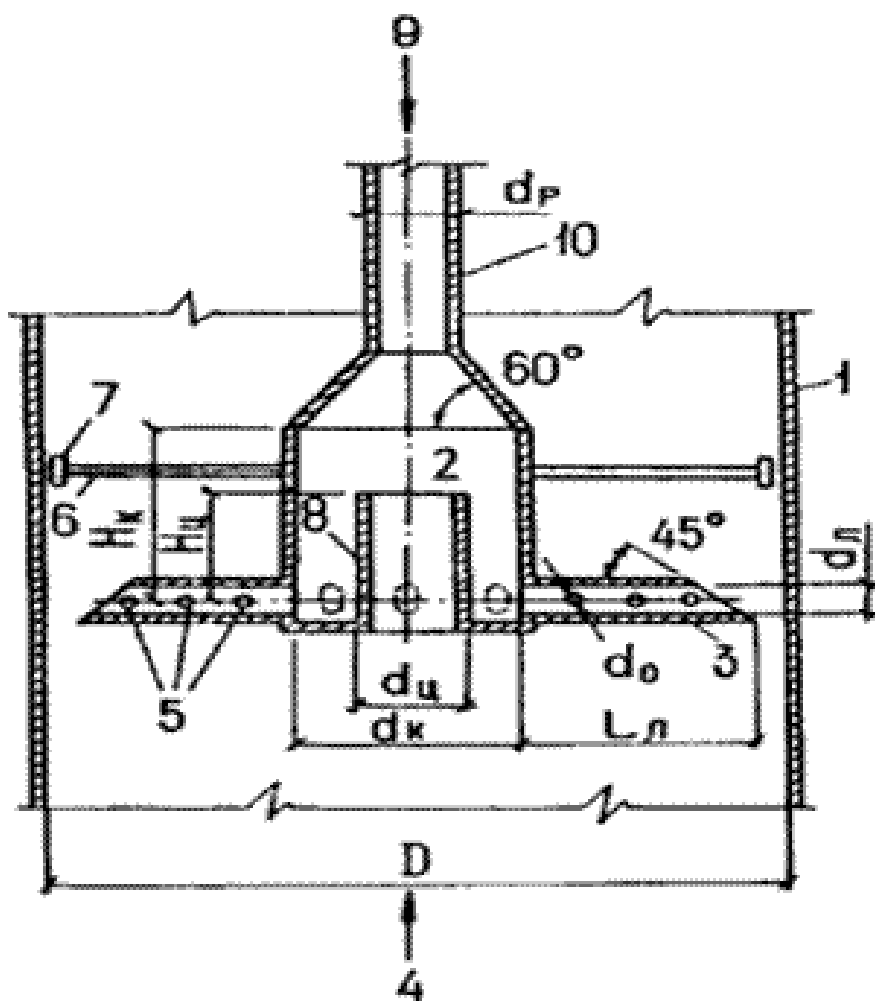
- 1 – подача воды от водозабора; 2 – отвод от смесителя к сооружению очистки воды; 3 – обводная линия; 4 – отверстия для сбора воды в лоток; 5 – переливной трубопровод; 6 – сороудерживающая сетка; 7 – точка ввода коагулянта и извести; 8 – точка ввода флокулянта; 9 – площадка обслуживания

Рисунок 1.11 – Вихревой смеситель

Практика водоподготовки применяемая для растворов реагентов, которые не содержат взвешенных веществ, используются так же и смесители, установленные в трубе, подающей сырую воду на место очистки (рисунок 1.12). Расположен камерно-лучевой распределитель в оси потока подаваемой воды, состоит из камеры цилиндрической формы, с перфорированными радиальными отростками, у которых открыты торцы; патрубка для

циркуляции, который расположен внутри камеры по оси, открытый с двух сторон и закреплен на основе камеры; реактопровода, подсоединенного к камере с другой стороны. Реактопровод снабжается воронкой для приема раствора реагента.

Эффективность использования распределителя получается за счет равномерной раздачи разбавленного раствора по площади потока, размещая, внутри трубы (в горизонтальном или вертикальном положении).



- 1 – корпус трубопровода; 2 – камера распределителя; 3 – лучевое ответвление; 4 – движение воды; 5 – отверстие для выхода раствора; 6 – радиальная распорка; 7 – глухая резиновая муфта, устанавливаемая с зазором 5-10 мм от корпуса трубопровода; 8 – циркуляционный патрубок; 9 – подача реагента; 10 – подача исходной воды.

Рисунок 1.12 – Камерно-лучевой распределитель внутри трубопровода

Схлопывание пузырьков сопровождается ударным, ультразвуковым, тепловым, химическим и электрическим воздействием и слабым радиоактивным излучением. Наличие механических примесей в воде не мешает протеканию кавитации, при этом примеси дробятся и равномерно перемешиваются с потоком воды, что позволяет более полно проводить химические реакции с реагентами водоочистных сооружений.

Применение кавитаторов в системах очистки природных и сточных вод позволяют повысить степень очистки. Так же можно производить обеззараживание воды и ультразвуковую обработку внутренней поверхности труб определенной длины.

Использование акустической кавитации для очистки воды и сточных вод является хорошо известным процессом. Тем не менее, использование гидродинамической кавитации в качестве единственного метода или в сочетании с другими методами, такими как УЗИ только недавно были предложены и использованы.

Использование гидродинамической кавитации применяют для удаления лекарственных средств, токсичных цианобактерий, зеленых микроводорослей, бактерий и вирусов для водоснабжения и водоотведения.

Гидродинамическая кавитация, как акустическая, может проявляться в различных формах и каждая имеет свои отличительные свойства и механизмы. Этим до сих пор пренебрегают, что в итоге привело к снижению производительности техники.

Очистка сточных вод до их сброса и повторного ее использования становятся абсолютной необходимостью. Приложены значительные усилия в области НИОКР в разработке, запатентованная система кавитации и электрокоагуляции для очистки сточных вод. В процессе электрокоагуляции, коагулянта создается на месте путем электролитического окисления соответствующего анодного материала. Введенные высоко заряженных полимерных металлических видов гидроксид нейтрализуют

электростатические заряды на взвешенных частицах и каплях масла для облегчения агломерации и в результате отделения от водной фазы. Одновременное действие усовершенствованной гидродинамической нанокавитация, электрокоагуляция и активных химических веществ, образовавшееся на месте обеспечивает уникальный синергетический эффект, что приводит к высокой эффективности процесса очистки. Система способна извлекать тяжелые металлы, жиры, масла, жира, сложных органических веществ, бактерии, вирусы и цисты, а также взвешенных и коллоидных веществ; разбивать эмульсии масла в воде и обработки нескольких загрязняющих веществ.

Гидродинамическая кавитация оказывает положительное влияние на степень и скорость анаэробного сбраживания осадка. Путем применения гидродинамических кавитаций распада лизис клеток происходит в течение нескольких минут, а не дней.

Внутриклеточные и внеклеточные компоненты оказываются на свободу и сразу же доступны для биологической деградации, что приводит к улучшению последующего анаэробного процесса.

Степень распада изменяется от 14% после 15 мин дезинтеграции до 54%, после 90 мин дезинтеграции. Разрушение бактериальных клеток при гидродинамической кавитации оказывает положительное влияние на степень и темпы избыточного ила анаэробного сбраживания.

Клетки активного ила микроорганизмы повреждают, и дополнение к процессу пищеварения ведет к увеличению производства биогаза. Гидродинамический распад активного ила приводит к более высокой степени деградации и увеличения производства биогаза. Добавление дезинтегрированного осадка (10%, 20% и 30% объема) в процессах ферментации способствует увеличению производства биогаза около 22%, 95% и 131% соответственно.

Технология максимизирует повторное использование исходных материалов, сокращает расходы на перевозку и утилизацию, а также связанные с этим обязательства. Эксплуатационные расходы могут быть значительно сокращены. Снижение объемов образующихся осадков может достигнуть 60% по сравнению с обычными химическими методами. Другие преимущества включают в себя: низкое энергопотребление, низкие капитальные и эксплуатационные затраты и минимальное внимание оператора, без химических добавок, последовательные и надежные результаты, допуск к широкой вариации в потоке отходов и повторного использования воды, в результате чего незначительное количество вредных выделений.

Очистка емкостей охлаждения воды с целью предотвращения биологического обрастания и коррозии – это сложный процесс. Большинство очистки охлаждающей емкости осуществляется с биоцидными, диспергатором и ингибированием химических веществ. В то время как химическая обработка эффективна, за пределами градирни. Правила становятся все более жесткими для химического хранения, обращения и утилизации. Сокращение или ликвидация химического использования в очистке градирни является конечной целью.

Решить многие проблемы, связанные с химической обработкой, технологий с использованием нехимических методов очистки развиваются. Нехимические устройства используют различные технологии для достижения биологической очистки. Имеющиеся в продаже оборудование можно сгруппировать в четыре основных класса или методологии: магнитные устройства; индуцированного электрического поля приборы; ультразвуковые приборы и механической энергии устройств.

Кинетическая энергия Гидродинамической кавитационной станции (ГКС) в дополнение к химическим реагентам для контроля окалина, коррозии и биообрастанию без опасности химической обработки. ГКС также

сводит к минимуму коррозию и рост микроорганизмов, снижает эксплуатационные расходы системы, и сберегает воду и энергию.

Блок КГС состоит из уравнительной камеры давления и кавитационной камеры. Внутри кавитационной камеры, две пары сопел расположены напротив друг друга на определенных расстояниях и углов. Вода сначала закачивается в камеру выравнивания давления в насос под давлением около 70 атм. Из уравнительной камеры, воды направляется в кавитационную камеру, где вода вынуждена вращаться с большими скоростями. Вращение потоков воды создает высокий вакуум, как правило, больше, чем -762 мм ртутного столба. Это высокое состояние вакуума вызывает микроскопические пузырьки в потоках воды. Эти пузырьки наполнены смесью паров и растворенных газов. Потоки воды в два сопла вращаются в противоположных направлениях. Между тем, потоки воды движутся на ускорение скорости. При выходе из сопла, противоположные потоки воды сталкиваются в середине кавитационной камеры. В этот момент самопроизвольно повышает давление, вызывая внезапные имплозии микроскопических пузырьков. В момент обрушения, гидродинамическая кавитация генерирует интенсивные шокирующие волны и производит чрезвычайно высокие температуры. В этих условиях происходят химические реакции, такие как преобразование растворенных ионов кальция и гидрокарбоната в карбонат кальция (CaCO_3) и окисление органических соединений. Кроме того, бактерии в воде разрываются от воздействия механических, физических и химических сил.

Взвешенные вещества удаляют из градирни в отстойник через второй "боковой поток", который предназначен для сбора мусора с дна приемка в автоматическую систему фильтрации и сбора. Фильтр автоматически промывается для удаления твердых веществ на временной основе и отправляется в отходы.

Применяют ГКС в отстойниках воды емкости, которая обслуживает КНС.

В результате микробиологический контроль насчитывает содержание микроорганизмов в среднем около 10 000 кое/мл.

Использование системы ГКС позволило более 7 миллионов литров непитьевой воды обеспечить для повторного использования ежегодно.

Выводы по главе 1

- 1 Проведён теоретический анализ явления кавитации.
- 2 Выявлены отрицательные и положительные аспекты явления кавитации в различных отраслях техники.
- 3 Выделены области использования положительных аспектов кавитации для очистки воды.

Глава 2 Разработка конструкции кавитатора и испытательного стенда

2.1 Анализ направлений совершенствования существующих конструкций кавитаторов

Теоретические и практические исследования явлений кавитации выявляют два метода создания кавитации: естественный, возникающий под воздействием использования свойств жидкости (закон Бернулли), и искусственный – при использовании внешнего воздействия с помощью технических устройств (различных типов кавитаторов).

Естественный метод возникновения кавитации. Применяются сужающие устройства: различные сопла, мембраны с отверстием и труба Вентури. Устройства различных сопел и мембран требует реконструкцию участка трубопровода, что повышает металлоемкость системы трубопроводов. Кроме этого, использование сопел создает дополнительное гидравлическое сопротивление (рисунок 2.1).

Применение трубы Вентури потребует реконструкцию систем трубопровода и повышает гидравлическое сопротивление системы (рисунок 2.2).

Искусственный метод возникновения кавитации. Используются ультразвуковые кавитаторы. Потребуется врезка в систему трубопровода ультразвукового излучателя через патрубок или реконструкция участка трубопровода с установкой корпуса ультразвукового кавитатора (рисунок 2.3, 2.4).

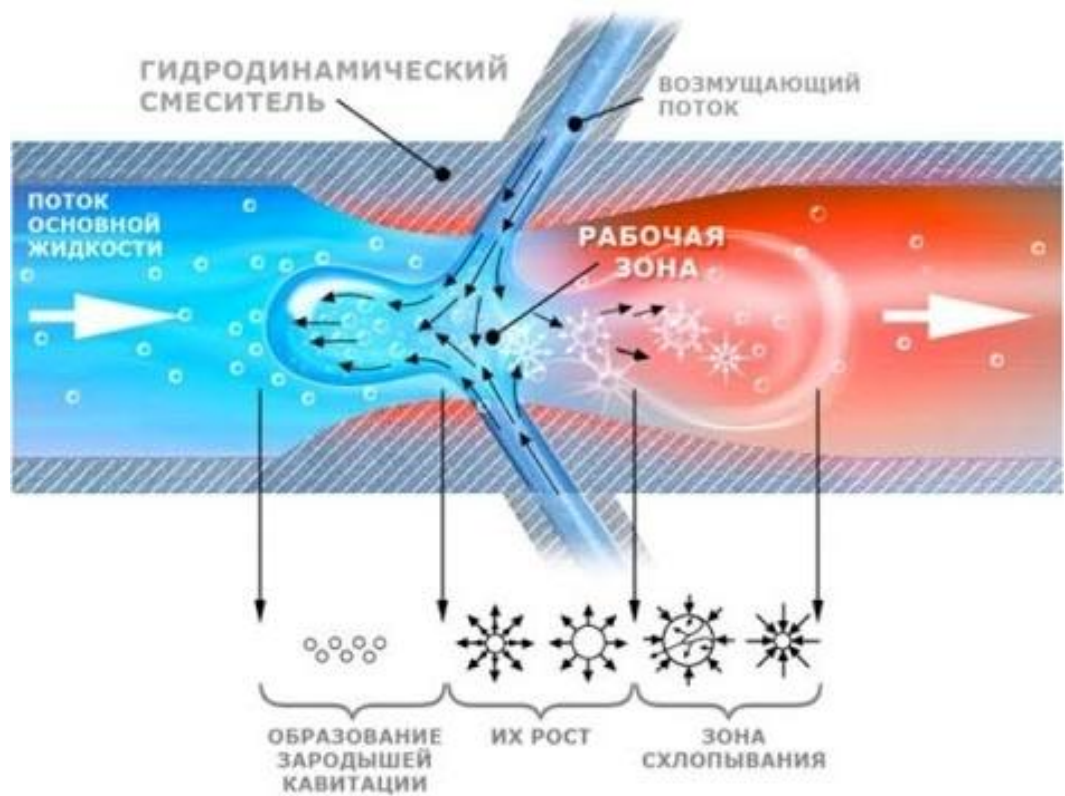


Рисунок 2.1 – Схема устройства гидродинамического кавитатора-смесителя

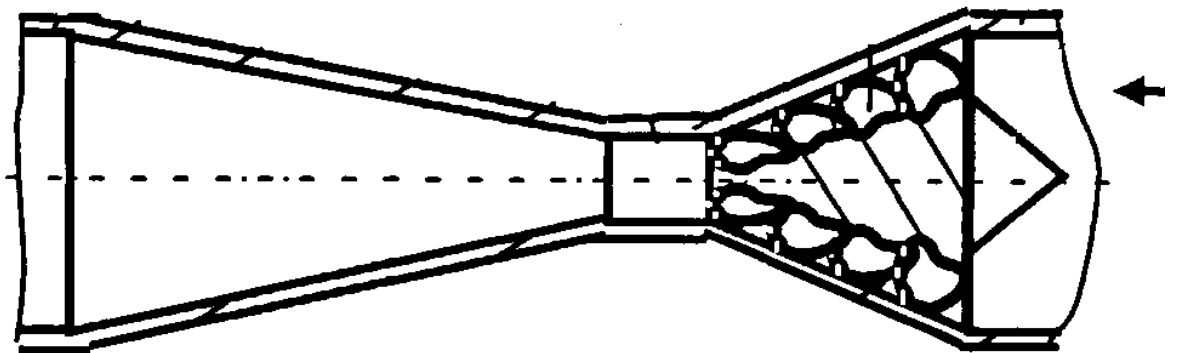


Рисунок 2.2 – Труба Вентури

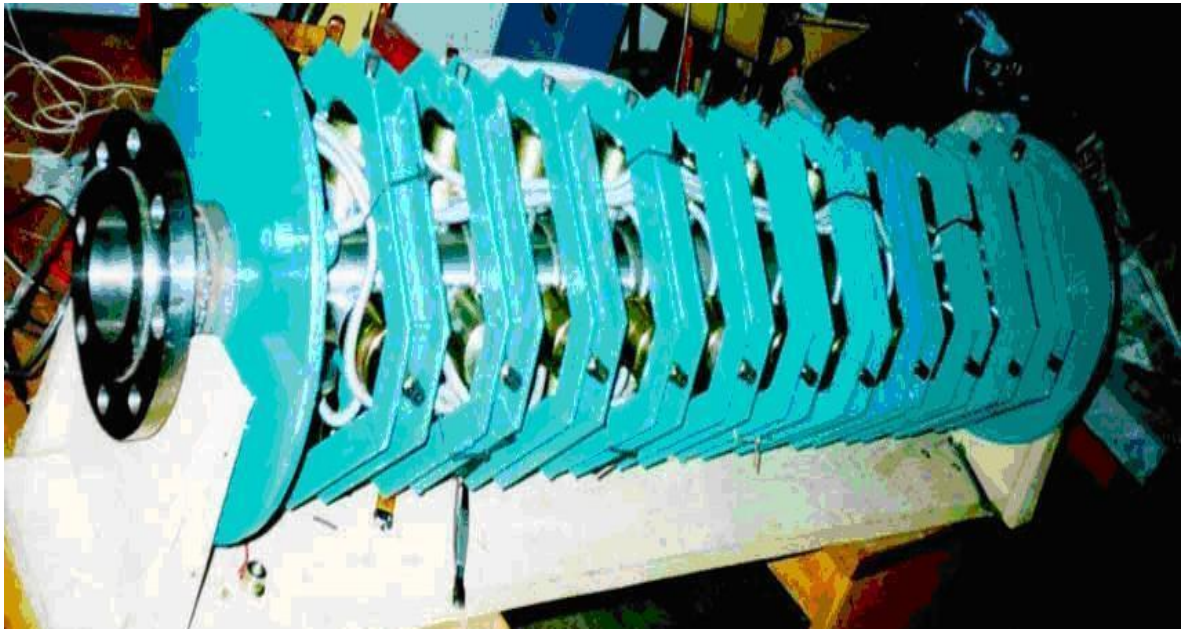


Рисунок 2.3 – Ультразвуковая кавитационная установка



Рисунок 2.4 – Ультразвуковая кавитационная установка с ультрафиолетовыми лампами

Современные методы очистки и дезинфекции воды:

- *обычные химические и бактериологические* (хлорирование). Это подразумевает наличие запаса хлора, т.е. источник повышенной опасности, при этом разлагаясь в воде, хлориды образуют вредные для здоровья человека радикалы, например, диоксин;

- *озонирования воды*. Его применение значительно повышает органолептические свойства воды, но внедрение озонирования энергоемко и должно обеспечиваться соответствующим оборудованием. Кроме того, нужна разработка методов контроля содержания в воде низкомолекулярных, кислотосодержащих веществ и др. продуктов озонирования;

- *обработка воды ультрафиолетом*, применяется для уничтожения спорообразующих вирусов, бактерий, водорослей, грибков, и плесени.

Применяемые плотности ультрафиолетового излучения в 16-20 мДж/см² для питьевой воды и 28-30 мДж/см² для хозяйственно - бытовых и промышленных вод не обеспечивают эффективной обработки вредной микрофлоры.

Также надо учитывать повышение устойчивости микрофлоры к хлору, озону и ультрафиолету. Микробиологи доказывают, что за последние 16-19 лет устойчивость микрофлоры к хлору повысилась в 6-7 раз, к озону в 3-4, а к ультрафиолету в 3 раза. Что означает, учитывая дальнейшее повышение устойчивости микроорганизмов вирусов, спор, и прочих к традиционным методам очистки воды надо при проектировании учесть уровни воздействия динамики роста сопротивляемости. Сегодня в зарубежных странах минимальная доза воздействия ультрафиолета задана в 40 мДж/см², а на проектируемых станциях по очистке воды заложена доза ультрафиолетового излучения 70-100 мДж/см². При этом перспективными являются методы совместного воздействия на воду разных дезинфицирующих способов и средств.

Например, одновременное воздействие ультразвука и ультрафиолета применяемого технологией обеззараживания воды «Лазурь». Ее основа это непрерывная обработка воды ультрафиолетом, с плотностью потока не менее 40 мДж/см^2 и длиной волны $253,7 \text{ нм}$ и 185 нм с одновременным ультразвуковым воздействием плотностью около 2 Вт/см^2 и звуковыми колебаниями. Технология «Лазурь» использована и апробирована с 1998 г. в модульных бактерицидных установках «Лазурь–М». При обработке потока воды ультразвуком от излучателя, установленного в корпусе камеры ультрафиолетового облучателя, в воде образуются короткоживущие парогазовые «каверны». Которые появляются в миг локального разряжения в воде и взрываются при сжатии в объеме камеры установки на неоднородностях с частотой в несколько десятков килогерц. За счет падения давления и температуры полностью уничтожается вредная микрофлора, появляются активные радикалы и перекись водорода, а в роли неоднородностей выступают микроорганизмы. Под воздействием ультрафиолета в воде, в камере установки возникает процесс объемной дегазации – появление микроскопических воздушных пузырей.

Оценивая эффективность данного метода по степени обеззараживания в сравнении с ультрафиолетом, при аналогичных энергетических затратах (для стоков $15\text{-}20 \text{ Вт/м}^3$) это воздействие эквивалентно 150 мДж/см^2 , что почти недостижимо в экономически целесообразных вариантах ультрафиолетовых станций, производимых ведущими компаниями.

Такая эффективность ($\text{Lg } N_{\text{вх}} / N_{\text{вых}} = 5 - 6$) гарантирует надежность обеззараживания $99,9999\%$ на ближайшие 25-35 лет по сравнимым затратам на создание станций обеззараживания воды. В сравнении с установкой Лазурь М250 ($250 \text{ м}^3/\text{час}$) компании «Сварог» и ОС-36А; ОС-72А; УДВ-288 - компании "ЛИТ", то по главным показателям (эффективность, энергопотребление, стоимость, затраты на эксплуатацию) отмечается

превосходство установок «Лазурь». Другим преимуществом установок является низкие требования к прозрачности воды (до 55%), количеству взвешенных в воде частиц (до 22 мг/л). и отсутствие периодической очистки чехлов лампочек от биообрастания и соляризации. (функции стиральной машины выполняют ультразвуковые колебания кавитаторов).

Замечено, что, сейчас, в России ведутся работы по проектированию регламентов по воде, пересматриваются методики в части применения ультрафиолета для обеззараживающих устройств питьевой воды, стоков и прочих вод. Наименьшая доза ультрафиолетового излучения установлена, с 2007 года, на уровне 40 мДж/см².

Система очистки промышленных и канализационных стоков

Изобретение относится к акустическим (ультразвуковым) способам воздействия на жидкие, газовые, газожидкостные смеси в механо-физико-химических процессах тепломассоэнергообмена с разделением сред.

Поставленная задача решается с помощью тепломассоэнергообменного процесса методом акустического резонансного возбуждения потока, создаваемого в эжекторе с газоструйными генераторами и концентратором ультразвукового поля, воздействующим на многофазный продукт. Для осуществления настоящего способа газоструйный генератор выполняется в виде генерирующих ультразвук кольцевых резонаторов с центром, расположенным по оси эжектора.

Акустическое поле влияет на кинетику фазовых превращений в жидкостях процесса кавитации пузырьков. Акустическое поле оказывает сильное воздействие как на пороги метастабильности жидкости, так и на кинетику фазового перехода. Звук влияет на поток зародышей пузырьков в жидкости и барьер, отделяющей метастабильную жидкость и новую фазу.

Этот процесс зависит, в основном, от амплитуды и частотной характеристики акустического поля.

Устройство позволяет производить очистку смесей воды с нефтепродуктами, канализационных стоков, различного типа сывороток, животноводческих стоков, отходов различных производств с производительностью 200 м³/час и более. При этом осуществляется временное или безвозвратное изменение физико-химических свойств обрабатываемого продукта за счет максимальной энергии акустического резонансного возбуждения потока продуктов в заданном частотном диапазоне.

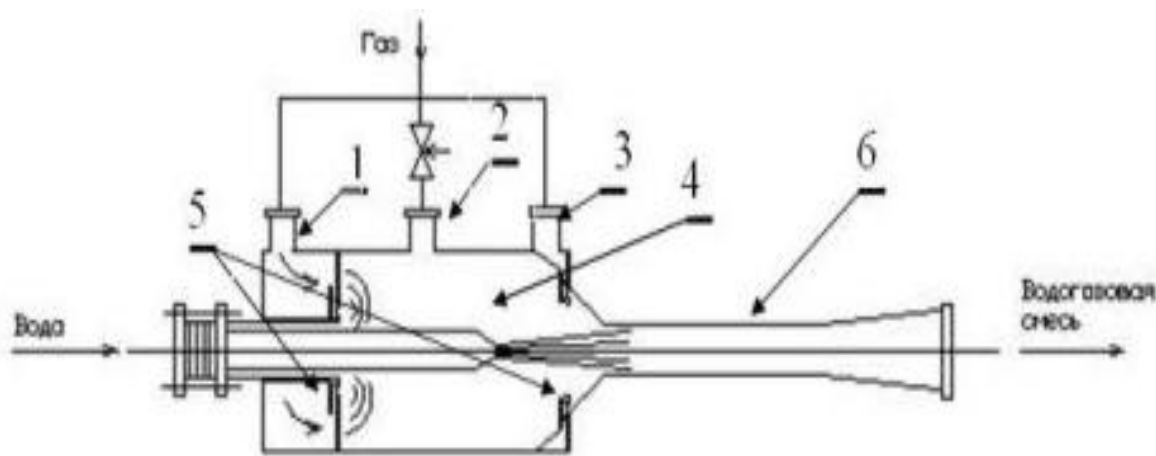


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема устройства

Предлагаемая установка для очистки воды с покомпонентным разделением жидких смесей может быть использована в любой сфере народного хозяйства и предназначена на очистку воды от механических примесей, нерастворимых и растворимых загрязнителей в непрерывном проточном режиме.



Рисунок 2.6 – Промышленная установка для очистки воды

Устройство содержит (смотри слева направо):

ультразвуковой генератор;

генератор озона;

воздушный компрессор;

дренажные насосы для удаления осадков из камер;

водный электролизер для получения гидроксильной группы очистки;

Устройство смонтировано в виде каскадных блоков на фото зелёного цвета. На выходе возможна установка дополнительного флотатора (рисунок 2.7 – 2.9).

Дополнительно к устройству разделения жидкостей и к кассетному фильтру прилагаются:

блок наработки реагента для окислительно-восстановительных операций (озоно-гидроксильный блок);

навесное оборудование (насосы, пульт управления);

накопительная емкость для очищенного продукта;

накопительная емкость для твердых включений;

Емкость с приемником очищаемой жидкости и отсеком отделения от воды твердых включений и легких нерастворимых жидкостей с меньшей плотностью;

Блок кассетных фильтров для грубой очистки воды;

Блок наработки озono-гидроксильных реагентов для окислительно-восстановительных операций;

Узел подачи указанных реагентов из блока наработки в емкость;

Блок магнитной обработки;

Резервуар для сбора твердых включений с узлом сушки перед утилизацией;

Узел удаления легких жидкостей в отдельную емкость;

Принцип работы установки по очистке воды

Загрязненная вода самотеком или под давлением подается в первый отсек через трубу. При подаче воды в первый отсек скорость движения резко уменьшается за счет увеличения объема. Снижение скорости потока жидкости приводит к тому, что жидкие загрязнители воды нефти и нефтепродуктов, жиров под воздействием силы тяжести, вытесняются водой вверх и собираются на ее поверхности. Одновременно твердые загрязнители типа песка и нерастворимых примесей оседают на дно емкости. Из приемника вода с загрязнителями перетекает в отсек с вертикальными перегородками, специально расположенными по всей ширине отсека, заставляя жидкость изменять направление движения, как в вертикальной плоскости, так и горизонтальной. За счет этого происходит увеличение промежутка времени нахождения жидкости в емкости. В результате этого происходит полное отделение твердых включений и легких примесей от очищаемой воды. Очищенная от легких загрязнителей и механических примесей вода подается в блок кассетных фильтров для грубой очистки воды и разделяется на два потока. Один (меньший поток) направляется принудительно в блок наработки реагентов. В этом блоке из воды

нарабатываются гидроксильные радикалы и газообразный озон, которые являются сильными окислителями. С помощью этих реагентов происходит интенсивная коагуляция мелких взвесей и окисление химически активных и биологических включений. Нарботанный реагент подается в приемник емкости и смешивается с потоком очищаемой жидкости. В нижней части приемника перпендикулярно направлению движения жидкости установлен блок магнитной обработки, который вместе с реагентами позволяет увеличить скорость окисления и коагуляции мелких взвесей, химически активных металлов и органических соединений. Второй большой поток жидкости каскадно направляется самотеком на слив.

В предлагаемом варианте очистки в осветлителе со взвешенным слоем осадка протекают одновременно следующие процессы:

коагуляция мелкодисперсных коллоидных частиц;

предельное окисление легко окисляемых органических загрязнений гидроксильными радикалами до углекислого газа и воды;

прохождение цепных реакций окисления трудно окисляемых органических загрязнений с переводом их из растворенного состояния в нерастворимый осадок. Инициатором цепных реакций являются гидроксильные радикалы и озono-кислородная смесь. Гидроксильные радикалы обладают большой бактерицидной способностью совместно с озоном, на порядок большей, чем газообразный хлор.

окисление металлов и ионов переменной валентности (двухвалентный алюминий в трехвалентный, нитриты в нитраты, сульфиты в сульфаты и т.д);
осветление воды (удаление взвесей из стоков).

Полученный осадок твердых включений и коагулированных смесей, образованных в приемнике и отсеке емкости с помощью гидроциклонов или шнековых транспортеров удаляется в емкость для дальнейшего обезвоживания. Жидкая составляющая отделенная от твердых включений возвращается в приемник емкости и проходит дальнейшую обработку, а

полученный обезвоженный осадок подвергается дальнейшей обработке для использования в народном хозяйстве.

Отделенные легкие загрязнители принудительно с помощью насоса удаляются из емкости в отдельную емкость для дальнейшей их обработки и получения из них соответствующих товаров.

Весь описанный технологический цикл производится в автоматическом режиме, не требует дополнительных реагентов, протекает без использования дорогостоящих реагентов и материалов, потенциально влияющих на окружающую среду, занимает малую площадь и позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты.

Установки предназначены для очистки бытовых и промышленных сточных вод, ливневых стоков с территорий городов, НПЗ, других промышленных предприятий. Установки с успехом могут быть применены для очистки от спиртовой барды, молочной сыворотки, водо-мазутных смесей и другие.



Рисунок 2.7 – Промышленные установки с производительностью очистки сточных $200 \text{ м}^3/\text{час}$. для водоканалов и др.



Рисунок 2.8 – Установка для автомойки на 250 машин/сутки



Рисунок 2.9 – Группа каскадной водоочистки 200 м³/час

Очистка воды ультразвуковым кавитатором - "Азов - 200"

Проблема очистки воды в промышленных объемах до настоящего времени не решена. Все там же в отдельных городах и целых регионах России и за рубежом питьевая вода оставляет желать лучшего, а стоки предприятий сельскохозяйственных, пищевых, химических, металлургических, горнодобывающих, обогатительных комбинатов и многих других ведомств сбрасывают плохо очищенную воду в реки, озера и моря. Увеличение размера штрафов за нарушения экологических норм практически не улучшает экологическую обстановку в регионах, а лишь становится дополнительной графой в отчетах о «проделанной работе». Применение все более сложных производственных технологий и их масштабов использование неуклонно ведет к тому, что одновременно присутствует в стоках не 2 - 3 компонента различных ведомств органического и минерального состава, а несколько десятков. При этом каждый ингредиент имеет свои сильно отличающиеся от других составляющих параметры, например, по окисляемости кислородом, удельному весу, дисперсности, концентрации и так далее. Более того, многие из компонентов вступают между собой в реакции, образуя дополнительные устойчивые и токсичные соединения, что еще более усложняет процесс их регенерации и очистки загрязненной воды.

Устройство производительностью 100 м³/час надежно очищало заиленную и «ржавую» воду из скважин и водозаборов, а также малокомпонентные сточные воды свиноводческих комплексов, мясокомбинатов, молокозаводов, спиртзаводов и так далее.

Круг заказчиков постепенно расширяется и в него стали входить предприятия со сложными технологическими циклами, в результате которых в воду сбрасывались несколько десятков различных компонентов. Например, от металлургических и сталепрокатных комбинатов: взвеси (формовочная смесь), зола, щелочь (KOH, NaOH): сульфаты, хлориды, фториды, ионы (железа, кальция, магния, марганца, цинка, меди, ванадия и др.), СОЖ (смазывающее-охлаждающие жидкости), масло, нефтепродукты и их

производные и многое другое. Для них требовалась более качественная очистка стоков и одновременно повышение пропускной способности установки. Простым дублированием освоенных в изготовлении систем задача не решалась, поэтому пришлось снова изобретать и экспериментировать.

Поскольку многокомпонентные водные растворы содержали совершенно разнородные по физическим и химическим параметрам вещества, то в первую очередь решили заняться наиболее хорошо окисляемыми и легко коагулируемыми в крупные и рыхлые образования компонентами. Сюда вошли различные легкие золы, гели, взвеси, СОЖ, масло, нефтепродукты и т.п. Примеси с низким удельным весом и малой плотностью. Они обрабатывались в двух параллельно установленных ультразвуковых газоструйных генераторах типа «Азов – 100». На выходе получились крупные, хорошо скоагулированные рыхлые образования, удалить которые флотатором не представляло труда. Вместе с ними присутствовали более мелкие, трудно окисляемые примеси с большим удельным весом: ионы и частицы металлов, солей жесткости, окалина и так далее. Для их окисления и коагуляции с легкими конгломератами требовались дополнительные затраты энергии, времени и пути совместного движения. Поэтому в известной системе «Азов – 100» (рисунок 2.10) состоящей из: эжектора 1, приемной камеры 2, газоструйного генератора 3, воздушных патрубков 4, озоновых патрубков 5, регулятора озона 6, генератор озона 7, расширительной трубы 8, флотатора 9 с отстойником, воздушного компрессора 10, привели следующие важные дополнения.

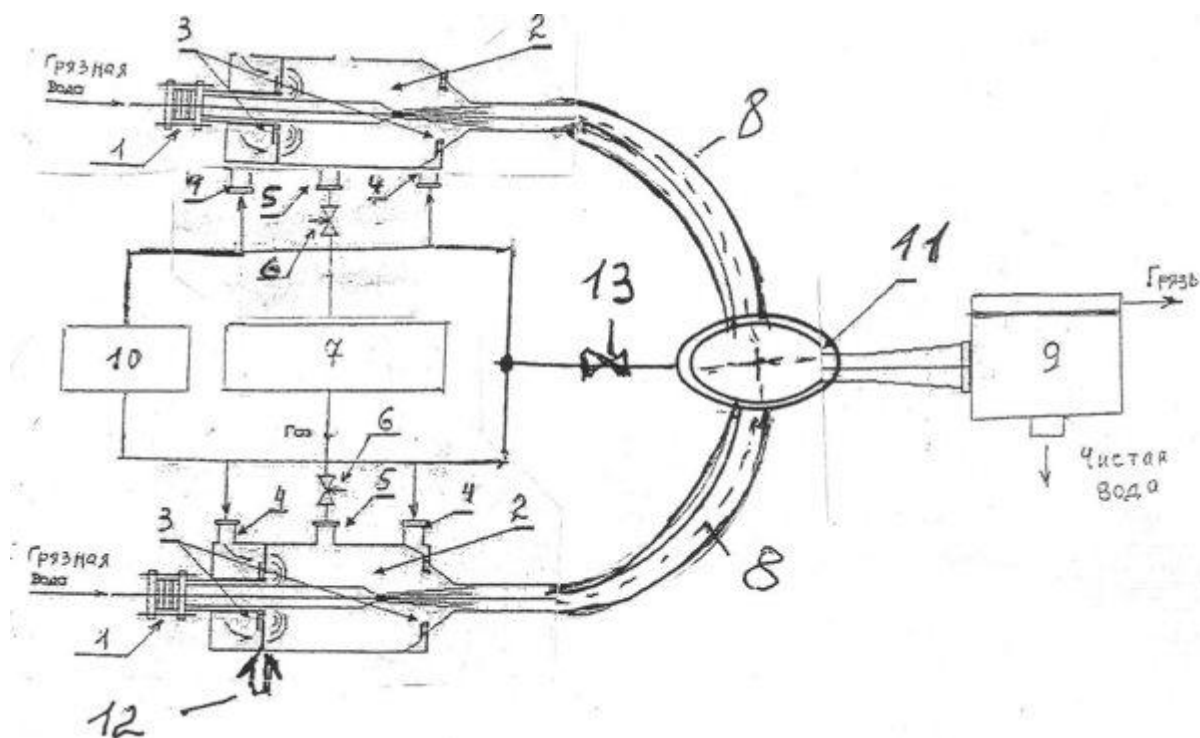


Рисунок 2.10 – Схема установки для очистки воды «Азов – 200»

Расширительные трубы 8 выполнили в виде закругленных волноводов, которые встречно завели в камеру принудительной коагуляции 11. Кроме того, один из газоструйных генераторов 3 снабдили регулятором частоты 12 ультразвуковых излучений. Теперь стало возможным плавно изменять фазу встречных УЗ (ультразвуковых) колебаний и получать эффекты «стоячей» или бегущей волны. Аналогичные волны применялись в установках приготовления «живой и мертвой» воды «Элав – 2009» для очистки керамической диафрагмы и удаления пленок газов с углеродных электродов. Меняя регулятором частоты 12 фазу УЗ колебаний в нижнем волноводе 8 стало возможным получать в камере 11 различные комбинации волновых процессов. Наиболее результативным оказался процесс «стоячей» волны (см. диаграмму на рисунке 2.11).

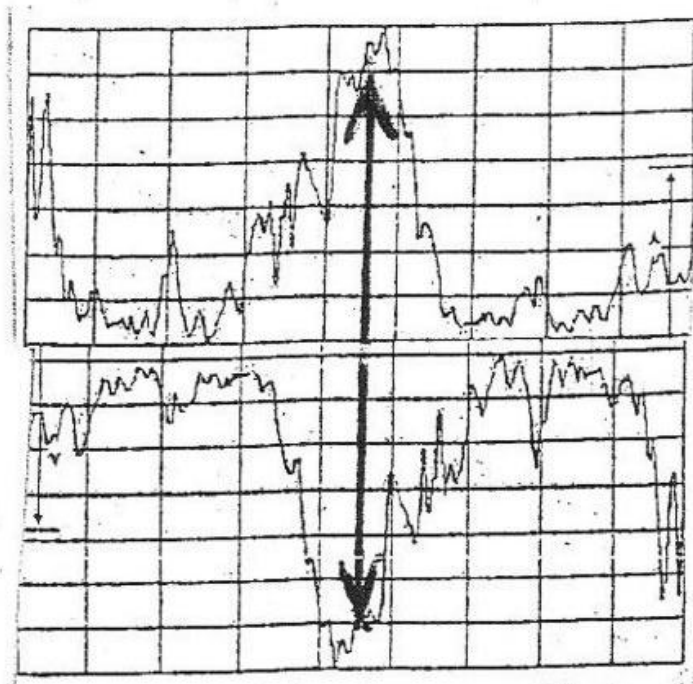


Рисунок 2.11 – Диаграмма стоячей волны в установке очистки воды «Азов-200»

Амплитуда «АСВ» стоячей волны удваивалась, что приводило к двукратному увеличению давления между мелкими и тяжелыми частицами грязи по отношению к крупным и рыхлым конгломератам. Вследствие этого, первые частицы внедрялись во вторые, как металлические опилки в кусок пластилина и крепко там удерживались, не выпадая в осадок. Дополнительное количество воздуха, поступающего от воздушного компрессора 10 в камеру 11 через регулятор 13, обволакивало принудительно коагулированные между собой крупные и мелкие конгломераты и выносило их на флотатор 9, где они убирались сверху фильтром в кассету.

Новая система промышленной очистки воды «Азов-200 АСВ» успешно очищает многокомпонентные сточные воды не менее, чем на 98 % от всех видов примесей и при этом может иметь производительность более 200 м³/час. Отобранная из флотатора 9 грязь, содержащая различные примеси черных и цветных металлов, других ценных добавок может служить сырьевой базой для извлечения этих металлов в чистом виде на электролизерах типа «РИФ-12». Поскольку концентрация собранных во

флотаторе материалов в сотни тысяч раз больше, чем в сточной воде, то затраты электроэнергии и время на извлечение цветных и редкоземельных металлов и др. соединений и многократно снижаются. Предприятие получает не только чистую оборотную воду, но и отдельные ценные ингредиенты для повторного использования в наукоемких технологических процессах производства.

Установка «Азов-200 АСВ» с амплитудной модуляцией УЗ стоячей волны может быть использована не только с целью очистки сточных вод самых сложных производств, но и для синтеза новых продуктов и материалов с заданными свойствами. Например, предложенным способом можно получать новейшие катализаторы выхлопных газов для автомобилей, прочно «загоняя» нано порошки металлов в пористую керамику. Можно получать композитные соединения и материалы для химической, нефтяной, газовой промышленности, медицины и многих других промышленных и научных разработок. Возможно получение сверх чистых компонентов для топливных элементов энергетики не только для космических, но и наземных установок низкой стоимости. Перспективна очистка сырья для изготовления солнечных батарей на гибких полимерных пленках и многое другое. НИОКР в указанных направлениях продолжаются вместе с изготовлением рабочих образцов изделий по техническим заданиям заказчиков.

С помощью ультразвуковых технологий можно изменять состояние многих материалов на уровне молекулярных связей. Так, например, имеются интересные результаты обработки торфа ультразвуковыми кавитаторами типа «Азов -200» с получением гуминовых, фулиевых и др. компонент, которые являются мощными стимуляторами роста растений и значительно повышают урожайность овощных и фруктовых культур, злаков и так далее. Модифицированный торф после обработки становится универсальным удобрением для теплиц, цветников, хозяйств и личных дачных участков в 6 соток. Он полностью усваивается растениями и имеет низкую стоимость.

Поскольку запасы торфа в России огромны, то он может существенно повлиять на повышение плодородия земель в Российской Федерации.

2.2 Разработка модели кавитатора

Кавитатор представляет собой модель гидродинамического излучателя. Истечение жидкости происходит через сопло или мембрану. Кавитатор представлен на рисунке 2.12.

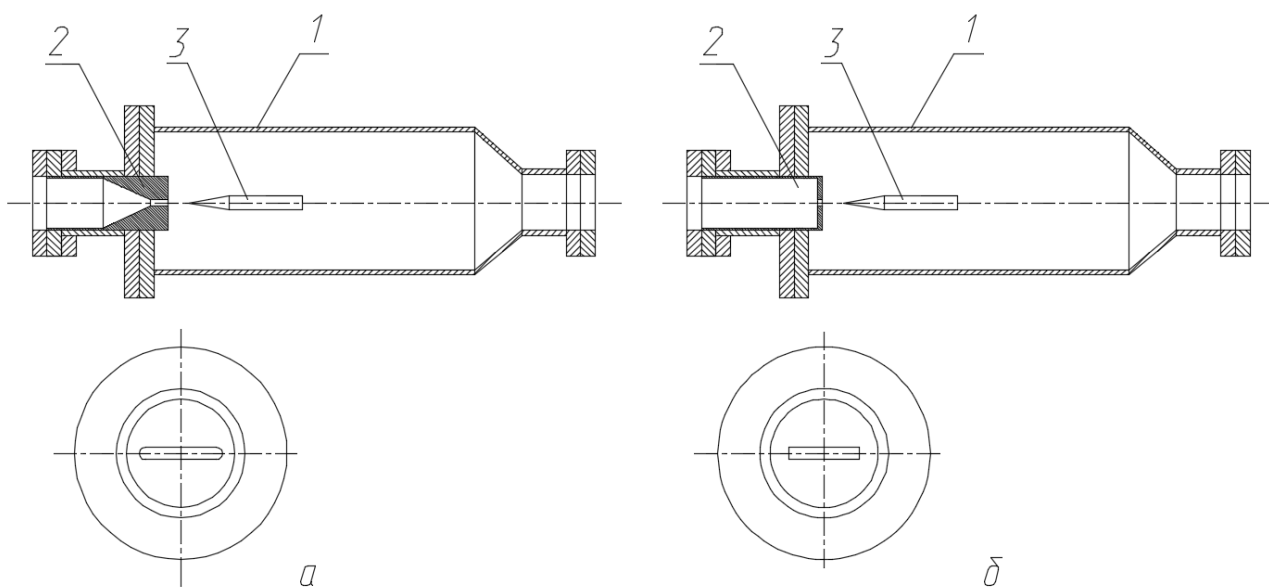


Рисунок 2.12 – Кавитатор: а) сопловой; б) мембранный. 1 – корпус кавитатора, 2 – сопло или мембрана, 3 – пластина.

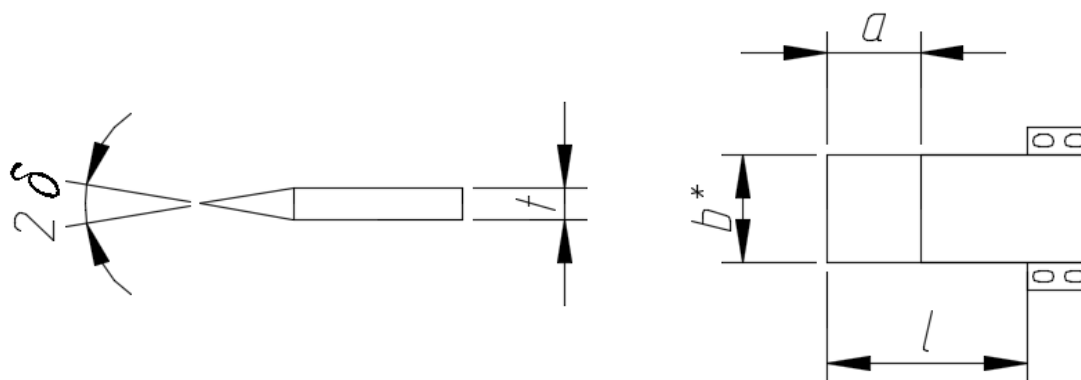


Рисунок 2.13 – Пластина

Пластина (рисунок 2.13) играет роль механического резонатора и излучает звук. Звук излучается при определенном расстоянии между соплом (мембраной) и пластиной с частотой, определяемой по формуле:

$$\nu = v \frac{n}{H}, \text{ Гц}, \quad (2.1)$$

где v – скорость потока, м/с;
 n – число вихрей на участке сопло–пластина;
 H – расстояние между соплом (мембраной) и пластиной, м.

За пластиной возникают две вихревые дорожки Бернара-Кармана, при этом длина звуковой волны равна расстоянию между вихрями, измеряемому по оси излучателя:

$$\nu = \frac{v}{h}, \text{ Гц}, \quad (2.2)$$

где h – расстояние между вихрями, м.

Имеются следующие зависимости для частоты при разных соотношениях между расстоянием H и шириной b щели сопла (мембраны):

При $0 < H < 5$, $v < 25$ м/с

$$\nu = 0,27 \frac{v}{H}, \text{ Гц}; \quad (2.3)$$

При $H < 5,15b$ и $\frac{v_n H}{v} \geq 0,8$:

$$\nu = 0,8n \frac{v}{H}, \text{ Гц}; \quad (2.4)$$

При $H > 5,15b$ и $\frac{v_n H}{v} \geq 0,8$:

$$v = 0,8n \frac{v}{b} \left[2,78 \left(\frac{H}{5b} + 0,41 \right)^{1,5} + 0,41 \right]^{-1}, \text{ Гц}; \quad (2.5)$$

где b – ширина щели сопла (мембраны), м;
 v_n – частота собственных колебаний пластины.

При консольном креплении пластины частоту собственных колебаний определяют по формуле:

$$v_n = 0,162 \alpha \cdot \alpha' \cdot \mu \cdot \varphi \cdot \varepsilon \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ Гц}, \quad (2.6)$$

где α и α' – коэффициенты, учитывающие заострение пластины;
 μ – коэффициент, учитывающий влияние ширины;
 ε – коэффициент, зависящий от свойств жидкости;
 t, l – толщина и длина консольной части пластины, м;
 E – модуль упругости материала пластины, Па;
 ρ – плотность материала пластины, кг/м³;
 φ – коэффициент нежесткости крепления.

Коэффициент μ определяют из выражений:

$$\text{При } 0 \leq \frac{b^*}{l} \leq 0,5$$

$$\mu = 1 + 0,07 \frac{b^*}{l};$$

$$\text{При } 0,5 \leq \frac{b^*}{l} \leq 1,0$$

$$\mu = 1,035 + 0,03 \left(\frac{b^*}{l} - 0,5 \right); \quad (2.7)$$

где b^* – ширина пластины, м.

Коэффициент ε , учитывающий влияние присоединенной массы жидкости, определяют по формуле:

$$\varepsilon = \left(1 + \gamma \frac{\rho_0}{\rho \cdot \varphi} \cdot \frac{b^*}{t} \right)^{-0,5}, \quad (2.8)$$

где ρ – коэффициент, зависящий от отношения a/l и b^*/l [23];

ρ_0 – плотность жидкости, кг/м³.

Коэффициент жесткости крепления φ в зависимости от частоты собственных колебаний пластины ν , значения α и α_{\square} при различном коэффициенте заострения a/l определяют по [23].

Расчет кавитатора сводится к определению габаритных размеров сопла или отверстия в мембране, размеров пластины и расстояния между соплом (мембраной) и пластиной.

Расчет определяет параметры пластины: толщину, длину консоли, коэффициент заострения, скорость истечения жидкости; геометрические размеры сопла (ширину щели, длину щели и длину формирующей части) или мембраны (ширину щели); расстояния между соплом (мембраной) и пластиной.

Определяют производительность одного излучателя и число излучателей.

Рассчитывают скорость истечения рассчитывают по формуле:

$$v = \xi \sqrt{\frac{2p}{\rho_0}}, \text{ м/с}, \quad (2.9)$$

где p – давление жидкости перед соплом (пластиной), Па;

ξ – коэффициент скорости истечения, $\xi=0,97 \div 0,99$;

ρ_0 – плотность жидкости, кг/м^3 .

Оптимальную ширину щели определяют по формуле:

$$b=0,01H, \text{ м}, \quad (2.10)$$

где H – расстояние между соплом (мембраной) и пластиной, м.

Длину щели сопла определяют по формуле:

$$b' = \frac{Q}{\xi' \cdot v \cdot b}, \text{ м}, \quad (2.11)$$

где Q – производительность излучателя, $\text{м}^3/\text{ч}$;

ξ' – коэффициент расхода, для сопел со шлифованной формирующей частью $\xi'=0,90 \div 0,96$.

Длину формирующей части сопла принимают $s'=(2 \div 3)b$. Для обеспечения малой потери напора необходим плавный переход от широкого сечения напорного трубопровода к узкой щели сопла в виде конического с углом при вершине конуса не более 30° .

Ориентировочно определяют расстояние между соплом (мембраной) и пластиной по формуле:

Для малых расстояний

$$H = 0,27 \frac{v}{\nu}, \text{ м};$$

Для больших расстояний

$$H = 0,8 \frac{v}{\nu}, \text{ м}.$$

Определяют толщину пластины из условий равенства частоты собственных колебаний пластины струхалевой частоте:

При $H < 5,15b$

$$t = 0,18 \frac{v}{\nu};$$

При $H > 5,15b$

$$t = \frac{0,216v}{\nu} \left(\frac{H}{5b} + 0,41 \right)^{-0,5}.$$

Ширину пластины определяют по соотношению $b^* = b' + (2 \div 3) \text{ мм}$.

Находят ориентировочную длину консоли пластины по формуле:

$$l = \left(0,162 \frac{t}{\nu_n} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \right)^{0,5}, \text{ м}.$$

Угол 2δ заостренной части пластины выбирают в пределах $30\text{--}40^\circ$.

Длина заостренной части определяют по формуле:

$$a = \frac{t}{2} \text{ctg} \delta, \text{ м}.$$

Определяют точно расстояние между соплом (мембраной) и пластиной:

При малых расстояниях

$$H = 0,27 \frac{v}{\nu}, \text{ м};$$

При больших расстояниях

При $H < 5,15b$

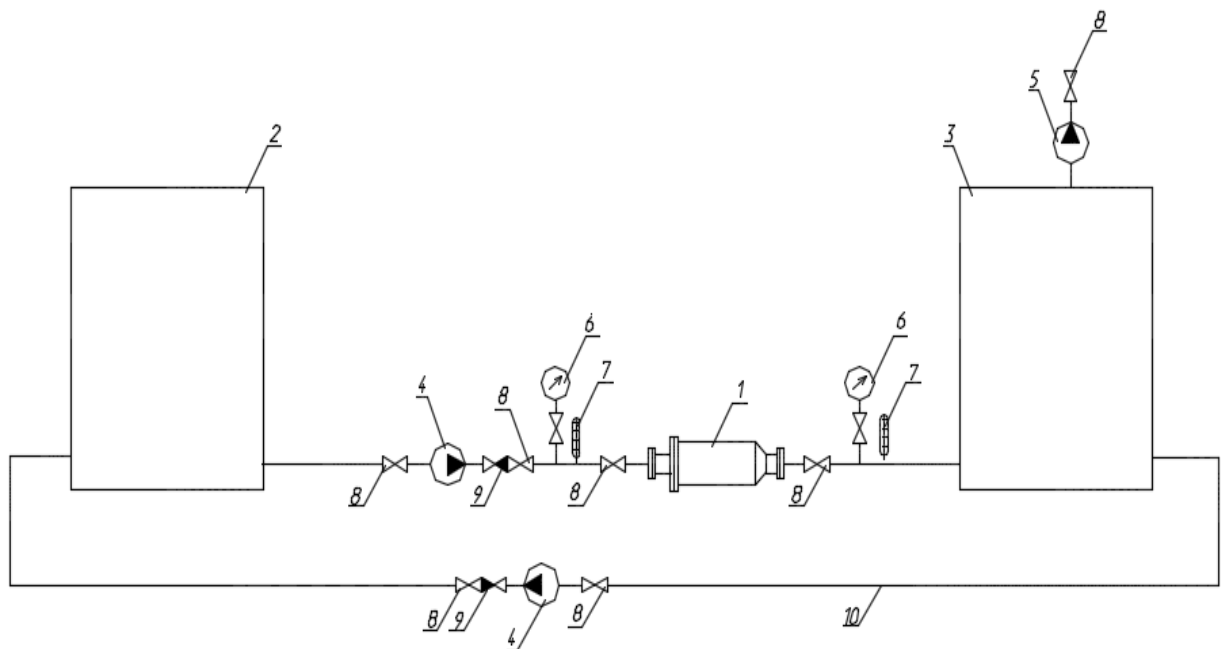
$$H = 0,8 \frac{v}{v}, \text{ м};$$

При $H > 5,15b$

$$H = 5b \left\{ \left[0,36 \left(\frac{0,8v \cdot n}{v \cdot b} - 0,41 \right) \right]^{2/3} - 0,41 \right\}.$$

2.3 Разработка схемы кавитационной установки

Для исследования кавитатора разработана схема кавитационной установки. В нее входят: емкости исходной и обработанной воды, насосы циркуляционные (повысительные) и вакуумный, кавитатор, манометры и термометры, запорная арматура. Схема кавитационной установки приведена на рисунке 2.14.



1. Кавитатор, 2. Емкость исходной воды, 3. Емкость обработанной воды,
4. Циркуляционный насос, 5. Вакуумный насос, 6. Манометр,

7. Термометр, 8. Кран шаровой или вентиль, 9. Обратный клапан,
10. Переливной трубопровод

Рисунок 2.14 – Схема кавитационной установки.

Корпус кавитатора выполнен из прозрачного материала для осуществления фиксации процесса течения жидкости в кавитаторе на видео- и фотоаппаратуру. Кавитационная установка предусматривает работу в двух режимах: одноразовая обработка исходной воды из емкости 2 в емкость 3, циркуляционная обработка воды. Перед началом работы емкость 2 заполняется водой. Перед началом работы установки и после проведения обработки в зависимости от выбранного режима работы установки берется проба воды. Пробы воды исследуются на показатели качества воды и под микроскопом.

Вакуумный насос 5 создает пониженное давление в емкости 3. Контроль параметров воды (давление и температура) осуществляется до и после кавитатора.

Одноразовая обработка воды. Включается насос 4 и открываются вентили на основном трубопроводе, на переливном трубопроводе вентиль закрыты и отключен насос. После перекачивания воды из емкости 2 в емкость 3 на основном трубопроводе вентили закрываются и насос останавливается, а на трубопроводе 10 открываются вентили и включается насос, осуществляя перекачку воды в емкость 2 или слив в дренаж.

Циркуляционная обработка воды. Может осуществляться в циклическом режиме и непрерывном. Циклический режим заключается в нескольких заданных количествах циклов одноразовой обработки воды. Непрерывная обработка воды производится при открытых вентилях 8 и включенных насосах 4 на основном и переливном трубопроводах.

Для установки использовалась водопроводная вода Центрального района г. Тольятти, как свеженабранная, так и предварительно отстаиванная. Предварительное отстаивание воды менялось от 24 до 72 часов.

Длительность эксперимента в каждом цикле составляла 1,5 часа, из которых 30 минут отводилось на кавитационную обработку и 60 минут на последующее отстаивание. Контроль параметров рН, ОВП, электропроводимости, температуры проводился периодически через 30 секунд во время обработки при помощи монитора качества воды РТН-027.

Выводы по главе 2

1. Проведено сравнение конструктивных особенностей различных типов кавитаторов, используемых для обеззараживания воды
2. Обоснован выбор конструкции гидродинамического кавитатора для использования в установках до 200 м³/ч и средней загрязнённости.
3. Предложен способ совместной обработки воды ультразвуковым кавитатором и ультрафиолетовыми лампами для нужд водоснабжения бассейнов и на водозаборах с низкой загрязнённостью исходной воды.

Глава 3 Возможная область применения испытанного кавитатора в системах водоснабжения

3.1 Анализ полученных результатов испытания кавитатора

Теория подготовки воды разработка и усовершенствование методов и технологии её воды от разных видов загрязнения в РФ весьма высокий. Конструкции промышленных изделий, и качество химических реагентов, ионообменных смол находилось на недостаточном уровне. Проблемы российской промышленности в начале века обострили это положение. Но в наши дни просматривается тенденция, связанная с выходом на отечественный рынок по приемлемым ценам продукции ведущих зарубежных корпораций, и с началом широкого производства спектра собственных реагентов.

Наметились принципиально различные подходы, появилось множество дистрибьютеров, поставляющие готовое оборудование по заказу. Проектирование, монтаж, пуско-наладка установок производятся крупной иностранной фирмой, а наши выполняют посреднические функции. В идеале они производят монтажные и пуско-наладочные работы. Цена этих установок значительна, а качество обслуживания от подобных организаций оставляет желать лучшего.

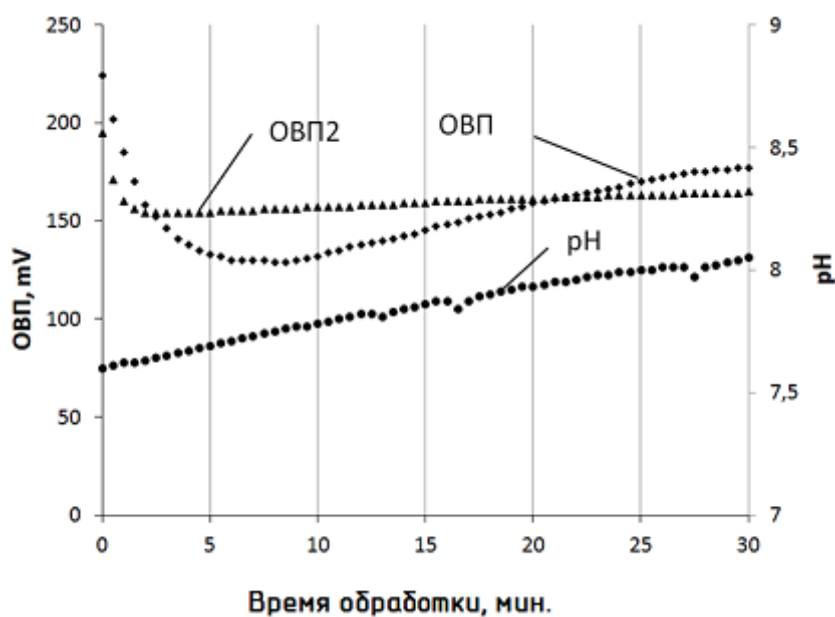
Иная группа компаний располагает квалифицированными мастерами, имеющим большой научный и инженерный стаж, самостоятельно проводит разработку оборудования и технологии, снабжает комплектующими, закупая их у зарубежных фирм, помещает заказ на изготовление разных агрегатов на российских заводах, производя сборку и обслуживание оборудования.

Особенностью промышленных установок в сравнении с обычными являются значительная производительность и более жесткие требования к качеству подаваемой воды, надежности в работе, бесперебойной подачи ее потребителю. Это требует качественного расчета агрегатов, выбора

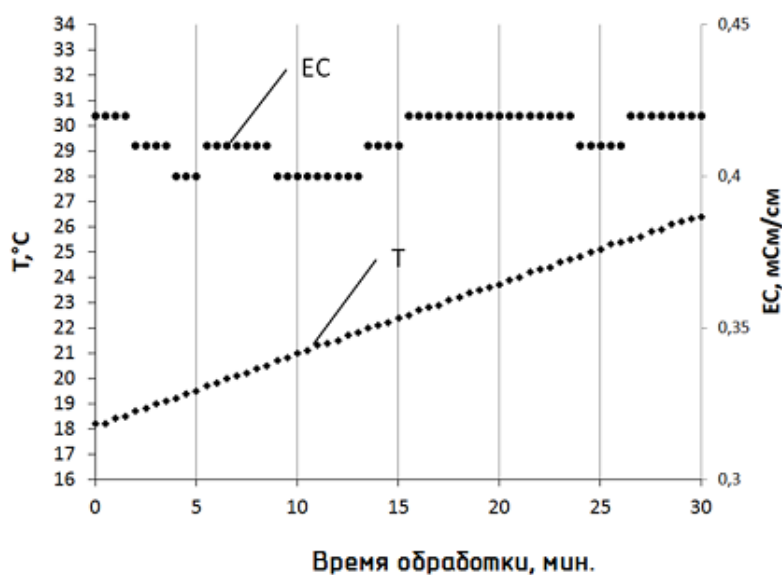
оптимальных типоразмеров оборудования и режимов работы, гарантированного ресурса и своевременного сервисного обслуживания.

После проведения серии обработки водопроводной воды предварительно отстаиванной в течении 24 часов получены результаты измерений рН и ОВП, приведенные на рисунке 3.1.

а)



б)



а) окислительно-восстановительного потенциала ОВП, рН;

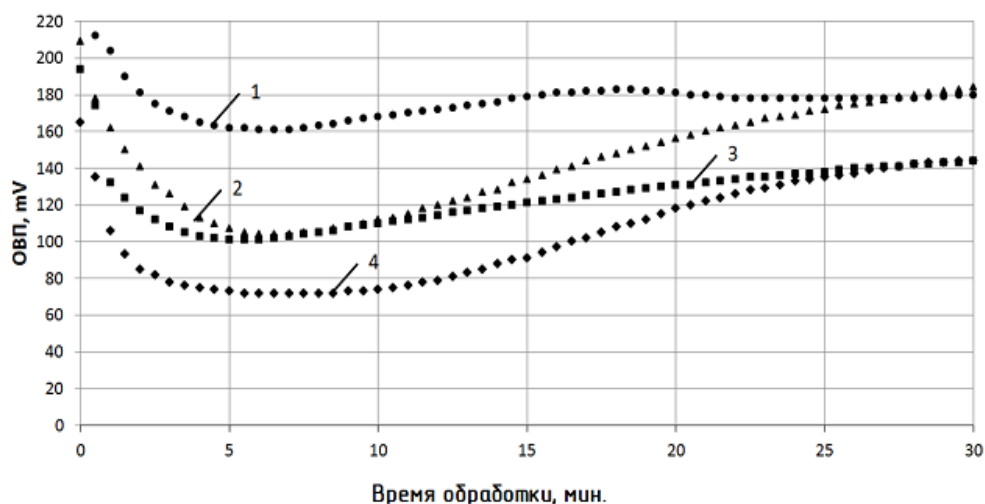
б) температуры Т, электропроводности ЕС

Рисунок 3.1 – Графики изменения электрохимических характеристик воды во время кавитационной обработки

Окислительно-восстановительный потенциал воды интенсивно снижался в течении 7 минут обработки с 200 мВ до 77 мВ, затем постепенно восстанавливался. Значение кислотно-щелочного баланса рН постепенно повышается от 7,6 до 8,02 во время работы, а после остановки не изменялся. Повторная обработка воды не привела к существенным изменениям рН и ОВП.

При обработке воды наблюдалось повышение температуры воды со стабильным приращением 0,3°C.

После ряда проведенных экспериментов сделан их анализ, который позволил обнаружить влияние продолжительности отстаивания водопроводной воды на изменение ОВП во время обработки (рисунок 3.2).



1 – без предварительного отстаивания; 2 – с предварительным отстаиванием 24 часа; 3 - с предварительным отстаиванием 72 часа; 4 - без предварительного отстаивания

Рисунок 3.2 – Графики изменения ОВП при кавитационной обработке в зависимости от продолжительности предварительного отстаивания

Определение влияния последующего отстаивания обработанной водопроводной воды на ее основные электрохимические характеристики производился отбор проб воды. Интервал отбора проб воды 10 минут. После исследуемые показатели воды контролировались во время отстаивания.

Проводились исследования проб обработанной воды без смешения с необработанной. Делались сравнения результаты измерений с контрольной пробой необработанной воды в течении нескольких дней (рисунок 3.3).

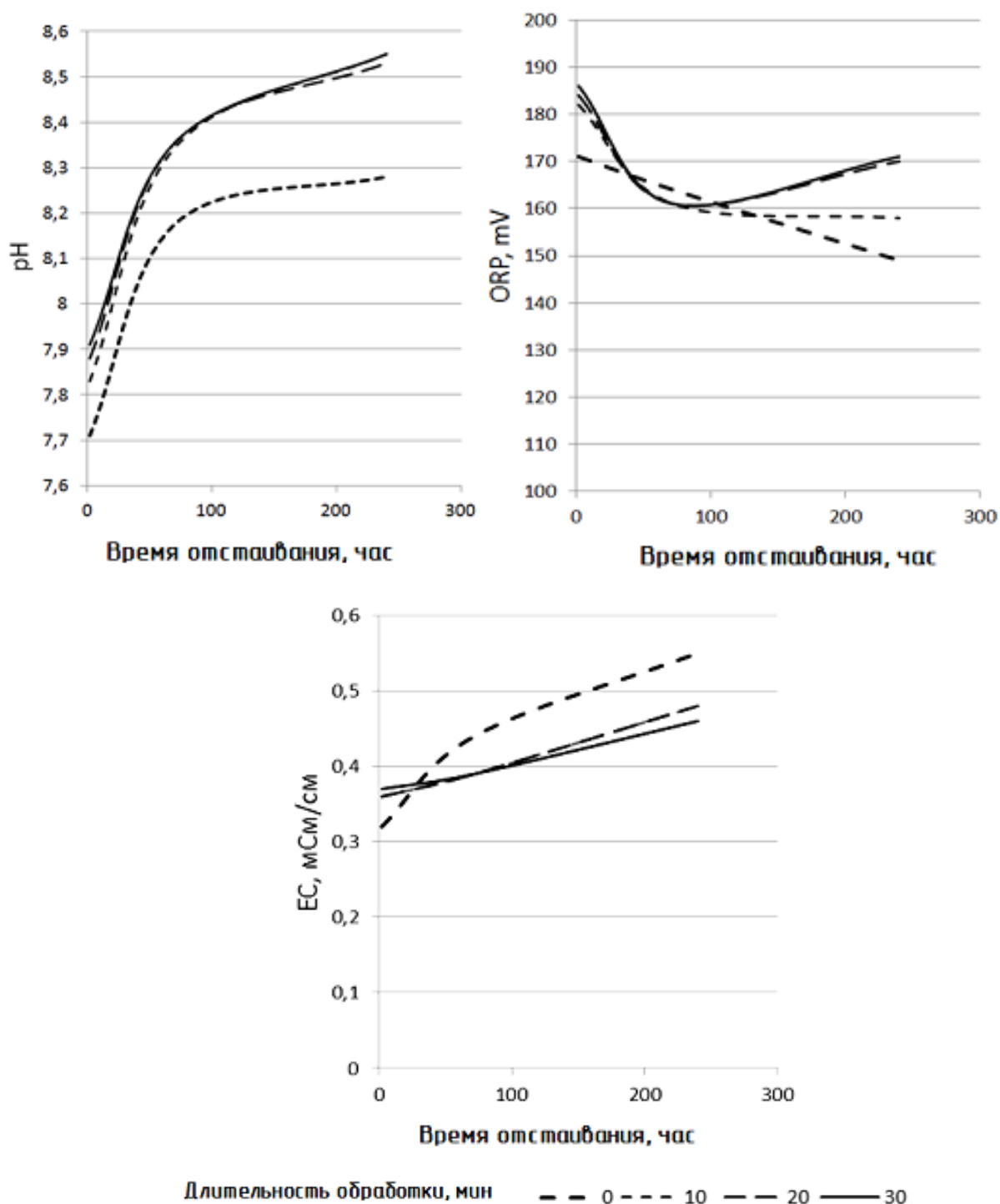


Рисунок 3.3 – Графики основных электрохимических характеристик воды (рН, ОВП (ORP), ЕС) в зависимости от продолжительности последующего отстаивания

Изменение рН обработанной воды со временем увеличивается более интенсивно, чем необработанной. Полученные графики практически почти одинаковы, то влияние продолжительности кавитационной обработки более 6-7 минут существенно не влияет на показатель рН. Изменение значения ОВП в процессе отстаивания для необработанной воды имеет линейную зависимость, а для обработанной воды – наблюдались колебания. Изменение электропроводности воды со временем в сторону увеличения, но в обработанной воде менее интенсивно и постепенно.

При проведении экспериментов наблюдались отклонения ОВП как в одну, так и в другую сторону. Причинами таких отклонений является наличие в воде после кавитации гидратированные электроны и атомы водорода, являющиеся активными восстановителями. Отсутствие колебаний при повторной обработке воды указывает на отсутствие в воде достаточного количества растворенного кислорода. При отстаивании происходит естественное насыщение воды кислородом, что частично восстанавливает способность к реакциям в воде (график ОВП₂, рисунок 3.1).

На интенсивность окислительно-восстановительных реакций оказывает положительное влияние увеличение продолжительности отстаивания (рисунок 3.3). Причиной увеличения щелочности воды до соответствующих значений рН является увеличение количество гидроксильных групп ОН⁻ вследствие протекания электрохимических процессов (рисунок 3.1, а). повышение общей температуры воды в ходе экспериментов обусловлен диссипативными процессами в турбулентных течениях и имеет стабильный характер (рисунок 3.1 б).

Кавитационные процессы оказывают разрушающее воздействие на живую и неживую материю. Микроорганизмы механически разрушаются и обеззараживаются. Индикатором биоповреждения жидкости служит появление резкого гнилостного и сероводородного запахов, изменение цвета жидкости от опалово-синего до черного цвета, повышение кислотности и т.д.

Таблица 3.1 – Результаты обеззараживания жидкости

Проба	Обработка	Результаты	Размер мкм
1	Без обработки	Яйца аскариды – 5 шт. в 5-ти полях зрения	40...50
2	Без обработки	Амеба – 2-3 в поле зрения	20...30
3	Без обработки	Яйца аскариды – 1 шт. в 5-ти полях зрения	40...50
1	(УЗО) - 6 с	Амеба – 1 в поле зрения	20...30
1	УЗО – 12 с	Яйца аскариды – 5 шт. в 5-ти полях зрения	40...50
1	УЗО – 30 с	Не обнаружено	-
2	УЗО – 30 с	Не обнаружено	-
3	УЗО – 30 с	Не обнаружено	-

Таблица 3.2 – Результаты процесса дезинтеграции клеток микроорганизмов в зоне ультразвуковой кавитации

Показатели	Вид микроорганизмов								
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> 27			<i>Bacillus subtilis</i> 36			<i>Desulfovibririo sp.</i> 10		
Температура, °С	28			28			28		
Время обработки, мин.	4,5			6			6		
Интенсивность ультразвукового поля, Вт/см ²	5	7	10	5	7	10	5	7	10
Степень дезинтеграции, %	100	50	75	100	50	50	100	50	75

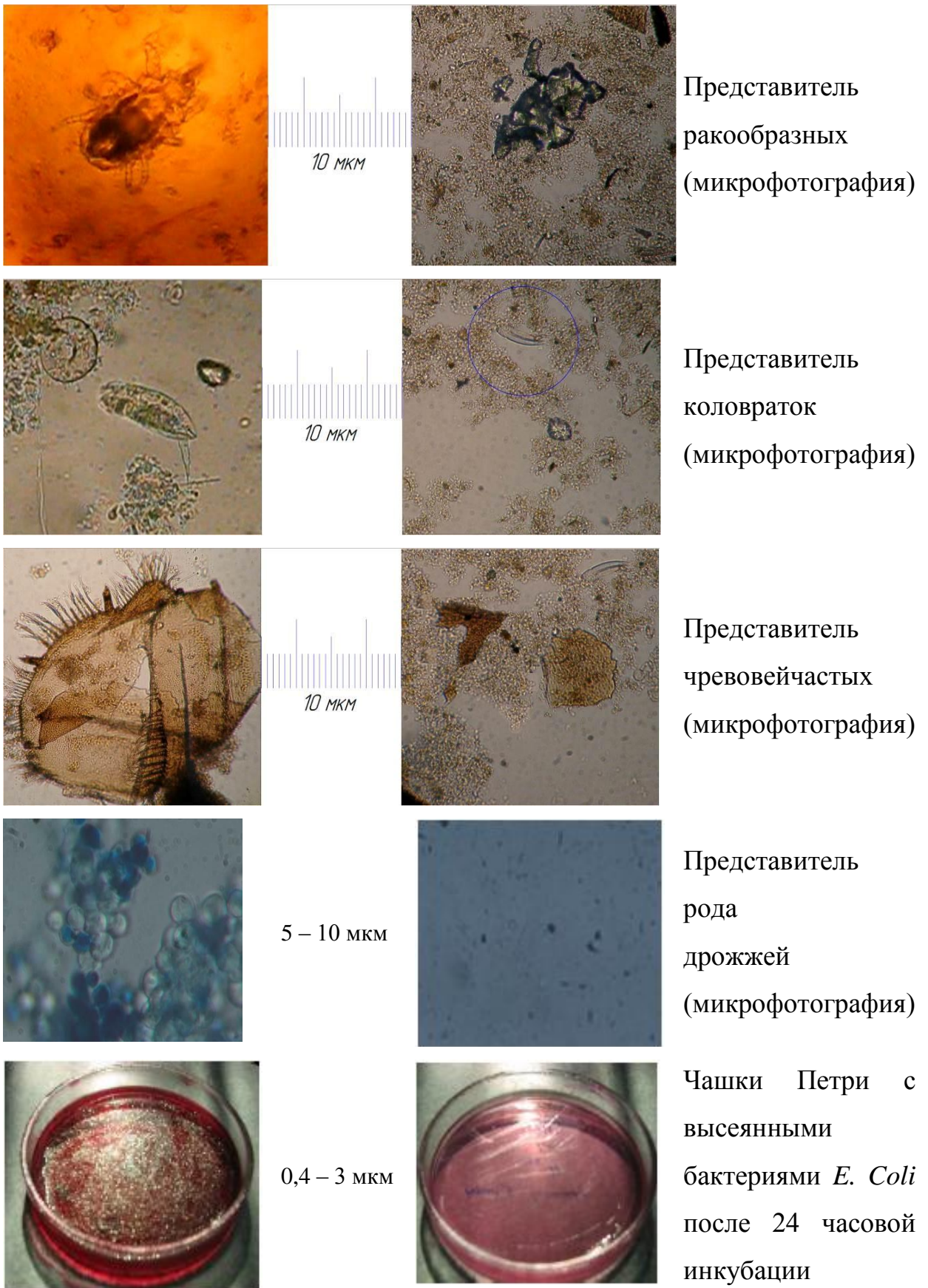
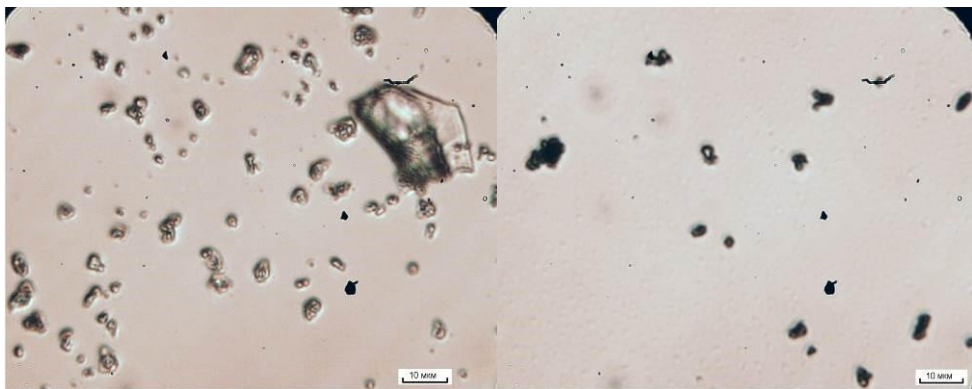


Рисунок 3.4 – Механическое разрушение микроорганизмов под действием ультразвуковой кавитации



Рисунок 3.5 – Результаты разрушения тестовых образцов фольги в кавитаторе при различных уровнях звукового давления.

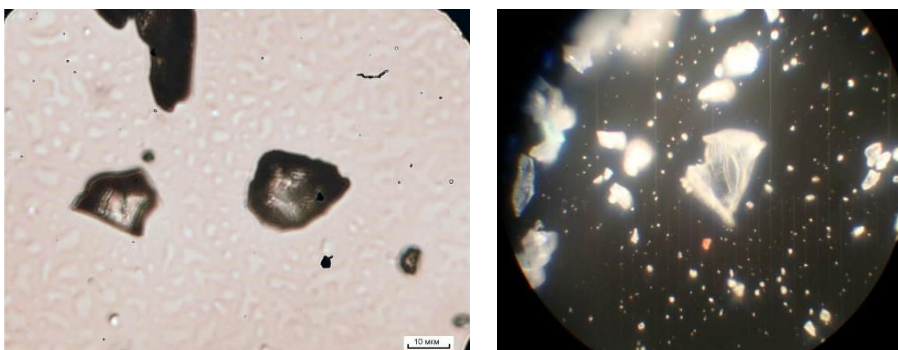
Обработка смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) в кавитационных установках помимо борьбы с бактериальным загрязнением улучшает реологические и смазывающие свойства СОЖ за счет постоянного интенсивного перемешивания составляющих компонентов на молекулярном уровне. СОЖ в процессе эксплуатации накапливает большое количество мелких частиц.



а- микрофотографи
я песка; б-
микрофотографи
я угольной пыли

а)

б)



Микрофотограф
ия карбида бора

Рисунок 3.6 – Механические примеси в СОЖ

3.2 Область применения кавитатора в водоподготовке

Применение кавитатора возможно в стационарном и передвижном исполнении (рисунок 3.7) в системах водоснабжения и водоотведения, на очистных сооружениях водозабора, в системе оборотного водоснабжения, в системах водоподготовки (рисунок 3.8).



Рисунок 3.7 – Портативный гидродинамический кавитатор для очистки твердых поверхностей под водой



а)



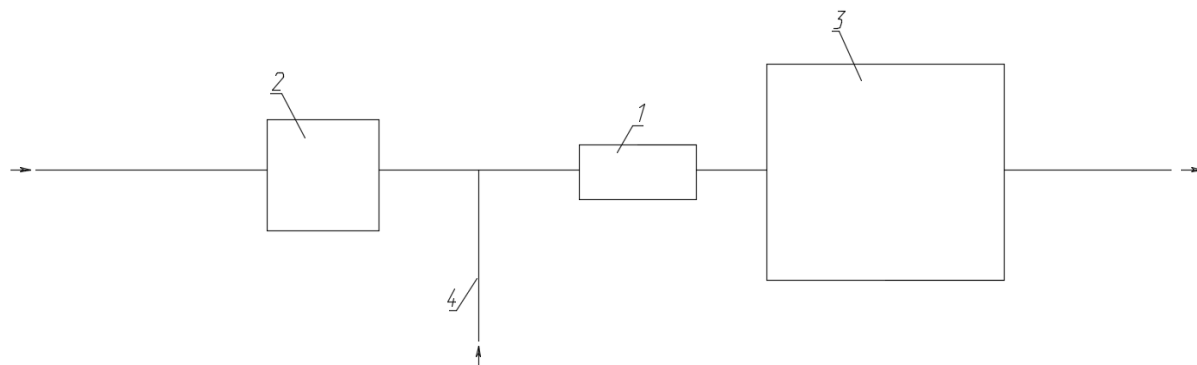
б)

Рисунок 3.8 – Трубопроводы водоснабжения (а) и канализации (б) до и после гидродинамической промывки от отложений на стенках.

3.3 Возможные технологические схемы водоподготовки с кавитатором

Применение гидродинамического кавитатора:

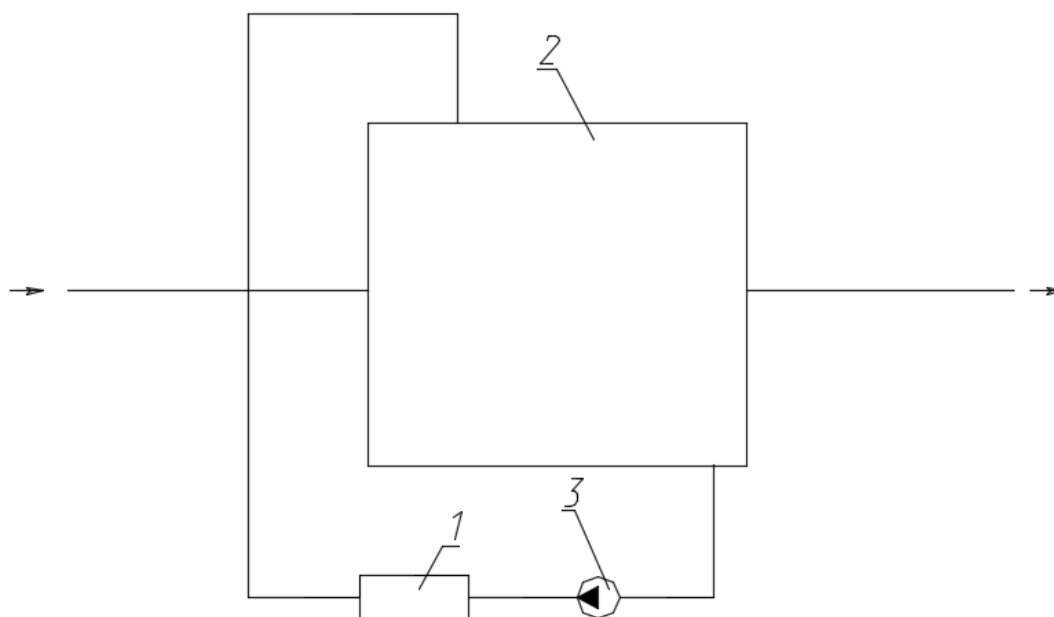
1) Установка кавитатора перед смесителем или отстойником после насосной станции I подъема.



1 – кавитатор, 2 – насосная станция I подъема, 3 – смеситель или отстойник,
4 – трубопровод подачи реагента от реагентного хозяйства.

Рисунок 3.9 – Технологическая схема установки кавитатора

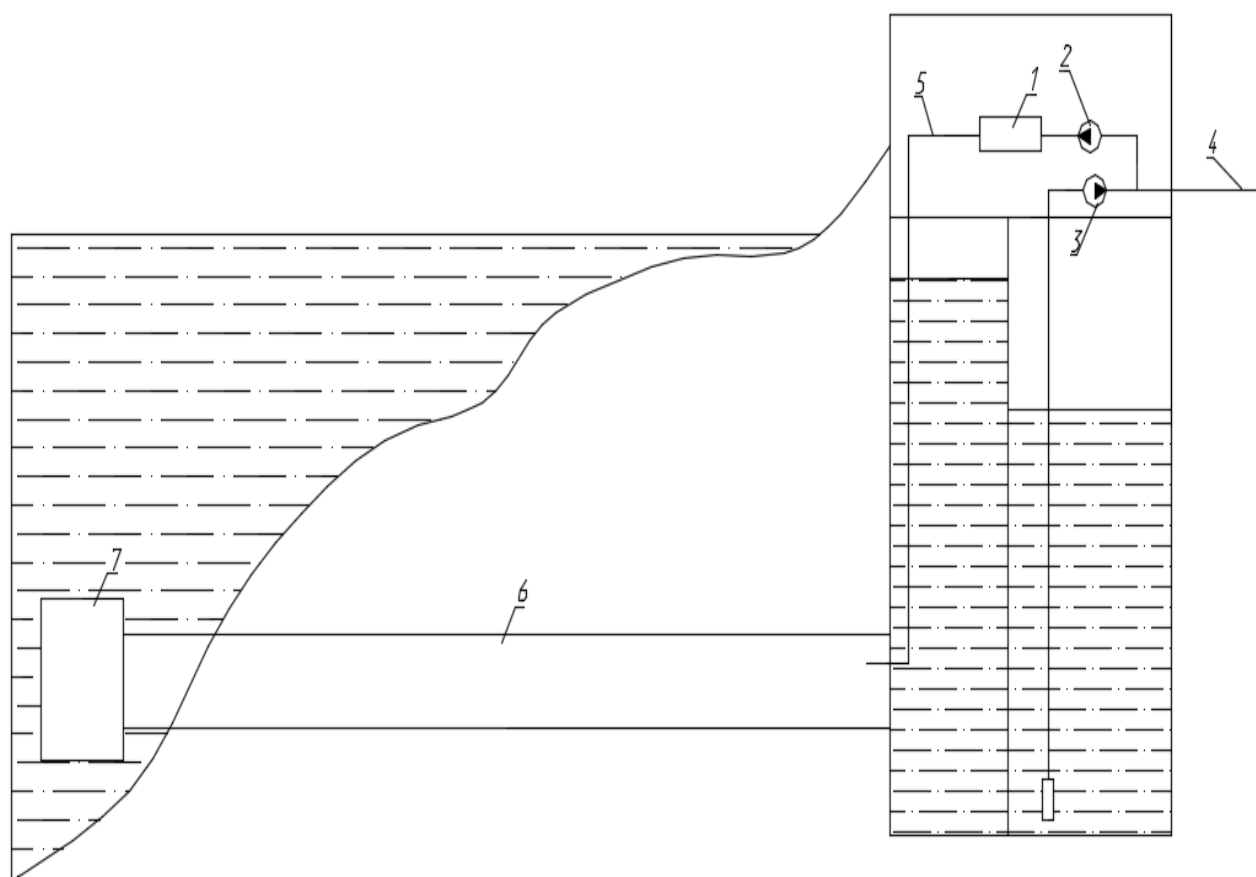
2) Циркуляция воды в отстойнике



1 – кавитатор, 2 – отстойник, 3 – циркуляционный насос

Рисунок 3.10 – Технологическая схема установки кавитатора

3) Гидродинамическая промывка на водозаборе



1 – кавитатор, 2 – промывочный насос, 3 – подающий насос,
4 – подающий водовод, 5 – промывочный трубопровод,
6 – водоприемный водовод, 7 – водоприемный оголовок (показан условно)

Рисунок 3.11 – Технологическая схема установки кавитатора

Применение ультразвукового кавитатора.

- 1) Установка кавитатора перед смесителем или отстойником после насосной станции I подъема. Схема применения аналогична см. рисунок 3.9.
- 2) Гидродинамическая промывка на водозаборе. Схема применения аналогична см. рисунок 3.11.
- 3) На станции водоподготовки оборотного водоснабжения бассейнов.

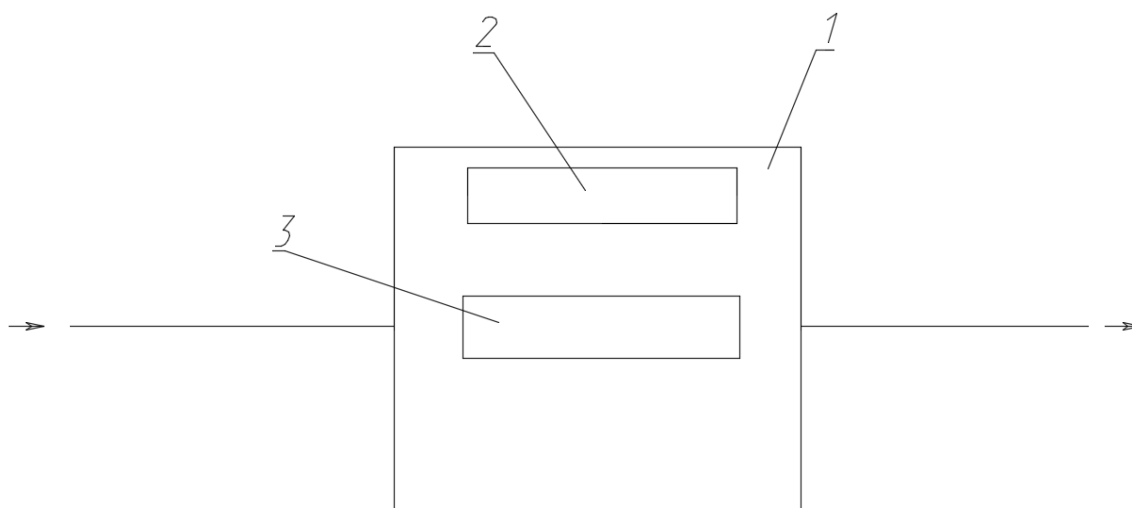


Рисунок 3.12 – Ультразвуковая обработка воды
1 – корпус блока ультразвуковой обработки воды,
2 – ультрафиолетовые лампы, 3 – ультразвуковой кавитатор.

Выводы по главе 3

1 Процессы кавитации положительно влияют, увеличивая основные электрохимические характеристики водопроводной воды: кислотно-щелочной баланс, окислительно-восстановительный потенциал, электрическую проводимость, температуру.

2 Увеличение времени предварительного отстаивания водопроводной воды приводит к более интенсивным колебаниям ОВП во время обработки и в течении последующего простаивания.

3 Применение возникающих тепловых и гидродинамических эффектов кавитации способствует механотермолизу структуры воды с появлением свободных водородных связей, диспергированию, гомогенизации, ускорению химических реакций, удалению примесей отдельных элементов.

4 В настоящее время кавитационные методы очистки используются не слишком широко, т.к. технические задачи по обеспечению необходимой производительности оборудования остаются до конца не решенными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 В результате анализа существующих типов и конструкций кавитационных установок выявлена возможная область применения гидродинамических и ультразвуковых кавитаторов.

2 Анализ возможной области применения гидродинамических и ультразвуковых кавитаторов показал основные направления их использования:

- Очистные сооружения водозаборов;
- Очистные сооружения бассейнов;
- Очистка поверхностей труб и других.

3 Предложены два варианта кавитационных установок на основе кавитаторов:

- гидродинамический;
- ультразвуковой.

4 В ходе эксперимента подтверждена возможность применения кавитационной обработки воды на водозаборных сооружениях и установках химводоподготовки.

Основные положения диссертации опубликованы в 2 статьях автора:

- 1 Писарев В.А. Кавитация в системах водоснабжения. В сборнике статей VI Международной научно-практической конференции «Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России». – Пенза, МНИЦ, 2017.
- 2 Писарев В.А. О направлениях совершенствования существующих конструкций кавитаторов. – В сборнике: Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии. – Пенза, МНИЦ, 2017.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения [текст]. Справочник/ В.Д. Дмитриев [и др.]. – Стройиздат, Ленинградское отделение, 1988, с изменениями.
- 2 Техническая эксплуатация коммунальных систем водоснабжения и водоотведения: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2 / Г.И. Воловик [и др.]. – Хабаровск. Изд-во ДВГУПС, 2008. – 220с.
- 3 Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : В 3 т.: Учеб. пособие для вузов. Т. 2: Очистка и кондиционирование природных вод / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова ; Науч.-метод. рук. и общ. ред. М.Г. Журбы. - 2-е изд., доп. и перераб. ; Гриф МО. - М. : АСВ, 2004. - 494 с. : ил. - Библиогр. : с.492-493. - Об авт. : с.494. - ISBN 5-93093-210-7 : 378-78.
- 4 Федоткин, И.М. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – К. : Вища шк., 1984. – 68 с.
- 5 Федоткин, И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Ч. II / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – Киев : ОКО, 2000. – 898 с.
- 6 Богданов, В.В. Эффективные малообъемные смесители / В.В. Богданов, Б.И. Христофоров, Б.А. Клоцунг. – Л. : Химия, 1989. – 224 с.
- 7 Витенько, Т.Н. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т.Н. Витенько, Я.М. Гумницкий // Химия и технология во- ды. – 2007. – Т. 29, № 5. – С. 422–432.
- 8 Кнэпп, Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир, 1974. – 668 с.
- 9 Балабышко, А.М. Гидромеханическое диспергирование / А.М. Балабышко, А.И. Зимин, В.П. Ружицкий. – М. : Наука, 1998. – 330 с.

- 10 Башта Т. М. «Машиностроительная гидравлика», М.: «Машиностроение», 1971.
- 11 Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. пер. с англ. М.: Мир, 1964. 466с.
- 12 Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей. М.: ГИТТЛ, 1951. 200с.
- 13 Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974. 678 с.
- 14 Акуличев В. А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М.: Наука, 1978. 280с.
- 15 Левковский Ю. Л. Структура кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1977. 222с.
- 16 Иванов А. Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1980. 237с.
- 17 Пирсол И. Кавитация / Пер. с англ. Ю. Ф. Журавлёва; Под ред., с предисл. и доп. Л. А. Эпштейна.. – М.: Мир, 1975. – 96 с. – (В мире науки и техники). (обл.)
- 18 Перник А. Д. Проблемы кавитации. 2-ое изд. Л.: Судостроение, 1966. 435 с.
- 19 Рождественский В. В. Кавитация. Л.: Судостроение, 1977. 248с.
- 20 Федоткин И. М., Гулый И. С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчёты и конструкции кавитационных аппаратов). Ч.1. – К.: Полиграфкнига, 1997. – 940 с.
- 21 М.Я. Кордон, И.А. Лушкин, Т.К. Семченко, И.А. Мельников. Аспекты оптимизации процессов очистки промстоков на основе методологии «золотых» соотношений// Экология и ресурсо- и энергоснабжающие технологии на предприятиях в строительстве, на транспорте, в с/хозяйстве. Сб. ст. XII МНПК. – Пенза.

- 22 Богус, Александр Муссович. Теоретические и практические основы новых технологий получения пектина из растительного сырья с использованием физических процессов: диссертация доктора технических наук : 05.18.01 / Кубан. гос. технол. ун-т - Краснодар, 2006 - Количество страниц: 233 с. ил. Краснодар, 2006 233 с.
- 23 Кардашев Г.А., Михайлов П.Е. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты / Г.А. Кардашев, П.Е. Михайлов. М.: «Машиностроение», 1973, 223с.
- 24 Kling C. L., Hammitt F. O. A photographic study of sparc-induced cavitation – bubbl collapse // J. Basic Engang, Trans. A.S.M.E., D94, 1972
- 25 Lauterborn W., Bolle H. Experimental investigations of cavitation – bubbl collapse in the neighbourhood of a solid boundary // J. Fluid Mech., 1975, vol. 72, p. 2.
- 26 Plesset M. S., Chapman R. B. Collapse of an Initially Spherical Vapour Cavity in the Neighbourhood of a Solid Boundary //J. Fluid Mech., 1971, vol. 47, №2.- p. 125-141.
- 27 Каратаева С.Ю., Широносков В.Г. Феномен бесконтактной активации жидкости живыми организмами// "МИС-РТ"- 2004 г. Сборник № 33-3.
- 28 Аристова Н.А., Пискарев И.М. Новый подход к задаче очистки и обеззараживания питьевой воды на основе генератора озон-гидроксильной смеси.//С.О.К.(Сантехника. Отопление. Кондиционирование.) № 9. 2005 г. С. 26-28.
- 29 Петрушанко И.Ю., Лобышев В.И. Неравновесное состояние электрохимически активированной воды и её биологическая активность.// Биофизика. - 2001. - Т. 46 - Вып. 3. - С. 389-401.
- 30 Леонов Б.И., Прилуцкий В.И., Бахир В.М. Физико-химические аспекты биологического действия электрохимически активированной воды. - М.: ВНИИИМТ, 1999. - с. 244.

- 31 Лиходумова, М.А. Инновационные технологии водоподготовки для производства слабо- и безалкогольной продукции / М.А. Лиходумова, Л.С. Прохасько, Д.А. Ярмаркин, Б.К. Асенова, Р.В. Залилов // Молодой ученый. – 2013. – № 10. – С. 159–161.
- 32 Прохасько, Л. С. Гидродинамика и расчет кавитационных смесителей непрерывного действия: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Л.С. Прохасько. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2000. – 20 с.
- 33 Прохасько Л. С. Гидродинамика и расчет кавитационных смесителей непрерывного действия: автореферат дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2000. 20 с.
- 34 Brennen, C. (1995). Cavitation and bubble dynamics. Oxford University Press, Oxford.
- 35 Wang, D., Atlar, M., Sampson, R. (2006). An experimental investigation on cavitation, noise, and slipstream characteristics of ocean stream turbine. University of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne.
- 36 Osterman, A., Dular, M., Hočevar, M., Širok, B. (2010). Infrared thermography of cavitation thermal effects in water. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, vol. 56, no. 9, p. 527-534.
- 37 Suslick, K. S., ed., Ultrasound, Its Chemical, Physical, and Biological Effects, VCH, NY, 1988.
- 38 ГОСТ 18293-72 Вода питьевая. Методы определения содержания свинца, цинка, серебра. Издание официальное. / М., 1974.
- 39 Алов, Н.В. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа. В 2-х т.: Учебник. – М.: ИЦ Академия, 2012. - 768 с.
- 40 Коренман И.М. Методы количественного химического анализа. – М.: Химия, 1989. – 128 с.
- 41 Харитонов Ю.Я. Аналитическая химия. Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2003. - 345 с.

- 42 Н.А.Спирин, В.В.Лавров. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебник для вузов / Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.
- 43 Математическая статистика: Учеб. для вузов / В.Б.Горяинов, И.В.Павлов, Г.М.Цветкова, О.И.Тескин; Под ред. В.С.Зарубина, А.П.Крищенко. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. – 424 с.
- 44 Налимов В.В, Голикова Т.И. Логические основы планирования эксперимента. – М.: Metallurgia, 1980. – 152 с.
- 45 Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. - М.: Наука, 1983. – 416 с.
- 46 Водозаборные сооружения для водоснабжения из поверхностных источников / Под ред. Михайлова К.А. и Образовского А.С.. – М.: Стройиздат, 1976. – 368 с.
- 47 Вдовин Ю.М. Водоснабжение на Севере. – Л.: Стройиздат. Л.о., 1987. – 172 с.
- 48 Порядин А.Ф. Водозаборы в системах централизованного водоснабжения. – М.: Изд. НУМЦ Госкомэкологии РФ, 1999. – 338 с.
- 49 Образовский А.С., Ереснов Н.В., Ереснов В.Н. и др. Водозаборные сооружения для водоснабжения из поверхностных источников. – М.: Стройиздат, 1976.
- 50 Вдовин Ю.И. Совершенствование технологий водоприема и водозаборных сооружений для систем водоснабжения на Севере: Дис. ...д-ра техн. наук. – М., 1996.
- 51 Ереснов В.Н. Исследования затопленных водоприемников с рыбозащитными фильтрующими устройствами: Автор. дис. ...канд. техн. наук. – М., 1979.

- 52 Мелкумов М.Д. Разработка и исследования морских водозаборов из Каспийского моря для Бакинской бухты: Автор. дис. ...канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1970.
- 53 Кузовлев Г.М. Специальные гидротехнические сооружения на атомных предприятиях. – М.: Атомиздат, 1973.
- 54 ВНИИ ВОДГЕО. Проектирование сооружений для забора поверхностных вод. Пособие к СНиП – М.: Стройиздат, 1990.
- 55 Аверкиев А.Г., Макаров И.И., Синотин В.И. Бесплотинные водозаборные сооружения. – Энергия. Л.о., 1969.
- 56 Мезенева Е.А. Совершенствование водозаборно-очистных сооружений фильтрующего типа: Автор. дис. ...канд. техн. наук. – Н.-Новгород, 1993.
- 57 Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. – М.: Госстройиздат, 1971.
- 58 Орлов Г.А., Шевелев Ф.А. Водоснабжение больших городов зарубежных стран. – М.: Стройиздат, 1987.