

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Теплотехники и гидрогазодинамики

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В.А.Кулагин
подпись инициалы, фамилия

«__» _____ 20__г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код - наименование направления

Влияние температуры исходной воды на физико-химические
процессы при кавитации

тема

Руководитель

подпись, дата

должность, ученая степень

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

инициалы, фамилия

Красноярск 2023

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа по теме «Влияние температуры исходной воды на физико-химические процессы при кавитации» содержит 55 страниц текстового документа, 50 использованных источников, 16 рисунков с пояснениями, 3 таблицы.

В данной работе было проведено экспериментальное исследование влияния температуры воды при гидродинамическом кавитационном воздействии на воду. Были обнаружены изменения физико-химических свойств воды: увеличение электропроводности и рН, уменьшение окислительно-восстановительного потенциала, кислородосодержания и поверхностного натяжения в результате обработки в кавитационном миксере. Были графически построены зависимости этих параметров от температуры для дистиллированной воды во время кавитационной обработки.

Разработка зеленых технологий, к которым относится кавитационная, это современное направление междисциплинарного подхода для эффективной и экологически безвредной реализации производственных процессов. Экспериментальное исследование зависимости температуры от других свойств воды при гидродинамическом воздействии позволит глубже понять и усовершенствовать методы очистки сточных вод, деэмульгирования нефти, подготовки водоугольного топлива, использования воды в качестве теплоносителя.

Цель бакалаврской работы: экспериментальное изучение влияния температуры на изменения физико-химических свойств воды после высокоэнергетического кавитационного воздействия.

Задачи:

1. Экспериментальное исследование характера изменения физико-химических свойств воды после кавитационного воздействия различной длительности.
2. Экспериментальное исследование зависимости физико-химических свойств воды от температуры жидкости при кавитационном воздействии.

Объект исследования: дистиллированная вода.

Содержание

РЕФЕРАТ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	7
1.1 Механизм возникновения гидродинамической кавитации	9
1.2 Процесс формирования кавитации	10
1.3 Зародыши кавитации.....	13
1.4 Окислительно-восстановительные реакции в воде при кавитации .	15
1.5 Факторы, влияющие на кавитацию	16
1.5.2 Давление.....	17
1.5.4 Свойства воды при кавитационном воздействии	21
1.6 Применение кавитации в различных областях	24
2 Экспериментальная часть исследования	28
2.1 Обзор используемого оборудования.....	28
2.2 Контрольно-измерительные приборы и оборудование	30
2.3 Регрессионный анализ экспериментальных данных	38
3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	40
3.1 Физико-химические параметры дистиллированной воды.....	40
3.2 Физико-химические параметры кавитационно активированной дистиллированной воды	42
3.3 Изменения физико-химических свойств воды при повышении температуры в процессе кавитации.....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	52

ВВЕДЕНИЕ

Ограниченность энергетических ресурсов стимулирует рост интереса и развитие зеленых технологий, при которых не используются опасные экологические химические реагенты и вред для окружающей среды минимизирован. Из-за увеличения потребления энергии и истощения ископаемых ресурсов, таких как нефть, газ и уголь, которые являются основными источниками энергии по всему миру, экономическое благосостояние многих государств находится под угрозой. Уменьшение выбросов углекислого газа и других вредных веществ в производственной деятельности — важная задача, которая должна стоять перед промышленностью. Это позволит не только снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и повысить эффективность производственных процессов и сберечь ресурсы.

Водоснабжение является одной из самых больших проблем для сельских районов, особенно там, где большая часть населения напрямую зависит от рек, озер, плотин и прудов. При нефтедобывающей деятельности неотъемлемой проблемой является отделение и очистка подтоварной воды. Спутником добываемой нефти является пластовая вода. Отделение и утилизация подтоварной воды при отстаивании извлеченной нефти являются неотъемлемым этапом технологии добычи нефтепродуктов. Традиционные технологии очистки воды включают хлорирование, коагуляцию, биологические методы, мембранные процессы, фотокатализ, адсорбцию, озонирование и т. д. При разработке этих технологий стоит ряд проблем, включая экономическую жизнеспособность, масштабируемость, производство вредных побочных продуктов и более высокие эксплуатационные расходы.

Использование кавитации в последние годы является перспективной альтернативой для очистки и обеззараживания сложных сточных вод. Явление кавитации включает зарождение, рост и схлопывание паровых полостей —

пузырьков, в реакторе во многих местах. Схлопывание пузырьков приводит к химическим и физическим эффектам, и оба они способствуют разложению загрязняющих веществ. Принцип очистки воды за счет кавитации основан на том, что внутри схлопывающихся кавитационных пузырьков возникают высокие температуры (1000 °С, по некоторым оценкам – выше) и давления до $10 * 10^3$ Па. В таких условиях кавитация сопровождается разложением воды и образованием перекиси водорода H_2O_2 , радикалов $OH\cdot$ и $H\cdot$. При этом в стоках улучшаются цветность, мутность воды, рН смещается в щелочную сторону, уменьшается окислительно-восстановительный потенциал, удельная электропроводность, снижается концентрация растворенного кислорода, происходит обеззараживание, в том числе уничтожаются споры грибков и бактерий. Окислительно-восстановительные радикалы, которые образуются в процессе кавитации, могут использоваться для разложения органических загрязнителей в водной среде. При этом горячая межфазная зона кавитационных пузырьков может играть основную роль в химических реакциях окисления загрязняющих веществ, особенно органических.

Таким образом, исследование изменения температуры в процессе кавитации в контексте изменения рН, окислительно-восстановительного потенциала и кислородосодержания может дать более глубокое понимание кавитационных изменений. Такое фундаментальное понимание может иметь решающее значение для разработки практических применений кавитации, которые еще не полностью изучены.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В 1885 году Рейнольдс и Парсонс изучили испытания британского военного корабля и обнаружили явление кавитации, которое характеризуется образованием, ростом и схлопыванием пузырьков. Они посчитали, что повреждение лопасти винта произошло в результате взрыва пузырьков водяного пара, который они назвали "кавитацией". Этот процесс характеризуется формированием, ростом и разрушением пузырьков. В случае с военным кораблем, разрушение кавитационных пузырей сопровождалось большим количеством энергии, что привело к деформации и повреждению лопастей винта, а также к различным другим повреждениям в окружающей среде, таким как повреждения сонаров или другого оборудования на корабле. [1]. Джон Уильям заложил теоретическую основу для исследования кавитации после чего были проведены обширные исследования, направленные на понимание образования кавитации и поведения кавитационного пузырька. В основном они были сосредоточены на том, как избежать кавитации из-за ее пагубных последствий. Однако, дальнейшее понимание кавитационных явлений побудило исследователей изучить возможные подходы к использованию выделяемой ими энергии. В настоящее время кавитационные явления применяются во многих промышленных процессах, включая очистку сточных вод, производство пищевых продуктов и напитков, а также их применение в биомедицинских целях.

Используемая методология для создания кавитации обычно определяет ее тип. Существуют четыре основных типа кавитации: гидродинамическая, акустическая, оптическая и кавитация частиц. Последние два типа были открыты недавно и пока активно изучаются в рамках фундаментальных исследований. Акустическая и гидродинамическая кавитация были широко использованы как в науке, так и в промышленности из-за простоты эксплуатации и создания требуемой интенсивности для условий кавитации. Акустическая кавитация впервые была изучена в связи с инцидентами с

подводным звуковым проектором в 1920-х годах [3]. Ультразвук с частотой от 20 кГц до 1 МГц распространяется через жидкую среду, создавая механическую вибрацию и отрицательное локальное давление, что приводит к акустической кавитации. Химические эффекты акустической кавитации были быстро признаны химиками. Однако короткая длина волны ультразвука ограничивает дальность его передачи и затрудняет его применение в крупномасштабных коммерческих операциях.

Гидродинамическая кавитация возникает за счет колебаний давления, которые происходят при изменении скорости потока жидкой среды. Для достижения этого могут использоваться два метода: прохождение жидкости через сужение в системе, например, отверстия или трубки Вентури, или вращение объекта внутри жидкости. Гидродинамические кавитационные пузырьки ведут себя подобно акустическим кавитационным пузырькам [2]. Из численных методов было установлено, что интенсивность звуковых волн, вызываемых акустической кавитацией, аналогична давлению восстановления, вызываемому гидродинамической кавитацией [4]. Однако акустическая кавитация может генерировать высокоинтенсивный коллапс полости, тогда как гидродинамическая кавитация может создавать множество полостей с относительно низкой интенсивностью. Гидродинамическая кавитация имеет несколько преимуществ перед акустической кавитацией, включая простое масштабирование, низкие капитальные затраты и высокую эффективность. В настоящее время гидродинамическая кавитация широко применяется в различных коммерческих условиях для интенсификации процессов. Начиная с момента открытия, наблюдается стремительный рост исследований в области гидродинамической кавитации, которые можно классифицировать на пять основных категорий: теоретические и экспериментальные исследования, использование и производство биомассы, очистка сточных вод, интенсификация процессов и оптимизация реакций, медицина и нанотехнологии.

1.1 Механизм возникновения гидродинамической кавитации

Кавитационные пузырьки или полости, обычно появляются, когда давление в месте потока жидкости снижается ниже давления паров жидкости. Применение принципа Бернулли позволяет достичь снижения давления в потоковой системе. Изменения в скорости жидкости и давлении в поле потока описываются уравнением (1). Для увеличения скорости потока жидкости часто используется сужение, что приводит к снижению давления в месте сужения. Такие устройства, как трубки Вентури и распылительные форсунки, являются типичными примерами сужающих устройств.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2, \quad (1)$$

где ρ - плотность жидкости, p_1 и p_2 обозначают давления в двух точках (чаще всего вверх по течению и вниз по течению соответственно) в проточной системе, а v_1 и v_2 - скорости жидкости в этих точках. Это показано на Рисунке 1. Скорость жидкости в трубке увеличивается благодаря давлению. В области сужения системы жидкость достигает максимальной скорости (v_2), где давление (p_2) снижается до минимального значения.

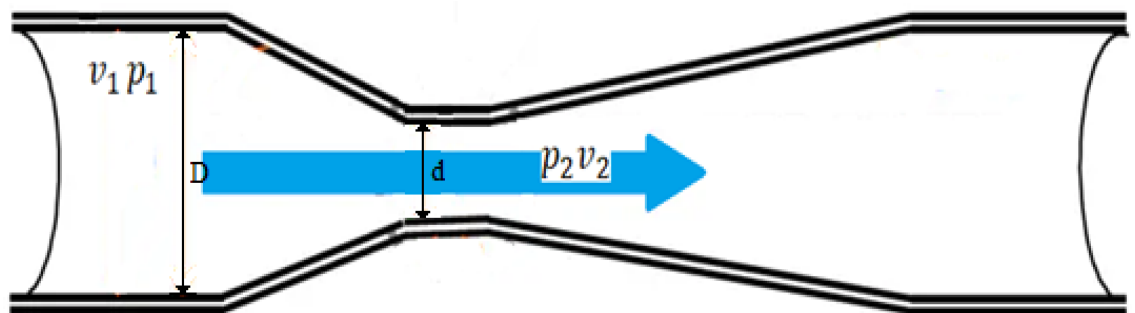


Рисунок 1 – Трубка Вентури

Пузырьки пара образуются, когда локальное давление опускается ниже давления пара жидкости при заданной температуре [5]. Если давление в точке p_2 становится ниже, чем давление паров жидкости, то могут возникнуть паровые пузырьки. При внезапном восстановлении давления в точке,

находящейся ниже по течению от сужения, происходит схлопывание пузырьков, при котором высвобождается значительное количество энергии [1]. Чем ниже давление в системе, тем сильнее проявляется явление кавитации, а значит, тем более интенсивно высвобождается энергия. Очень важно учитывать возможность возникновения кавитации, поскольку она играет важную роль в объяснении физики процесса, а также помогает изучать закономерности течения в процессе гидродинамической кавитации и проектировать кавитационные устройства.

1.2 Процесс формирования кавитации

Кавитация определяется началом кавитации. Начало кавитации является важным параметром для прогнозирования гидродинамики потока жидкости, так как позволяет предотвратить образование кавитации или эффективно использовать ее. Однако это сложный процесс, который зависит от многих факторов, включая зародыши кавитации, скорость и физические свойства жидкости, а также давление в системе. Несмотря на обширные исследования в этой области, зарождение кавитации все еще не полностью понятно. В работе Тома [6] 1961 г. был предложен индекс кавитации (σ) для описания этого явления.

$$\sigma = \frac{p_s - p_v}{\Delta p}, \quad (2)$$

где p_s означает давление, создаваемое в системе всасывания насоса, а p_v - давление пара жидкости при ее конкретной температуре. Δp , в свою очередь, отражает разницу в давлении между точками всасывания и нагнетания насоса, и вычисляется для точки, где достигается наилучший КПД насоса.

Первоначально этот параметр был предложен для использования с насосами, однако имел недостаток, который заключался в том, что параметры могут изменяться от насоса к насосу. В работе Плессет [7], исследовавшего поток открытой жидкости, протекающий над погруженным объектом,

предложен параметр кавитации K , если значение параметра K невелико, можно установить схему кавитационного потока.

$$K = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v_0^2}, \quad (3)$$

где p_0 обозначает статическое давление, а v_0 - равномерную скорость потока на расстоянии от тела.

В современной литературе известный как "число кавитации" этот параметр кавитации является важным при описании кавитационного потока. Каждый поток в системе открытой воды имеет свое число кавитации, и увеличение скорости жидкости приводит к уменьшению этого числа. Начало кавитации характеризуется кавитационным облаком. Уравнение показывает зависимость числа кавитации от значений статического давления и скорости потока. Это безразмерное число также применяется в замкнутых системах, таких как отверстия и трубки Вентури, где необходимо указывать давление и скорость жидкости. Значение числа кавитации связано с вероятностью возникновения кавитации. Более низкое значение числа кавитации увеличивает вероятность возникновения кавитации или увеличивает ее величину [8]. Багал и Гогейт [9] заявляли, что кавитация возникает при числе кавитации, равном примерно 1, и что наилучшие характеристики кавитации достигаются при числе кавитации в диапазоне от 0,1 до 1,0.

Кавитации является сложным процессом, который связан с многими характеристиками, главными среди которых являются кавитационные зародыши. Зародыши кавитации можно рассматривать как участки в жидкости, где смесь пара и неконденсирующихся газов находятся в состоянии более высокого потенциального энергетического уровня. Эти участки являются слабыми местами жидкости, которая может потерять прочность на растяжение и стать более подверженной кавитации. Динамика развития пузырьков также является сложным явлением, которое связано с многими факторами, такими как поверхностное натяжение, вязкость и содержание неконденсирующихся газов в жидкости.

Выяснено, что число кавитации не может полностью объяснить все сложности возникновения кавитации, поскольку это явление сильно зависит от других физических свойств. Шарк и др. [10] отмечали, что на начало кавитации могут влиять различные факторы, такие как геометрия узкого сечения, температура среды, а также плотность и размеры зародышей кавитации. Ян и Торп [11] делали аналогичные выводы, отмечая, что число кавитации тесно связано с геометрией сужения. Они также утверждали, что начальное число кавитации колеблется от 1,7 до 2,4 при отношении диаметра отверстия к диаметру трубы в диапазоне от 0,4 до 0,8. Чионколини и другие авторы [12] предположили, что микроотверстия обычно имеют меньшее число кавитационных пузырьков в начальной стадии, что обусловлено их меньшим размером и поверхностным напряжением. Следовательно, для более полного понимания происхождения кавитации необходимо учитывать несколько факторов, в том числе геометрию среды и свойства зародышей кавитации.

До сегодняшнего дня точное предсказание начала кавитации остается сложной задачей. Современное понимание возникновения кавитации в значительной степени основано на экспериментальных наблюдениях.

Уравнение (3) было первоначально для измерения кавитационного числа на основе экспериментов, проведенных в открытых системах с использованием воды. Это число описывает кавитационный поток, который обычно наблюдается в открытых системах, вроде подводных судов. Этот безразмерный параметр также широко используется для определения кавитации в закрытых системах, включая трубку Вентури и отверстия, где уменьшение давления потока может быть ожидаемым. Однако, стало известно, что при применении уравнения (3) к закрытым системам возникают некоторые проблемы. Это связано с тем, что число кавитации зависит от множества факторов, таких как условия эксплуатации, дизайн и т. д. Кроме того, в разных местах системы могут иметься различные давления и скорости, связанные с сужением в трубке Вентури или диафрагмы, что еще больше усложняет определение точного значения числа кавитации. В результате, в

литературе зафиксированы различные подходы к измерению числа кавитации, некоторые из которых включают использование давления и скорости ниже по потоку или на входе в систему, а другие - на основе параметров на сужении в трубке Вентури или диафрагмы. Дальнейшие исследования в этой области представляют большой интерес в связи с широким применением закрытых систем, в том числе в реакторных установках. Теоретическое осмысление процессов, связанных с кавитацией в закрытых системах, может помочь в определении наиболее эффективных стратегий по избежанию нежелательных явлений, связанных с кавитацией в сложных технических системах.

1.3 Зародыши кавитации

Кавитационные зародыши, такие как пузырьки газа и твердые частицы, являются источником образования кавитации, а следовательно, и испарения жидкости. Зарождение кавитации происходит путем накопления молекул газа с образованием пузырьков микронного размера. В чистой жидкости, где отсутствуют готовые зародыши кавитации, процесс зарождения может происходить только через разделение молекул жидкости. Этот процесс называется гомогенным зародышеобразованием. Например, в чистой деионизированной воде при 20°C не может начинаться кавитация, пока не достигнет локальное значение прочности на растяжение, равное -60 Мпа [13]. Однако, кавитация часто возникает в морской воде и в водопроводной воде, где присутствуют пузырьки газа. Обычно, предел прочности на растяжение для таких вод значительно ниже - около 1 бар (0,1 МПа) [14]. Это соответственно указывает на то, что кавитационные зародыши играют ключевую роль в образовании кавитации.

Когда в жидкости имеются неоднородности, которые могут служить кавитационными зародышами, происходит гетерогенное зародышеобразование. На практике гетерогенное зарождение, вероятно, является доминирующим механизмом образования кавитации. В литературе

существуют два типа кавитационных зародышем: зародыши со свободным потоком, которые свободно движутся в жидкости; и поверхностные пузырьки, которые прикреплены к поверхности или стенке [15]. Поверхностные зародыши, также известные как зародыши Харви, могут образовываться только если выполняются два критерия:

- Поверхность, к которой прикреплены зародыши, должна быть гидрофобной. Зародыши, на гидрофильных поверхностях, если они не покрыты органической оболочкой, нестабильны.

- Должны существовать конические зазоры, которые служат активным центром для образования газов.

Конические зазоры могут являться активным центром для образования кавитационных газов. В таких зазорах происходит ускорение потока жидкости и формирование зоны низкого давления, что может привести к образованию и дальнейшему росту кавитационных пузырьков. Это связано с тем, что при достаточном давлении, вызванном гидродинамической инерцией, пузырьки могут расти и деформироваться, создавая колебания в потоке.

Зародыши Харви часто образуются в пористых частицах и прикрепляются к острым краям частиц, когда они находятся в жидкости. При падении давления ниже порогового значения происходит быстрый рост поверхностных зародышей. Говорят, что начало кавитации в основном связано со свободным потоком зародышей, а поверхностные зародыши играют второстепенную роль.

Зародыши свободного потока — это неконденсирующиеся пузырьки газа, которые захвачены жидкостью. Из-за градиента концентрации газообразных компонентов в жидкости ожидается, что масса будет диффундировать с поверхности пузырька в жидкость вокруг него. Сочетание давления в дальней зоне и давления Лапласа, которое определяется давлением газа и пара внутри пузырька, определяет устойчивость равновесия газового пузырька в жидкости. Это равновесие является квазистатическим и

ограничено условиями, которые поддерживают давление газа и пара внутри пузырька.

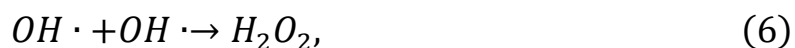
$$p_c - p_v = \frac{-2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\left(\frac{4S}{d}\right)^3}{p_\infty - p_v + \frac{4S}{d}}}, \quad (4)$$

где S - поверхностное натяжение, d - диаметр пузырька, p_c - критическое давление, зависящее от размера и p_∞ - давление окружающей среды. Пузырьки газа становятся нестабильными, когда давление падает ниже критического давления p_c . Однако микропузырьки могут оставаться стабильными благодаря диффузии газа.

Исследователи Шах [3] и Хеммингсен [16] утверждали, что увеличение растворимости газа способствует увеличению количества кавитационных зародышей и снижает порог кавитации. Веннинг и др. [17] также подтвердили этот факт, используя измеритель восприимчивости к кавитации. Исследователи установили, что количество пузырьковых зародышей в системе воздух-вода заметно увеличивалось с концентрацией растворенного газа, когда вода была перенасыщена. Это говорит о том, что газовая диффузия играет важную роль в динамике популяции микропузырьков. Однако эффект газонасыщения становится менее значимым, когда растворимость газа становится очень высокой.

1.4 Окислительно-восстановительные реакции в воде при кавитации

В процессе коллапса пузырька могут возникнуть экстремально высокие температура и давление. Из-за диссоциации молекул воды в процессе кавитации образуются свободные радикалы, такие как $OH \cdot$ и $H \cdot$ которые смешиваются с объемной жидкостью. Эти радикалы могут вызывать различные химические реакции или изменять механизм реакции. Ниже приведены уравнения химических реакций, участвующие в этом процессе. (5), (6)



В последние десятилетия возрос интерес к созданию математических моделей, которые могут использоваться для моделирования кавитационных явлений и предсказания образования свободных радикалов, а также факторов, которые на это влияют.

1.5 Факторы, влияющие на кавитацию

1.5.1 Температура

В различных ситуациях, таких как химические реакции, впрыск горячих жидкостей и криогенная кавитация (кавитационные пузырьки в жидкостях, которые имеют очень низкую температуру, близкую к температуре криогенных сред $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ или ниже), температура жидкости играет ключевую роль в формировании кавитационных событий и каверн. При повышении температуры жидкости при том же давлении окружающей среды, ее склонность к кавитации увеличивается из-за испарения жидкости. Однако, повышение температуры также снижает кавитационные явления из-за уменьшения давления пара в пузырьках газа. Скрытая теплота испарения жидкости приводит к понижению температуры около пузырьков и, следовательно, уменьшает давление пара внутри них. Обычно, при повышении температуры, растворимость газа в жидкой среде снижается, что уменьшает количество кавитационных ядер, являющихся основным фактором инициирования кавитации. Это приводит к более высокому порогу инициации кавитации. В прошлом были проведены исследования влияния температуры на кавитацию и было установлено, что повышение температуры увеличивает количество кавитации, но одновременно замедляет и снижает интенсивность кавитации [18]. Недавние исследования подтверждают отрицательное воздействие теплового воздействия на зародыши кавитации. Некоторые

исследователи заметили, что при понижении температуры воды, которая химически раскисляется и ослабевает при повышении температуры, интенсивность кавитации возрастает, тогда как другие утверждают, что тепловые эффекты обратно пропорциональны интенсивности кавитации из-за ухудшения характеристик деградации с температурой. Концентрация газа также влияет на вероятность кавитации, и, как известно, растворимость газов, таких как кислород и азот, снижается при повышении температуры, что вызывает меньшую вероятность кавитации. Исследователи заметили, что температура оказывает смешанное воздействие на кавитацию: при повышении температуры в диапазоне 293-333 К количество кавитации увеличивается, но за пределами этого диапазона дальнейшее повышение температуры до 348 К приводит к снижению числа кавитации, вызывая начало кавитации [19].

1.5.2 Давление

Давление на входе жидкости также является важным фактором в иницировании кавитации. Для начала процесса кавитации должно быть достаточное давление, чтобы преодолеть поверхностное натяжение жидкости и создать зародыш кавитационного пузырька. Это давление называется пороговым давлением (минимальное давление). Если давление на входе жидкости меньше порогового давления, то кавитация не начнется, даже если область в системе подвержена высоким напряжениям. Несмотря на простоту измерения, влияние давления на входе на кавитацию не привлекало достаточного внимания до последних двух десятилетий. Согласно исследованиям Соыма [20], которые проводились на основе использования трубки Вентури с водой в качестве жидкой среды, давление вверх и вниз по потоку оказывает влияние на интенсивность кавитации. С увеличением давления вверх по потоку область кавитации прогрессивно увеличивалась, когда давление вниз по потоку поддерживалось постоянным (как показано на Рисунок 2 [20]). В случае, когда давление на входе было постоянным,

появлялась кавитация, и интенсивность быстро увеличивалась с уменьшением давления на выходе.

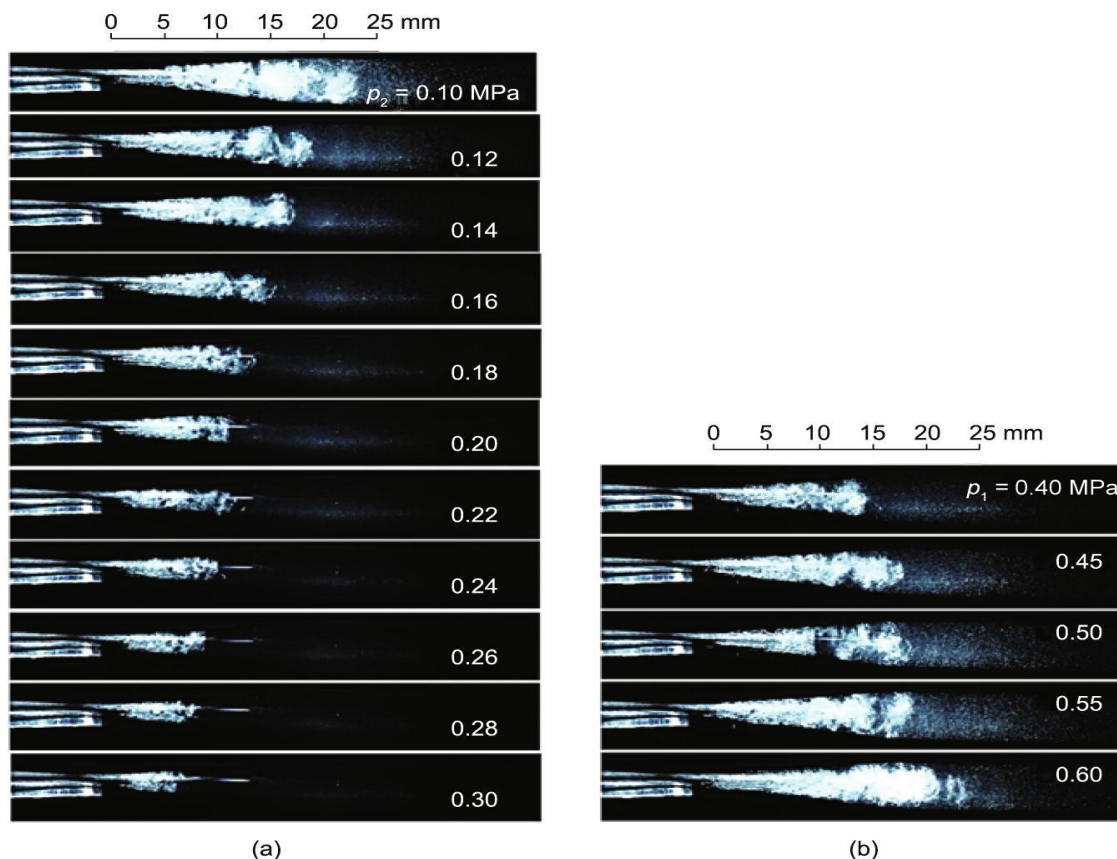


Рисунок 2 - Влияние давления на интенсивность кавитации

Кавитация может варьироваться в зависимости от значений давления на входе и выходе. В случае, если давление на выходе равно p_2 (а входное давление p_1 составляет 0,6 МПа), изменения могут быть связаны с различными аспектами. Точно также, при давлении на входе p_1 (при соответствующем выходном давлении $p_2 = 0,1$ МПа), могут наблюдаться изменения в работе системы, связанные с разными параметрами [20].

Джоши и Гогейт [21] обнаружили, что повышение давления на входе приводит к более быстрому появлению гидродинамической кавитации. Результаты их исследования показали, что увеличение давления на входе приводит к увеличению давления на выходе и скорости восстановления давления. Кумар и Пандит [22] сообщили о сильном турбулентном нисходящем потоке и сильном коллапсе полости при повышенном давлении

на входе, что объясняется большим перепадом давления в отверстии, вызванным высоким давлением на входе. Изучая регулирующий клапан, Люй и др. [23] обнаружили, что зона кавитации и ее интенсивность увеличиваются при повышении давления на входе. Усиленные кавитационные эффекты при более высоком давлении на входе были также исследованы с помощью численного моделирования [24]. Если давление на входе меняется синусоидальному закону, процесс кавитации и структура потока также будут колебаться. Амплитуда и частота колебаний оказывают большое влияние на кавитацию. Существует оптимальная частота, которая способствует подавлению кавитации. Эта оптимальная частота зависит от многих факторов, таких как параметры жидкости, параметры системы, скорость движения жидкости, частота колебаний давления и другие. Обычно оптимальная частота находится путем проведения опытов с изменением различных параметров в системе и оценкой эффекта на интенсивность кавитации. Как правило, для конкретной системы можно найти оптимальную частоту, при которой кавитация будет подавлена, а работа системы будет наивысшей. Однако повышенное давление в системе может оказать негативное влияние на генерацию и интенсивность кавитации, поскольку давление на входе соответствует давлению в системе.

1.5.3 Характеристики жидкой среды, связанные с ее физическими свойствами

Физические свойства жидкости включают летучесть (свойство жидкости быстро испаряться при комнатной температуре и атмосферном давлении) и вязкость, хотя были получены некоторые противоречивые отчеты относительно влияния летучести на жидкую среду. Однако, Ташдемир и др. [25] отметили, что с помощью высокочастотной обработки соединений, которая происходит при помощи ультразвука высокой интенсивности летучие растворители могут быть удалены из сточных вод (98,4%) даже при

отсутствии аэрации. Испарившийся пар, как правило, действует как зародыш для усиления кавитации [26]. Если жидкость легко испаряется, могут возникнуть сложности с предотвращением испарения пара из жидкой фазы, что может привести к уменьшению количества полостей в жидкой фазе. Это, в свою очередь, может привести к снижению скорости кавитации или полному ее прекращению [27]. Бубчук и др. [28] провели исследование эрозии металла, вызванной кавитацией, и пришли к выводу, что кавитация может быть вызвана только при определенном давлении паров жидкости в диапазоне от 35 до 80 мм рт.ст. (4,66–10,66 кПа) для таких жидкостей, как вода и этанол. Это открытие указывает на наличие оптимального давления пара и, следовательно, оптимальной летучести жидкости для стимуляции кавитации.

Вязкость жидкости может оказывать влияние на инициацию и уничтожение кавитационных пузырьков. Обычно, вязкие жидкости, такие как масла или полимерные мономеры (используются для синтеза полимеров, служащие основой для соединения молекул в полимерные цепи), способны создавать более стабильные кавитационные пузырьки и увеличивать время их жизни, чем менее вязкие жидкости. Это происходит потому, что пузырьки в вязкой жидкости имеют тенденцию медленнее расширяться и лопаться из-за большего внутреннего сопротивления жидкости. Почти все связанные работы были проведены только на теоретическом уровне [29]. Данные результаты говорят о том, что жидкость нуждается в преодолении собственных внутренних сил, чтобы формировать полости, и что при увеличении таких сил возникает необходимость в большей энергии для иницирования кавитации. Экспериментальные наблюдения подтверждают это предположение [30]. Более вязкая жидкость вынуждена затратить больше энергии на захват пузырьков воздуха в качестве ядер, и поэтому жидкости с высокой вязкостью оказывают тенденцию замедлять эволюцию кавитационных пузырьков. Воздействие вязкости жидкости на кавитацию не такое значительное, как воздействие давления и температуры. Арндт [31] утверждает, что изменение давления коллапса полости незначительно при увеличении вязкости. Позже

Назари-Махру и др. [32] подтвердили, что объемная вязкость оказывает незначительное влияние на динамику кавитации, опираясь на исследование одного кавитационного пузырька. Однако взаимосвязь между вязкостью и интенсивностью кавитации до сих пор не до конца понятна из-за нехватки экспериментальных исследований.

1.5.4 Свойства воды при кавитационном воздействии

Поверхностное натяжение — это явление, которое происходит из-за различия силы взаимодействия молекул вещества на его поверхности и внутри него. Это объясняет поведение жидкостей на поверхности - они сокращают свою поверхность до минимальной возможной и принимают форму, максимально близкую к сферической, чтобы уменьшить свою поверхностную энергию.

Смачивание — это способность жидкости проникать в пористых материалах и находиться на их поверхности. Смачивание зависит от химического состава материала и его структуры, а также от свойств жидкости, в том числе ее поверхностного натяжения. Растекание — это способность жидкости распространяться по поверхности материала, образуя плоские или выпуклые пленки. Растекание также зависит от химического состава материала, его структуры и свойств жидкости.

Условия смачивания поверхности твердого тела жидкостью играют важную роль в различных процессах проникновения жидкости в пористые материалы, такие как грунты, почвы и другие пористые тела. Смачивание зависит от свойств и структуры поверхности твердого тела, химического состава и свойств жидкости, включая ее поверхностное натяжение.

Смачивание также важно в процессах флотации, которые используются для обогащения полезных ископаемых, таких как медь, золото и другие металлы.

Поверхностное натяжение — это важное свойство пластовой воды, которое регулирует возможность вымывающих процессов. Если поверхностное натяжение воды низкое, то она может легко проникать в породу месторождения и вымывать из нее нефть и газ. Это может быть полезным при разработке месторождений, так как позволяет улучшить процесс добычи. Однако при высоком поверхностном натяжении воды вымывательные процессы будут меньше эффективными и станут более трудоемкими.

Химический состав воды также важен для ее вымывающей способности. Например, наличие определенных солей или других химических соединений может уменьшить способность воды вымывать породу и выбрасывать из нее продукты нефтедобычи. Обычно для улучшения вымывающей способности воды используют специальные химические добавки, которые снижают поверхностное натяжение воды и облегчают процесс добычи нефти и газа.

Поверхностное натяжение и смачивание являются основой капиллярности, которая является важным физическим свойством воды и водных растворов. Капиллярность описывает способность жидкости подниматься по тонким трубкам, называемым капиллярами, и заполнять микроскопические поры. Это явление имеет огромное значение в природе, где капиллярность влияет на рост и развитие растений, процессы питания и дыхания животных, а также на формирование структуры минералов и почв.

В микроканалах и порах породы и минералов земной коры, вода может образовывать особую структуру, в которой молекулы воды сильно связаны между собой и с поверхностью пор или минералов. Эти связи между молекулами воды и с поверхностью пор и минералов называются ван-дер-ваальсовыми силами.

Из-за этих связей вода в микропорах породы обладает большей вязкостью и уплотняется в полтора раза по сравнению с обычной водой. Кроме того, такая вода может иметь особые физические свойства, например, измененную теплопроводность и теплоемкость.

Поверхностное натяжение — это свойство жидкости, которое зависит от многих факторов, таких как ее природа, давление и температура [43, 44]. У воды коэффициент поверхностного натяжения на воздухе находится в диапазоне от 72,86 мН/м до 75,62 мН/м в зависимости от температуры. Для сравнения, коэффициент поверхностного натяжения у ртути при комнатной температуре на воздухе равен 486,5 мН/м.

Разные внешние факторы влияют на свойства поверхности воды, особенно ее натяжение. Намагничивание, электрические разряды и СВЧ-излучение могут изменять молекулярную структуру воды и, следовательно, ее поверхностное натяжение. Насыщение воздухом и озоном также могут влиять на химические свойства воды и ее поверхностное натяжение. Обогащение металлическими ионами, вероятно, тоже может влиять на эти свойства, хотя это зависит от конкретных ионов и их концентрации

Эти воздействия могут приводить к изменению (уменьшению или увеличению) поверхностного натяжения воды, причем уменьшение коэффициента существенно зависит от рода и степени воздействия. Поверхностное натяжение зависит от природы жидкости и граничащей с ней фазы, от величины давления и температуры [33 - 37].

Кавитация может оказывать влияние на поверхностное натяжение, намагничивание, электрические разряды и СВЧ излучение. Например, во время кавитации могут происходить механические и термические эффекты, которые могут изменять свойства жидкости, в том числе ее поверхностное натяжение.

Также кавитация может намагничивать материалы, особенно если внутри кавитационного колебания содержатся металлические частицы. При этом могут образовываться электрические разряды и СВЧ излучение, которые могут оказывать дополнительное влияние на среду.

1.6 Применение кавитации в различных областях

Из-за истощения энергетических ресурсов экономическая устойчивость мира находится под угрозой. Резкий рост населения и индустриализация приводят к постоянному и интенсивному использованию энергии, основными источниками которой являются нефть, уголь и газ [38]. Нефть, например, является ведущим природным ресурсом, который поставляет топливо для транспортной и химической промышленности. Она разделяется на легкую и тяжелую сырую нефть, которые необходимы для удовлетворения растущего спроса на топливо в обществе и промышленности [39].

Нефтеперерабатывающие заводы ставят перед собой задачу использования эффективных методов для преобразования тяжелой нефти в более легкие и ценные продукты [40, 41]. В настоящее время существует несколько традиционных методов, таких как отторжение углерода – метод для очистки металлов от примесей углерода. Он используется для производства высококачественных сталей, которые должны иметь очень низкий уровень углерода. Процесс отторжения углерода основан на физическом принципе, который называется диффузией. Процессы добавления водорода и процессы разделения использования гидроочистки, который включает в себя добавление водорода и термическую обработку, для очистки тяжелой нефти. Однако эти методы обычно применяются для атмосферных остатков и требуют хорошего качества сырья, большого количества катализатора и работоспособности установки. Сбросы SO_x на фоне переработки топлива являются серьезной экологической проблемой в последние годы [42]. Поэтому наиболее важной задачей является достижение минимального содержания серы в топливе (бензин и дизельное топливо) путем использования глубокой десульфурации.

Использование кавитации может быть отличной альтернативой для решения ряда задач в различных областях, таких как производство.

На данный момент большинство научных работ, посвященных кавитационному явлению, изучают процессы, происходящие в водной фазе.

Существующие методы, основанные на кавитации, используются для очистки сточных вод и хорошо исследованы, однако есть много аспектов, требующих более глубокого изучения. Например, анализ преимуществ и применений явления кавитации в органической фазе все еще недостаточно развит.

Гидродинамическая кавитация, является эффективной технологией благодаря ряду своих преимуществ. Перечислим некоторые из них:

1. Высокая эффективность процесса. Гидродинамическая кавитация может обеспечивать высокую степень разложения и дезинтеграции реагирующих веществ, что приводит к ускорению реакций и экономии времени и сырья.

2. Отсутствие использования нагревательных элементов. В отличие от традиционных методов, гидродинамическая кавитация использует ультразвуковые волны, чтобы создать кавитационные ямы и облака, не требуя при этом применения нагревательных элементов. Это снижает затраты на энергию и вредность для окружающей среды.

3. Низкая стоимость оборудования. Для проведения гидродинамической кавитации требуется относительно небольшое и простое оборудование, которое может быть легко интегрировано в существующие технологические процессы.

Данные технологии успешно применяется в различных отраслях промышленности, включая нефтепереработку, промышленную очистку воды, производство биодизеля, модернизацию нефти, газожидкостное смешивание и обогащение углеводородов.

Кавитация может быть использована для очистки и обработки подтоварной воды на месторождениях севера. Это возможно благодаря тому, что кавитация способна создавать значительные разности давления и температур в жидкости, что приводит к возникновению различных физико-химических процессов, таких как химические реакции, дезинфекция и облегчение отделения микрочастиц и нефтепродуктов.

В процессе очистки подтоварной воды на месторождениях севера с помощью кавитации, создается зона высокой интенсивности колебаний, где жидкость подвергается разрушительному воздействию вибраций. Это приводит к формированию кавитационных ямок и обломков, которые действуют как микроскопические пузырьки водорода, оказывая омывающий эффект на поверхности загрязнений.

Кроме того, кавитация может быть использована для обработки подтоварной воды путем воздействия на жидкость ультразвуком. Эти ультразвуковые колебания могут улучшить разделение фаз, облегчить отделение жидкости от твердых частиц и облегчить процесс фильтрации. Это позволяет повысить эффективность использования подтоварной воды на месторождении севера, улучшить ее качество и снизить расходы на очистку.

Более того, использование кавитации при обработке подтоварной воды на месторождении севера может снизить количество используемых химических реагентов, которые могут быть широко используемы при других методах обработки. Это в свою очередь позволяет уменьшить вредное влияние на окружающую среду и обеспечить более экологически чистое использование ресурсов.

Кавитация - технология, которая превосходит традиционные методы. Коллапс кавитационных пузырьков — это процесс, при котором кавитационные пузырьки лопаются, вызывая интенсивное воздействие на жидкость и среду, в которой они находятся. В результате коллапса кавитационных пузырьков происходят одновременно механические, термические и химические процессы. Эта технология с успехом применяется в производстве биотоплива, окислительных процессах, биологической экстракции, разложении загрязнителей и дезинфекции микроорганизмов. Кавитация была изучена в АОП (Advanced Oxidation Processes) это группа технологий, которые используют химические процессы окисления для устранения загрязнений в воде и воздухе. Без применения химических веществ можно удалять органические загрязнители в воде и сточных водах в виде

минеральных конечных продуктов и углекислого газа. Кавитационная технология используется для очистки потоков воды и сточных вод как более безопасная и экологически чистая альтернатива традиционным химическим методам. С помощью кавитации можно удалить загрязнители, такие как органические вещества, жировые отложения и более крупные частицы, без использования химикатов.

2 Экспериментальная часть исследования

2.1 Обзор используемого оборудования

В гидродинамических процессах наблюдаются сложные трехмерные волны расширения и сжатия, обусловленные динамикой коллапса кавитационных микропузырьков. Важно также учитывать быстроменяющиеся поля высоких давлений и температур, а также турбулентные микротоки, вызывающие микроперемешивание среды. Понимание динамики воздействия кавитационных микропузырьков и их влияния на окружающую среду является важным для промышленных процессов. При этом, необходимы дополнительные и более глубокие исследования для расширения областей применения кавитационной технологии и уточнения исходных данных для проектирования механизмов суперкавитации и математических моделей воздействия кавитации на жидкие системы. В процессе кавитации температура может значительно изменяться. Это происходит из-за того, что при коллапсе кавитационных пузырьков происходит очень быстрое сжатие жидкости, что приводит к ее нагреву. Таким образом, внутри кавитационных пузырьков может быть достигнута температура в несколько тысяч градусов Цельсия. Когда пузырьки лопаются, происходит очень быстрое охлаждение, так как окружающая жидкость быстро заполняет образовавшуюся пустоту. Изменение температуры в процессе кавитации повлияет на многие физические и химические свойства жидкостей. Изменение температуры в процессе кавитации может привести к следующим изменениям физических и химических свойств жидкостей:

1. Изменение вязкости. Вязкость жидкости может уменьшаться при повышении температуры, что может привести к более интенсивной кавитации.

2. Изменение плотности. Плотность жидкости может уменьшаться при повышении температуры, что также может увеличить интенсивность кавитации.

3. Изменение растворимости. Температура может влиять на растворимость различных веществ в жидкости, что может повлиять на процессы химических реакций, происходящих внутри жидкости при кавитации.

4. Изменение термической кондуктивности. Термическая кондуктивность жидкости может изменяться в зависимости от температуры, что может влиять на потоки тепла, связанные с процессом кавитации.

5. Изменение давления насыщенного пара. При повышении температуры давление насыщенного пара может увеличиваться, что может повлиять на процессы образования и разрушения пузырьков при кавитации.

В нашем исследовании обработка воды происходила в кавитационном реакторе роторного типа Laboratory blender 80100 (Рисунок 3).

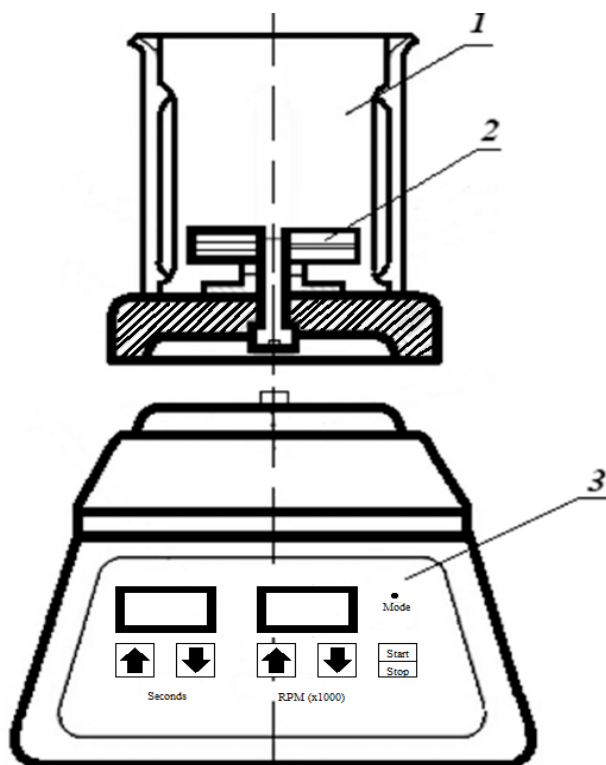


Рисунок 3 - Установка Laboratory blender 80100, 1 – емкость; 2 – крыльчатка; 3 – пульт управления.

Мощность электродвигателя 1 кВт; объем рабочей камеры – 300 мл; число оборотов ротора 10000 об/мин. В качестве рабочего органа выступает

двухлопостная крыльчатка с клиновидным профилем и углом раскрытия клина 60°; питание 220-230 В – 50/60 Гц.

2.2 Контрольно-измерительные приборы и оборудование

Для измерения растворенного кислорода и температуры, использовался анализатор растворенного кислорода «МАРК-201», (Рисунок 4)

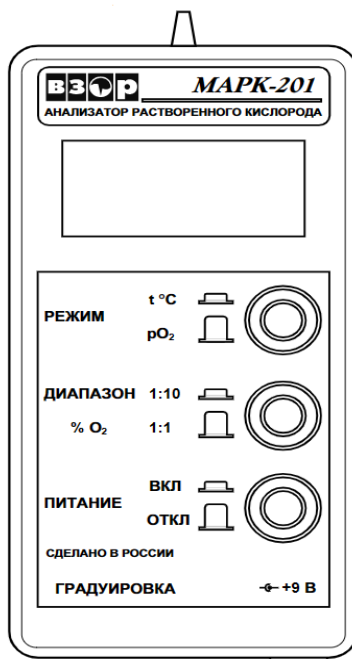


Рисунок 4 - анализатор растворенного кислорода малогабаритный «МАРК-201»

Таблица 1- Параметры «МАРК-201»

Диапазон измерений	от 0 до 200% насыщения концентрации растворенного кислорода от 0 до 450% насыщения
Параметры анализируемой воды	- температура, °С от 0 до 50 - давление при условии полного погружения датчика, Мпа не более 0,2 - содержание солей, г/дм ³ от 0 до 40
Измерение рН	От 4 до 12

Приведенная погрешность измерения, %	- в диапазоне 0-200% не более $\pm 2,5$ - в диапазоне 0-450% не более $\pm 4,0$
Время измерения	Не более 60 секунд
Глубина погружения датчика, м	До 20
Габаритные размеры, мм	- измерительного блока 80x174x35 - датчика $\varnothing 12 \times 100$
Вес, кг	Не более 0,7

Для измерения содержания кислорода в воде анализаторе используется амперометрический датчик, основанный на принципе полярографической ячейки Кларка закрытого типа. Внутри этого датчика помещены электроды, которые находятся в растворе электролита, отделенном от анализируемой водной среды мембраной, которая проницаема только для кислорода, но остается непроницаемой для жидкости и паров. Когда кислород из водной среды проходит через мембрану, он проникает в тонкий слой электролита между электродами и мембраной, где происходит электрохимическая реакция на поверхности катода. В датчике вырабатывается сигнал постоянного тока, который пропорционален парциальному давлению растворенного кислорода в измеряемой среде при фиксированной температуре.

Для точных измерений рН, окислительно-восстановительного потенциала, электропроводности и температуры воды был использован термометр Orville цифровой для воды ML-027 (Рисунок 5).

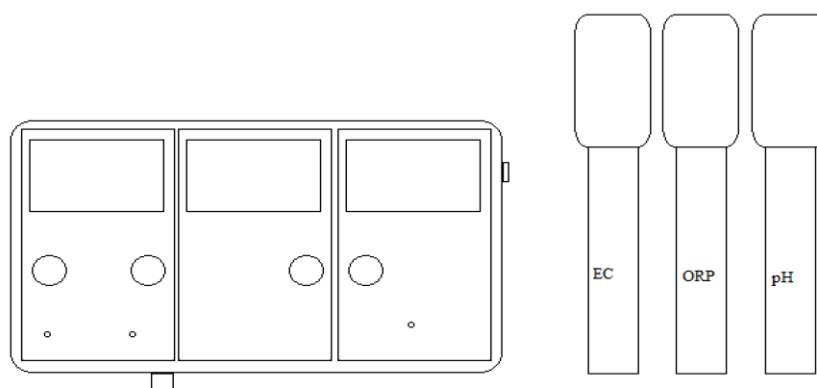


Рисунок 5 - рН/ОВП/ЕС/TDS/термометр Orville цифровой для воды ML-027

Таблица 2 - Параметры прибора Orville цифрового

Диапазон измерения рН	От 0,00 до 14,00
Диапазон измерения ОВП	От -1999 до + 1999 мВ
Диапазон измерения электропроводности (ЕС)	от 0 до 19990 мкСм/см от 0 до 19,99 млСм/см
Цена деления	0,01рН; 1мВ; 0,01 ЕС; 10ppm; 1°С
Температура измеряемой среды	от -50 до +70°С
Электрод	рН электрод стеклянный, электролит КСL (гель), типЕ-201, длина кабеля 1м; Электрод для ОВП платиновый; Электрод для электропроводности и солемера платиновый, длина кабеля 1м.
Погрешность измерения, не более	рН: $\pm 0,1$ рН ($T_1 - T_2$ менее 5°С), $\pm 0,2$ рН ($T_1 - T_2$ более 5°С), Где T_1 – температура окружающей среды, T_2 – температура воды; Для ОВП: ± 1 мВ; Для

	электропроводности и солесодержания
--	--

Для изучения явлений, происходящих на границе газа и жидкости наиболее распространенным методом, является измерение поверхностного натяжения этой границы раздела. Этот метод прост в использовании, но при этом обеспечивает достаточно точные результаты.

Имеются несколько групп определения поверхностного натяжения, это динамические, статические и полустатические. Статический метод, определение поверхностного натяжения при неподвижных поверхностях, находящихся в равновесии с объемом жидкости.

Полустатическими называются методы определения поверхностного натяжения границы раздела фаз, возникающей и периодически обновляемой в процессе измерения (метод максимального давления пузырька и сталагмометрический метод), а также методы отрыва кольца и втягивания пластины. Данные методы позволяют определить равновесное значение поверхностного натяжения, если измерения производятся в таких условиях, что время, в течение которого происходит формирование поверхности раздела, значительно больше времени установления равновесия в системе.

Метод отрыва кольца заключается в определении силы, необходимой для отрыва тонкого проволочного кольца от поверхности жидкости. Кольцо поднимается вместе со столбиком жидкости, который образуется благодаря силе смачивания и адгезии (Рисунок 6).

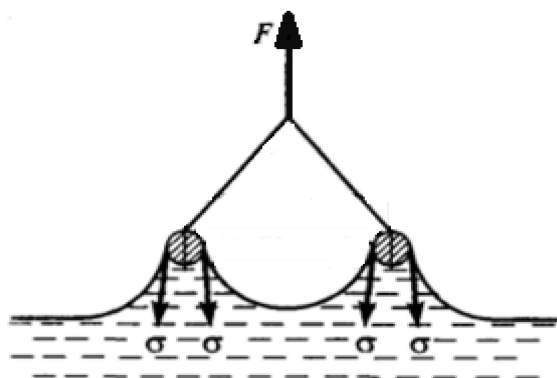


Рисунок 6– Вид жидкости в момент отрыва кольца

Приложенная (вытягивающая) сила F равна весу вытягиваемой жидкости P . Разрыву столбика жидкости препятствует сила поверхностного натяжения F , действующая по периметру смачивания. Когда вытягивающая сила и вес столба жидкости становятся равными силе поверхностного натяжения F , происходит разрыв столбика и кольцо с прилипшей к нему жидкостью отрывается от поверхности. В момент отрыва кольца вытягивающая сила

$$F = F_{\sigma} = 4\pi R\sigma, \quad (7)$$

Измерив с помощью чувствительного динамометра F и зная R , легко рассчитать σ .

Уравнение (7) не вполне точно. Оно предполагает, что поднимаемый столбик жидкости имеет форму полого цилиндра с толщиной стенок, равной диаметру проволоки, однако это не выполняется в действительности. Харкинсом [3] в уравнение (7) был введен поправочный коэффициент f , учитывающий форму столба вытягиваемой жидкости.

Если радиус кольца велик по сравнению с радиусом проволоки ($R \gg r$) и если не требуется высокой точности определения, то можно принять $f = 1$ и в таком случае поверхностное натяжение можно измерять относительным методом, т.е. прокалибровать шкалу измерительного прибора по стандартной жидкости с известным поверхностным натяжением. Для стандартной жидкости уравнение (1) запишется в виде:

$$F_0 = 4\pi R\sigma_0, \quad (8)$$

Деля уравнение (1) на (2), получим

$$\frac{F}{F_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{n}{n_0}, \quad (9)$$

где n и n_0 – отсчеты по шкале лимба для испытуемой и стандартной жидкости, пропорциональные силе отрыва. Отсюда поверхностное натяжение исследуемой жидкости:

$$\sigma = \frac{\sigma_0 n}{n_0} = Kn, \quad (10)$$

где K – постоянная прибора для данного кольца при неизменном натяжении нити. Метод отрыва кольца достаточно прост, точен, однако при его выполнении необходимо соблюдать ряд условий:

1. Кольцо должно быть плоским и полностью смачиваться жидкостью (при неполном смачивании получаются заниженные результаты);
2. Плоскость кольца и поверхность жидкости должны быть строго параллельны;
3. Поверхность жидкости должна быть достаточно велика, чтобы исключить влияние мениска у стенки сосуда;
4. Недопустимо сотрясение прибора в ходе измерения.

Измерения проводят по следующей схеме. Перед испытанием чашку и кольцо тщательно промывают и ополаскивают дистиллированной водой. Кольцо промывают этиловым спиртом, прокалывают в окислительном пламени спиртовки. Прибор типа Дю-Нуи (например, ВН-5504) с платиноиридиевым кольцом диаметром 20 мм устанавливают в горизонтальном положении и вешают на крючок коромысла сухое кольцо.

Устанавливают указатель на нуль шкалы, после чего коромысло прибора приводят в горизонтальное положение. Производят градуирование шкалы тензиометра. Для этого дистиллированную воду, имеющую температуру $23 \pm 2^\circ\text{C}$, наливают в чашку, которую помещают на платформе прибора. Вращением винта поднимают чашку до тех пор, пока кольцо не коснется воды.

Затем медленно вращают винт указателя шкалы до тех пор, пока кольцо не оторвется от поверхности воды. В момент отрыва кольца прекращают вращение винта и снимают показание прибора. Цену деления шкалы (K) в миллиньютонах на метр вычисляют по формуле:

$$K = \frac{a}{b}, \quad (11)$$

где, a — поверхностное натяжение воды при температуре испытания, мН/м (см. приложение); b — среднее арифметическое показание шкалы прибора пяти измерений.

Цену деления шкалы тензиометра устанавливают перед началом работы и проверяют ее при непрерывной работе через каждые 8 ч. Испытания проводят при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Чашку и кольцо высушивают фильтровальной бумагой. Около 25 мл исследуемой жидкости наливают в чашку и, если необходимо, выдерживают для установления температуры $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Удаляют пузырьки воздуха и полимерную пленку с поверхности латекса полоской фильтровальной бумаги. Определяют число делений шкалы прибора в момент отрыва кольца от поверхности латекса. Проводят пять измерений, причем перед каждым измерением очищают кольцо от жидкости. Поверхностное натяжение латекса (σ) в миллиньютонах на метр вычисляют по формуле:

$$\sigma = A K, \quad (12)$$

где A — среднее арифметическое пяти измерений; K — цена деления прибора, мН/м.

За результат испытания принимают среднее арифметическое пяти измерений, допускаемые расхождения между которыми не должны превышать 0,5 мН/м. Устройство, реализующее метод отрыва кольца — тензиометр Дю-Нуи. Принцип действия тензиометра заключается в измерении силы отрыва проволочного кольца из платиноиридиевого сплава от поверхности раздела жидкость-воздух. Сила отрыва измеряется в условных единицах, затем производится вычисление по формулам, позволяющее

получить значение натяжения в миллиньютонх на метр (мН/м). Технические характеристики прибора представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики тензиометра Дю-Нуи

Предел измерения шкалы, усл. ед.	0 ... 180
Цена деления шкалы, усл. ед.	1
Цена деления указателя, усл. ед.	0,1
Диаметр рабочего кольца, мм.	20
Объём чашки не менее, см ³	90
Габаритные размеры прибора, ширина, глубина, мм	245x256
высота, мм	300
Масса, кг	2,7

Общий вид прибора представлен на Рисунок 7. Прибор состоит из упругой металлической нити 1, натянутой горизонтально, к которой прикреплено коромысло 2 с крючком. На него навешивается платиновое кольцо 3. Отрывающее усилие создается закручиванием упругой нити с помощью винта 4. При вращении винта указатель 5, соединенный с концом закручиваемой нити, перемещается по лимбу 6, шкала которого может быть проградуирована непосредственно в единицах поверхностного натяжения.

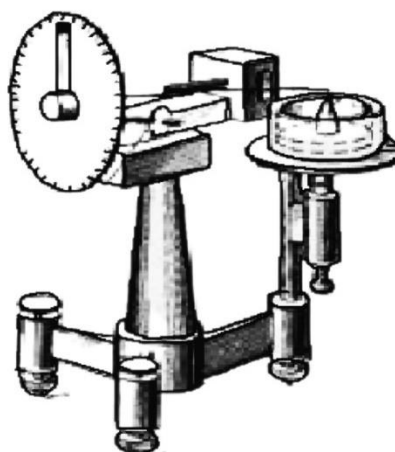


Рисунок 7 - Тензиометр Дю-Нуи

Объектом исследования работы являлась дистиллированная вода. Дистиллированная вода соответствовала ГОСТ 6709-72. Температура окружающей среды оставалась постоянной на протяжении всего времени эксперимента и составляла $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Образцы воды с момента получения дистиллята находились в стеклянной посуде сверху неплотно закрытой тонкой полиэтиленовой пленкой в течение не менее 3 суток.

Обработка дистиллята производилась с помощью кавитационного миксера (рисунок 11) в режиме суперкавитации ($\chi = 0,05$) при частоте вращения ротора $n = 10\,000$ об/мин. Временной интервал кавитационной обработки составлял от 30 до 300 секунд с шагом 30 секунд.

Время между кавитационным воздействием на воду и измерением значения исследуемого параметра активированной воды составляло не более двух минут. Средние значения рН, электропроводности, ОВП (окислительно-восстановительный потенциал), и T вычислялись по 5 измерениям каждой экспериментальной точки.

2.3 Регрессионный анализ экспериментальных данных

Для определения графических и функциональных зависимостей физико-химических характеристик воды от различных параметров был использован метод регрессионного анализа. Уравнение регрессии приближенно описывает связь между значениями x одного признака и соответствующими средними значениями другого признака \bar{Y}_x и имеет вид: $\bar{Y}_x = f(x)$.

Регрессионный анализ полученных экспериментальных зависимостей физических параметров дистиллированной воды от кавитационной обработки получены с помощью программного пакета Origin 7.0.

Наиболее простой и употребляемый вид зависимости – линейная зависимость. Она определяется уравнением линейной регрессии $\bar{Y}_x = ax + b$ и изображается на графике в виде прямой регрессии. Уравнение регрессии называется выборочным, поскольку его параметры a и b находятся по результатам выборки $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$, причем наилучшим образом в смысле метода наименьших квадратов. Сущность метода заключается в том, чтобы была наименьшей сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений y_i от соответствующих значений \bar{Y}_{x_i} , вычисленных по уравнению регрессии

$$Y_{x_i} = ax_i + b, \text{ то есть } \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 \rightarrow \min$$

Удовлетворяющие этому условию параметры a и b находят из системы, которая называется системой нормальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} na + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{array} \right., \quad (13)$$

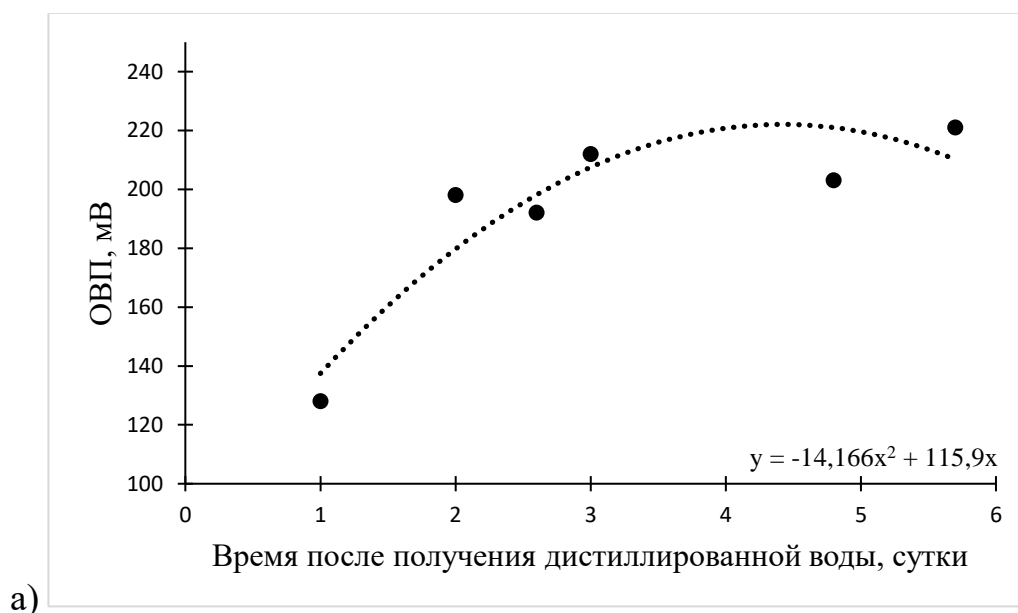
Зависимость между двумя наблюдаемыми величинами не всегда можно выразить линейной функцией. В таком случае функция регрессии может быть сведена к линейной с помощью замены переменных. Необходимо, однако, учитывать параметры исследуемого процесса и определять с точностью до нескольких параметров вид эмпирической функции регрессии. Для проверки того, удачно ли выбран вид зависимости, следует построить новое корреляционное поле (учитывая замены).

3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Физико-химические параметры дистиллированной воды

Были определены начальные параметры дистиллированной воды: ОВП, электропроводность и рН. Колебания или флуктуации значений ОВП, электропроводности и рН могут привести к неоднозначным результатам. В работах [45, 46] также сообщается о влиянии «возраста» воды (время после получения дистиллята) на качественные показатели электропроводности при воздействии постоянного магнитного поля, электромагнитного поля и механических колебаний.

На Рисунке 8 (а - в) представлены результаты измерений ОВП, электропроводности и рН дистиллированной воды в течение 6 суток после ее получения. По экспериментальным данным были построены графические зависимости и произведена аппроксимация полученных точек. Из графиков видно, что в первые 3 дня происходят флуктуации, затем вода принимает более стабильное состояние.



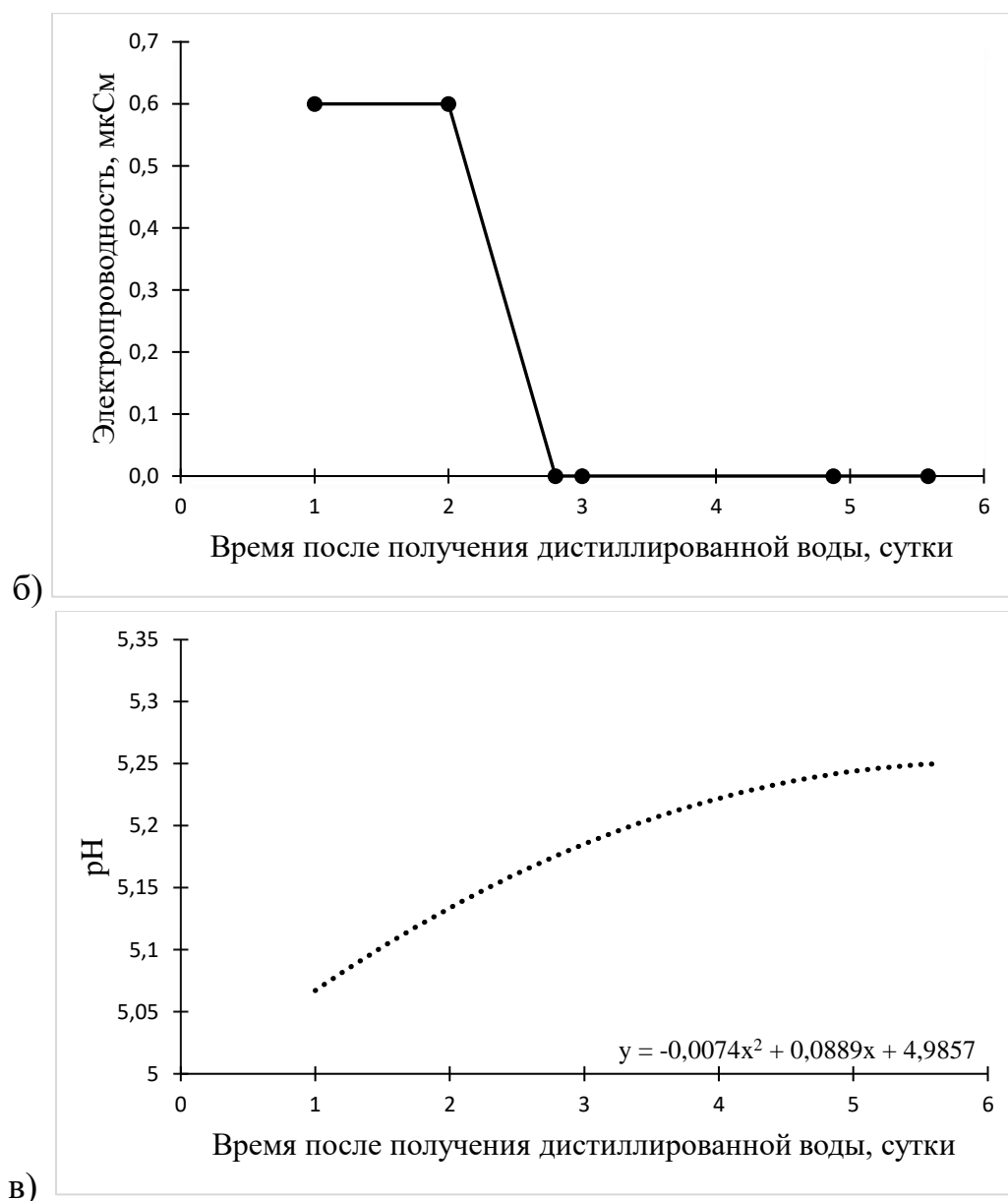


Рисунок 8 - Изменение физико-химических параметров дистиллированной воды в течение 6 суток после ее получения (а-в)

Для исследований влияния кавитации на физико-химические свойства воды стоит обратить внимание на температурные условия, поскольку они могут существенно влиять на протекание кавитационных процессов. Важно отметить, что кавитация может привести к нагреву воды, поскольку энергия, выделяющаяся при ее протекании, преобразуется в тепло. Поэтому, для проведения более точных экспериментов в области исследований кавитации, необходимо учитывать и контролировать температуру.

3.2 Физико-химические параметры кавитационно активированной дистиллированной воды

В работе [47] было установлено, что наиболее оптимальные параметры обработки дистиллированной воды соответствуют числам кавитации $\chi = 0,05$. Поэтому в опытах обработка производилась в режиме суперкавитации ($\chi=0,05$) при постоянной частоте вращения ротора $n = 10\ 000$ об/мин. Обрабатываемый объем воды был равен 100 мл. На рисунках 9 и 10 представлены результаты измерений в виде графических зависимостей физико-химических свойств дистиллированной воды от времени кавитационной обработки.

При кавитации с увеличением времени обработки наблюдается повышение температуры воды более чем на 40%. Это связано с пульсацией и последующим коллапсом кавитационных пузырьков. Зависимость температуры от времени обработки линейная, интенсивность изменения температуры характеризуется тангенсом угла наклона прямой $\operatorname{tg}\alpha = 0,04$ (Рисунок 9). Полученные экспериментальные данные также хорошо согласуются с результатами работы [47].

Экспериментальная зависимость изменения КРК воды от времени кавитационного воздействия представлена на рисунке 9. Каждая точка построена по усредненному значению пяти измерений. Относительная ошибка определения КРК – 2,5%. Концентрация кислорода в воде линейно уменьшается при увеличении времени воздействия кавитации. Интенсивность изменения КРК характеризуется тангенсом угла наклона прямой $\operatorname{tg}\alpha = 0,01$.

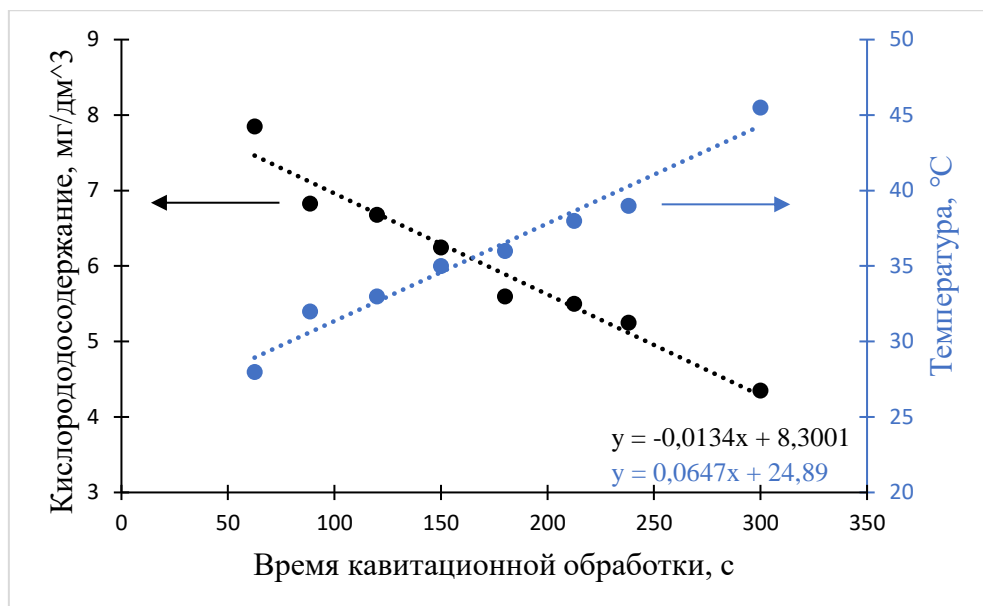
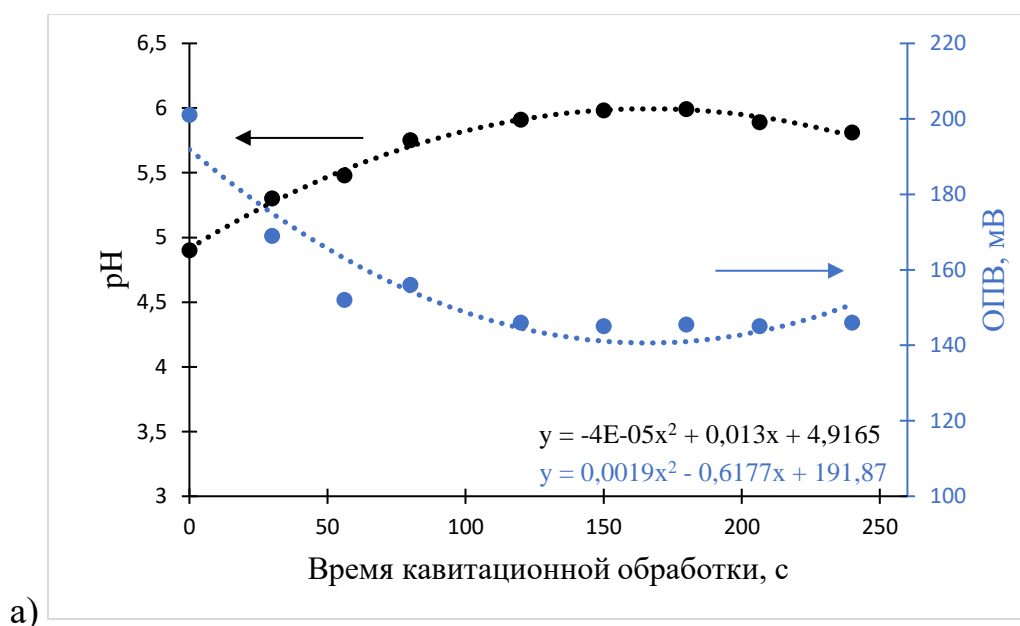


Рисунок 9 – Изменение КРК дистиллированной воды в зависимости от времени кавитационной обработки и времени релаксации

На Рисунок 10 представлена зависимость рН от времени обработки. Водородный показатель рН увеличивается с увеличением времени кавитационного воздействия. При времени обработки 180 секунд разница между максимальным значением рН активированной воды и рН исходного дистиллята ($\Delta\text{pH}_{\text{max}}$) составила 1,1.



а)

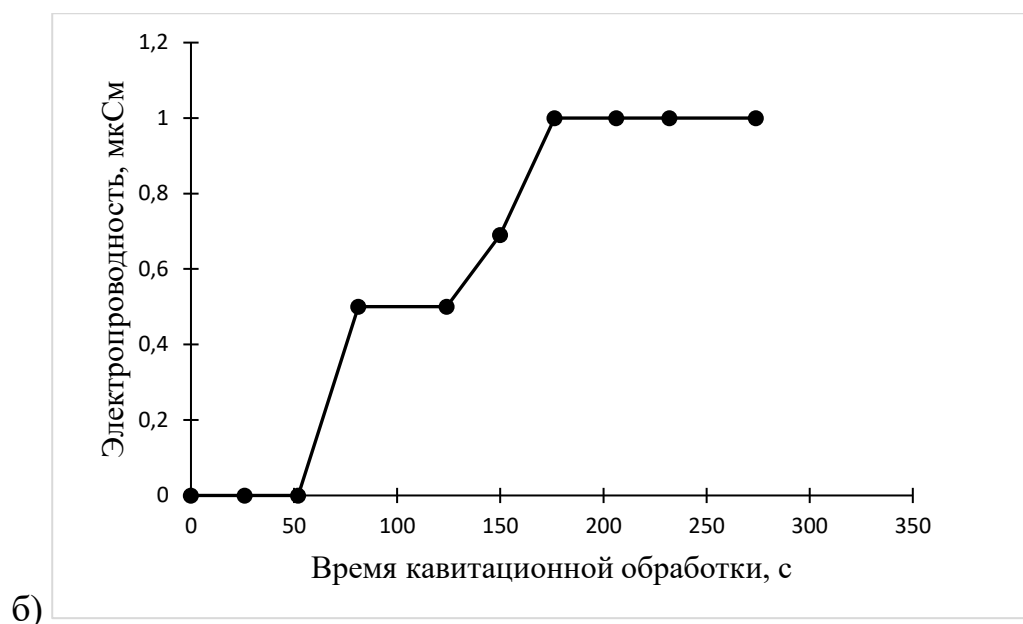


Рисунок 10 - Изменение физико-химических параметров дистиллированной воды в зависимости от времени кавитационной обработки

Наиболее интенсивное изменение рН соответствует интервалу 30-90 секунд. В этом диапазоне рН повышается на 15%, тогда как максимальное повышение рН составляет 18%. Скорость изменения рН при кавитационном воздействии в диапазоне 30-90 секунд почти в два раза превышает скорость изменения рН при воздействии в диапазоне 90-300 секунд.

Динамика поведения ОВП в процессе кавитационной обработки воды представлена на Рисунок 10а. Относительная ошибка определения ОВП – 2%. На графике наблюдается участок наиболее интенсивного изменения ОВП в интервале 30-90 секунд. ОВП понижается на 43%, тогда как максимальное понижение ОВП составляет 47%, но не принимает отрицательных значений. Скорость изменения ОВП при кавитационном воздействии в диапазоне 30-90 секунд почти в три раза превышает скорость изменения ОВП при воздействии в диапазоне 90-300 секунд.

В серии экспериментов по выявлению воздействия на дистиллированную воду кавитационных эффектов различной продолжительности (30-300 секунд) было установлено повышение электропроводности (рисунок 18в).

Коэффициент поверхностного натяжения (КПН) – физический параметр, зависящий не только от свойства поверхностного слоя жидкости, но и от структурного состояния жидкости в целом. Исследование характера изменения КПН после воздействий различной физической природы на воду имеет важное значение при исследовании ее структурных особенностей. Изучалось влияние гидродинамической кавитации на поверхностное натяжение дистиллированной воды.

Исследуемый дистиллят в течение 4 суток с момента получения находился в неплотно закрытом стеклянном сосуде. Коэффициент поверхностного натяжения воды (КПН) измерялся методом отрыва кольца. Точность метода ~3%. Единица измерения - мН/м, обозначение σ .

В результате разрыва сплошности среды в жидкости образуются полости, заполненные газом, паром или их смесью (кавитационные пузырьки, каверны. На Рисунок 11 представлена кривая зависимости σ дистиллята от времени обработки в кавитационном миксере.

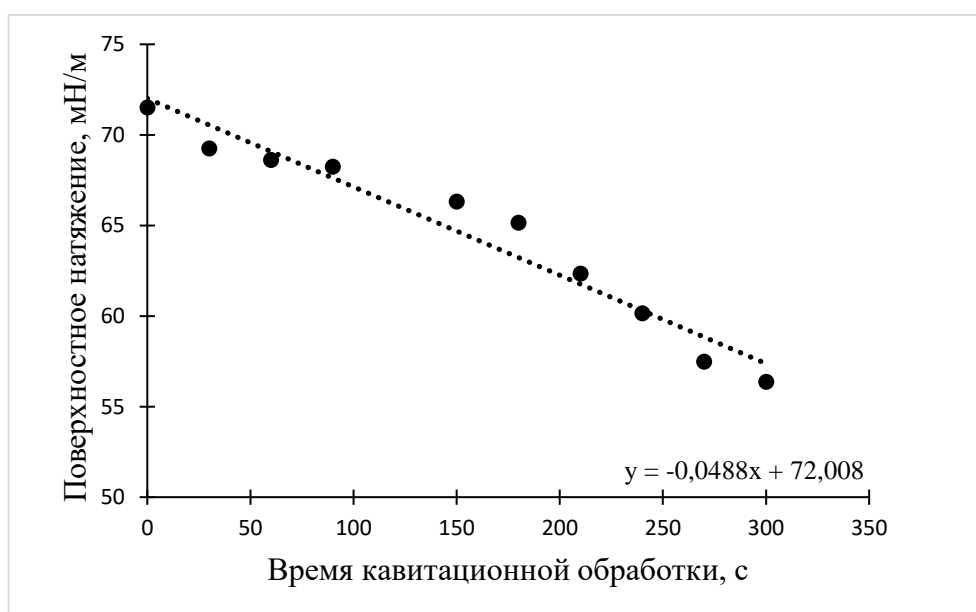


Рисунок 11 - Зависимость поверхностного натяжения воды от времени кавитационной обработки

По приведенным данным видно, что при обработке дистиллированной воды зависимость поверхностного натяжения от времени обработки имеет

линейный характер. Также важно отметить, что в течение 5-ти минутной обработки значение поверхностного натяжения воды уменьшается на 22 %. Согласно табличным данным, при нагревании дистиллированной воды от 23 до 40° С σ изменяется от 72,28 до 69,6, т.е. на 3,7%. В этом же температурном интервале при кавитационной обработке σ уменьшается на 22%. Разница в 6 раз. Таким образом, при определенных режимах гидродинамических течений и времени кавитационной обработки можно добиться значительного уменьшения σ воды

3.3 Изменения физико-химических свойств воды при повышении температуры в процессе кавитации

При кавитации происходят изменения физико-химических свойств воды – увеличивается рН, изменение коэффициента поверхностного натяжения и ОВП. Эти изменения происходят при повышении температуры. Например, при повышении температуры вода может переходить в пар и это может приводить к более интенсивной кавитации, что в свою очередь может изменять ее физико-химические свойства.

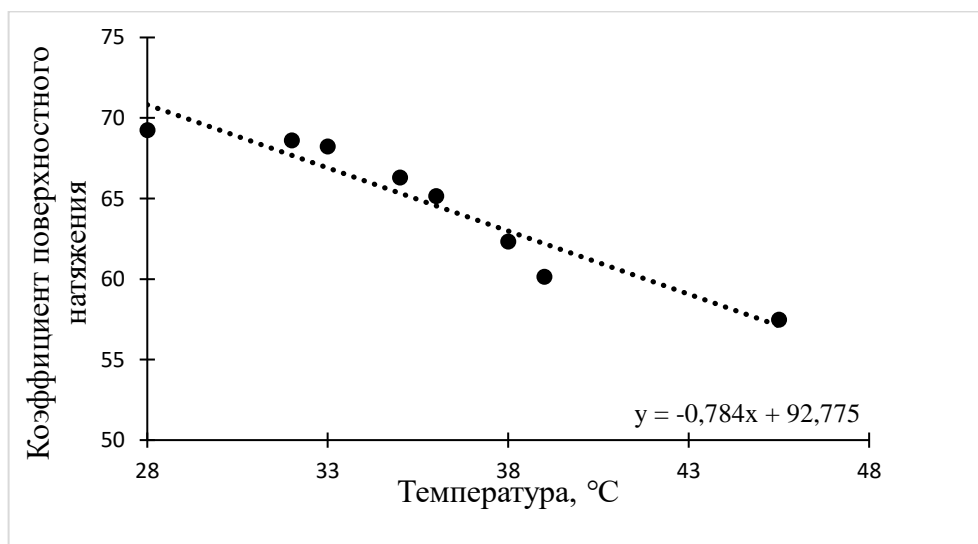


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента поверхностного натяжения σ от времени и температуры кавитационной обработки

Согласно рисункам 12 - 14, кавитационная обработка влияет на свойства жидкости следующим образом: при повышении температуры жидкости за счет кавитации рН увеличивается, коэффициент поверхностного натяжения уменьшается. Кислородосодержание зависит от температуры воды при нагревании. Кислородосодержание при кавитационном воздействии уменьшается монотонно при фоновом увеличении температуры (рис. 13). Характер кривой уменьшения КРК при увеличении времени кавитационного воздействия аналогичен для простого нагревания [48].

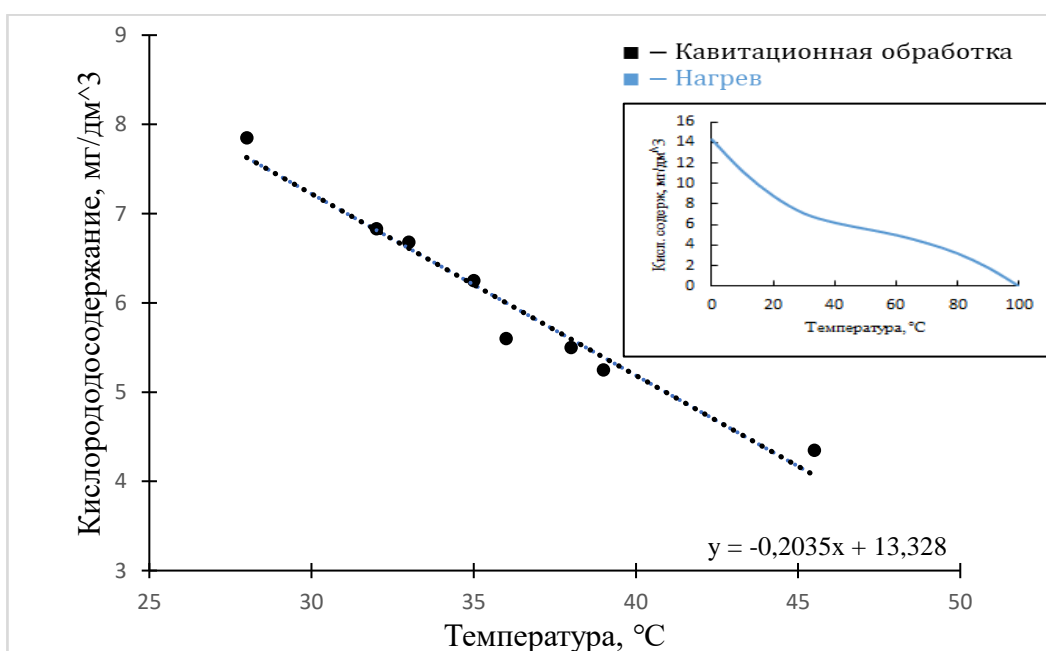


Рисунок 13 - Зависимость КРК воды от температуры

Известно, что показатель рН дистиллированной воды уменьшается при повышении температуры (рисунок 14) [48], вода приобретает кислые свойства, в диапазоне температур (20 – 40) °С, изменение рН показателя менее 1 ед. При кавитационной обработке при фоновом повышении температуры рН увеличивается за счет окислительно-восстановительных реакций – изменения соотношения $\text{OH}\cdot$ и $\text{H}\cdot$ радикалов.

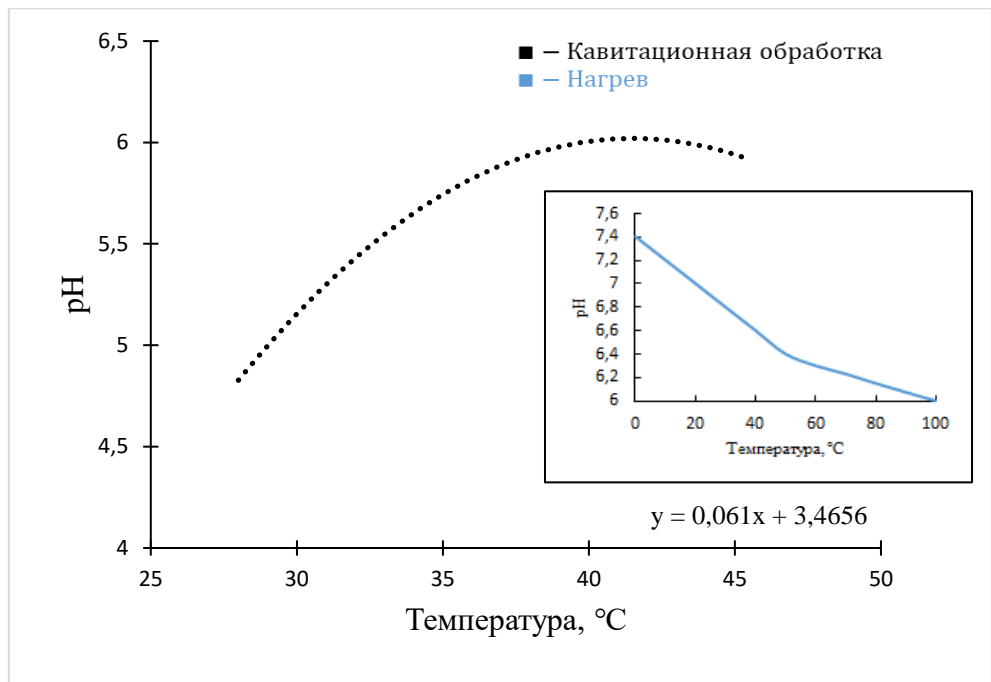


Рисунок 14 – Зависимость рН от температуры

При нагревании дистиллированной воды ОВП уменьшается (рисунок 15) [50]. При кавитационной обработке при повышении температуры ОВП также понижается.

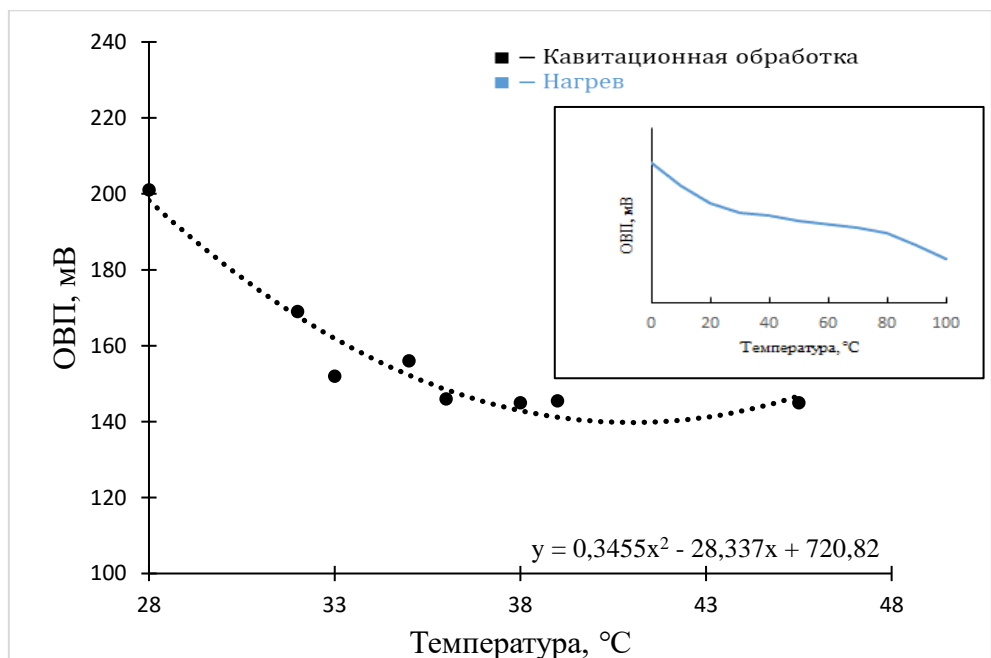


Рисунок 15 – Зависимость ОВП от температуры

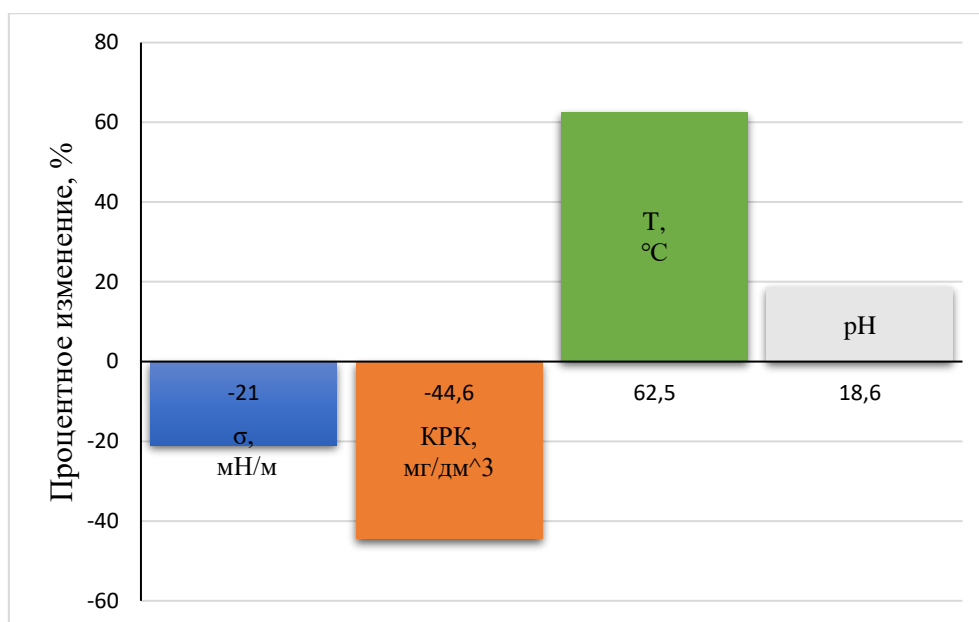


Рисунок 16 - Процентное изменение физико-химических параметров воды при кавитационной обработке

При кавитации в воде происходят сложные окислительно-восстановительные изменения, однако они отличаются от тех же процессов при нагревании. Перераспределение радикальных групп в воде при кавитационном воздействии – сонолиз молекул воды, обеспечивает интенсификацию окислительных процессов при обработке гетерогенных систем. Сложность процессов при кавитации обусловлена природой воды, она является крайне нестабильной системой, а скорость химических окислительно-восстановительных реакций очень высока. Для детальной и однозначной интерпретации поведения pH, ОВП, КРК, поверхностного натяжения воды (рисунок 16) при кавитационном воздействии необходимо использовать более тонкие методы с количественной оценкой значений этих показателей.

Полученные экспериментальные данные могут помочь при внедрении кавитационной обработки в технологические процессы очистки воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено экспериментальное исследование влияния кавитационного воздействия на физико-химические свойства воды. Было показано, что при схлопывании кавитационного пузырька происходит локальное повышение температуры и давления, что значительно изменяет свойства воды. Также отмечается, что вода как метастабильная система представляет собой сложный объект исследования. Однако, в данной работе удалось экспериментально описать характер изменения некоторых свойств воды после кавитационного воздействия.

В работе было проведено экспериментальное исследование реакции воды на гидродинамическое кавитационное воздействие при определенных значениях оборотов ротора в кавитационном миксере и времени воздействия. Результаты показали, что при кавитационном воздействии на воду происходят изменения ее физико-химических свойств, таких как электропроводность, водородный показатель (рН), окислительно-восстановительный потенциал, кислородосодержание и др.

В результате эксперимента было обнаружено увеличение температуры, рН, а также уменьшение окислительно-восстановительного потенциала.

Максимальное значение рН достигается при кавитационном воздействии в течение 180 секунд. Также было обнаружено, что минимальное значение ОВП достигается при кавитационной обработке в течение 300 секунд, но остается в области положительных значений. При этом температура повышается с комнатной до ~40 °С. При кавитационной обработке при фоновом повышении температуры рН увеличивается за счет окислительно-восстановительных реакций – изменения соотношения $\text{OH}\cdot$ и $\text{H}\cdot$ радикалов.

При кавитации в воде происходят сложные окислительно-восстановительные изменения, однако они отличаются от тех же процессов при нагревании. Перераспределение радикальных групп в воде при кавитационном воздействии – сонолиз молекул воды, обеспечивает

интенсификацию окислительных процессов при обработке гетерогенных систем.

Исследования показывают, что использование кавитации при очистке сточных вод, добыче нефти и в других технологических сферах может быть перспективно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. К.С. Суслик Сонохимия Наука, 247 (4949) (1990), стр. 1439-1445
2. Р. Гогейт, А.Б. Ученый индус Гидродинамические кавитационные реакторы: современный обзор Rev Chem Eng, 17 (1) (2001), стр. 1-85
3. Ю.Т. Шах, А.Б. Пандит, В.С. Мохолок Инженерия кавитационных реакций Kluwer Academic/Plenum Publishers, Нью-Йорк (1999)
4. В.С. Мохолок, Сентил Кумар, А.Б. Ученый индус Гидродинамическая кавитация для сонохимических эффектов Ultrason Sonochem, 6 (1-2) (1999), стр. 53-65
5. А. Шарц, Т. Степишник-Пердых, М. Петковшек, М. Дулар К вопросу о значении числа кавитации в исследованиях водоподготовки методом гидродинамической кавитации Ultrason Sonochem, 34 (2017), стр. 51-59
6. Föttinger H. Untersuchungen über Kavitation und Korrosion bei Turbinen, Turbopumpen und Propellern. В: Wissenschaftlicher Beirat des Vereines Deutscher Ingenieure, редактор. Hydraulische Probleme. Берлин: VDI-Verlag; 1926. С. 14-64. Немецкий.
7. М.С. Плессет Динамика кавитационных пузырьков J Appl Mech, 16 (3) (1949), стр. 277-282
8. М. Петковшек, М. Зупанц, М. Дулар, Т. Косек, Э. Хит, Б. Компаре и др. Ротационный генератор гидродинамической кавитации для водоподготовки Separ Purif Tech, 118 (2013), стр. 415-423
9. М.В. Багал, Р. Гогейт Очистка сточных вод с использованием гибридных схем очистки на основе кавитации и химии Фентона: обзор Ultrason Sonochem, 21 (1) (2014), стр. 1-14
10. А. Шарц, Т. Степишник-Пердых, М. Петковшек, М. Дулар К вопросу о значении числа кавитации в исследованиях водоподготовки методом гидродинамической кавитации Ultrason Sonochem, 34 (2017), стр. 51-59
11. Y. Ян, Р.Б. Торп Переходы режимов течения за счет кавитации в потоке через отверстие Int J Multiph Flow, 16 (6) (1990), стр. 1023-1045
12. А. Чонколини, Ф. Сценини, Дж. Дафф, М. Сольчек, М. Куриони Захлебывающаяся кавитация в микроотверстиях: экспериментальное исследование Exp Therm Fluid Sci, 74 (2016), стр. 49-57
13. К. Андо, А.К. Лю, К.Д. Ол Гомогенное зарождение в воде в микрофлюидных каналах Phys Rev Lett, 109 (4) (2012), стр. 044501
14. К.А. Мёрх Зарождение кавитации из пузырьков ядер Фокус интерфейса, 5 (5) (2015), стр. 20150006
15. Т.Ф. Гросс, Ф. Пельц Диффузионное зародышеобразование из поверхностных ядер при гидродинамической кавитации J Fluid Mech, 830 (2017), стр. 138-164

16. Е.А. Хеммингсен Кавитация в газопересыщенных растворах *J Appl Phys*, 46 (1) (1975), стр. 213-218
17. Дж.А. Веннинг, М.Т. Ху, Б.В. Пирс, Пенсильвания Бранднер Фоновые измерения ядер и их значение для зарождения кавитации в гидродинамических испытательных установках *Exp Fluids*, 59 (4) (2018), стр. 71
18. Ж. Ким, С.Дж. Песня Измерение температурных воздействий на кавитацию в индукторе турбонасоса *J Fluids Eng*, 138 (1) (2016), стр. 011304
19. М.Г. Де Джорджи, А. Фикарелла, М. Тарантино Оценка кавитационных режимов во внутреннем отверстии при различных температурах с использованием частотного анализа и визуализации *Int J Heat Fluid Flow*, 39 (2013), стр. 160-172
20. Н. Сояма Интенсивность люминесценции вихревой кавитации в трубке Вентури изменяется в зависимости от числа кавитации *Ультрасон Сонохем*, 71 год (2021), статья 105389
21. Р.К. Джоши, Р. Гогейт Деградация дихлофоса с использованием стратегий гидродинамической кавитационной обработки *Ultrason Sonochem*, 19 (3) (2012), стр. 532-539
22. С. Кумар, А.Б. Пандит - Химическая инженерия и технология ..., 1999 - Онлайн-библиотека Wiley
23. Х. Лю, З. Ву, Б. Ли, Дж. Чжао, Дж. Он, В. Ли и др. Влияние давления на входе на кавитационные характеристики регулирующего клапана *Eng Appl Comput Fluid Mech*, 14 (1) (2020), стр. 299-310
24. Ж. Лян, С. Ло, Ю. Лю, С. Ли, Т. Ши Численное исследование влияния колебаний давления на входе на расходные и кавитационные характеристики водяных гидравлических тарельчатых клапанов *Int J Heat Mass Transf*, 103 (2016), стр. 684-700
25. А. Ташдемир, Ї. Дженгиз, Э. Йылдыз Ю.К. Байхан Исследование отпаривания аммиака гидродинамическим кавитационным реактором *Ultrason Sonochem*, 60 (2020), стр. 104741
26. М.Т. Ху, Дж.А. Веннинг, Б.В. Пирс, К. Такахаси, Т. Мори, А. Бранднер Динамика популяции природных ядер в кавитационных туннелях *Exp Fluids*, 61 (2) (2020), стр. 34
27. З.Л. Ву, Б. Ондрушка, В. Брәүтигам Деградация хлоруглеродов под действием гидродинамической кавитации *Chem Eng Technol*, 30 (2007), стр. 642-648
28. Е.Г. Флинн Физика акустической кавитации в жидкостях В. Мейсон (ред.), Физическая акустика, том I - часть B, Academic Press Inc., Нью-Йорк (1964), стр. 57-172
29. С.Дж. Ким, К.Х. Лим, К.Ю. Ким Деформационные характеристики схлопывания сферических пузырьков в ньютоновских жидкостях вблизи стенки методом конечных элементов с рецептурой ALE Корея-Австралия *Rheol J*, 18 (2) (2006), стр. 109-118

30. J. Luo, W. Xu, Y. Zhai, Q. Zhang Experimental study on the mesoscale causes of the influence of viscosity on material erosion in a cavitation field *Ultrason Sonochem*, 59 (2019), p. 104699
31. R.E.A. Arndt Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures *Annu Rev Fluid Mech*, 13 (1981), pp. 273-326
32. Н. Nazari-Mahroo, К. Pasandideh, Н.А. Navid, R. Sadighi-Bonabi How important is the liquid bulk viscosity effect on the dynamics of a single cavitation bubble? *Ultrason Sonochem*, 49 (2018), pp. 47-52
33. Промтов М.А. Роторные импульсные аппараты и перспективы их применения.//Теоретические основы создания, оптимизации и управления энерго- и ресурсосберегающими процессами и оборудованием. Сб. трудов международ. науч. конф. Т. 1. Иваново: Изд-во Ив. гос. хим.-технол. ун-та, 2007. - с. 274 – 283.
34. Беляев, А.Н. Оценка эффективности использования гидродинамической кавитации при хлорировании воды / А.Н. Беляев, И.В. Флегентов, А.С. Суслов // Научно-практический журнал «Глобальный научный потенциал». –2012. –№4. –С. –20–22.
35. Куц, Е.В. Повышение эффективности очистки воды с использованием гидродинамической кавитации : автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Е. В. Куц. –Киров: ВятГТУ, –2000. –16 с.
36. Гимранов, Ф. М. Гидродинамическая кавитация как метод интенсификации процесса озонирования в пищевых технологиях / Ф. М. Гимранов, А. Н. Беляев, И. В. Флегентов, А. С. Суслов // Вестник
37. Патент №2445272 Российская Федерация 9МПК9 С 02 F 1/34. Способ обеззараживания воды синергетическим воздействием / Беляев А.Н., Флегентов И.В.; заявитель и патентообладатель Беляев А.Н., Флегентов И.В.- №2010141209: заявл. 07.10.2010; опубл. 20.03.2012. – 6 с.
38. Ф. Джамиль, М. Аслам, Х. Алаа, А. Бохари, С. Рафик, З. Хан, А. Инаят, А. Ахмед, С. Хоссейн, М.С. Хуррам Более экологичное и устойчивое производство биоэтилена из биоэтанола: текущее состояние, возможности и перспективы *Rev. Chem. Eng.* (2020)
39. А.А. Умар, И.Б.М. Саaid, А.А. Сулеймон, Р.Б.М. Пилус Обзор нефтяных эмульсий и недавний прогресс в области эмульсий воды в сырой нефти, стабилизированных природными поверхностно-активными веществами и твердыми веществами *Дж. Sci. Eng.*, 165 (2018), стр. 673-690,
40. J. Ли, Т. Бабадалы Снижение интенсивности выбросов парниковых газов с помощью новых методов генерации при добыче тяжелой нефтью. Чистящий продукт., 286 (2021), статья 124980, 10.1016/j.jclepro.2020.124980
41. Z. Варга, З. Эллер, Дж. Hancsóк Технико-экономическая оценка повышения качества тяжелого газойля с помощью различных процессов *J. Cleaner Product.*, 111 (2016), стр. 108-116, 10.1016/j.jclepro.2015.09.134

42. Р. Джейн, Воздействие добычи и переработки полезных ископаемых на окружающую среду: стратегии управления, мониторинга и аудита, Баттерворт-Хайнеманн 2015.
43. Промтов М.А. Кавитационное обеззараживание и пастеризация жидкостей / М.А. Промтов // Вестник ТГТУ. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 83 – 88.
44. Оценка преимуществ кавитационного обеззараживания и разработка кавитационного устройства нового типа / Петрякова О.Д., Гудач М.В. // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. –2011. –№ 12. С. 163–168.
45. Степанян, Р. С. Влияние механических колебаний на электропроводность воды // Р. С. Степанян, Г. С. Айрапетян, А. Г. Аракелян и др. // Биофизика. – 1999. – Т. 44. – Вып. 2. – С. 197–202.
46. Дерпгольц, В.Ф. Мир воды. / В.Ф. Дерпгольц. – Л.: Недра, 1979. 254 с.
47. Кривоуццкий, А. С. Изменение физико-химических свойств воды под воздействием гидродинамической кавитации / А. С. Кривоуццкий, В. А. Кулагин // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: мат-лы НПК. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – С. 61-74.
48. A.S. Tijani et al.
49. Thermos-physical properties and heat transfer characteristics of water/anti-freezing and Al₂O₃/CuO based nanofluid as a coolant for car radiator Int. J. Heat Mass Transf. 2018
Ф. Тодт "Коррозия и защита от от коррозии", издательство "Химия", Москва / Ленинград, 1966 – с 583-585
50. M. Bonte et al. Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production Water Res. (2013)

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

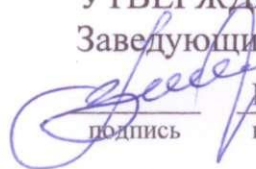
институт

Теплотехники и гидрогазодинамики

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



В.А. Кулагин

подпись

инициалы, фамилия

« 26 »

июня

2023 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код - наименование направления

Влияние температуры исходной воды на физико-химические процессы при
кавитации

тема

Руководитель

 23.06.23

подпись, дата

доцент, к. т. н.

должность, ученая степень

О.П. Стебелева

инициалы, фамилия

Выпускник

 23.06.2023

подпись, дата

В. А. Карбаинов

инициалы, фамилия

Красноярск 2023