

На правах рукописи

КРИВОЛУЦКИЙ
Алексей Сергеевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ЗА СЧЕТ КАВИТАЦИОННОЙ
ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Специальность 05.14.01 – энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2007

Работа выполнена в Политехническом институте
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кулагин Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Липовка Юрий Львович

кандидат технических наук
Витер Виктор Кирилович

Ведущая организация: **ОАО «СибВТИ Красноярского филиала СибЭНТЦ»**

Защита состоится 14 ноября 2007г. в 14 часов в ауд. Г-224 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, факс: (3912) 43-06-92; E-mail: boiko@krgtu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». Автореферат диссертации размещен на сайте <http://www.sfu.krasn.ru/science/postgraduate/report>

Автореферат разослан 14 октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Е. А. Бойко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Предприятия энергетической отрасли, как известно, являются одними из крупнейших потребителей воды из природных источников. Как правило, ими используется вода из поверхностных источников, которая содержит различные примеси.

Для обеспечения надежной, долговечной и безаварийной работы системы теплоснабжения необходима качественная подготовка подпиточной воды, которая, в общем случае, включает следующие стадии обработки: удаление из воды катионов накипеобразователей умягчением или обессоливанием; удаление из воды агрессивных газов O_2 и CO_2 атмосферной, вакуумной или химической деаэрацией. Особенно важное значение имеет водоподготовка в открытых системах теплоснабжения, где подпиточная вода должна, согласно требованиям санитарного надзора, соответствовать по всем показателям питьевой воде.

Наименее надежным звеном систем теплоснабжения является транспорт тепла. Основными проблемами тепловых сетей являются коррозионные разрушения и загрязнения трубопроводов. Более 25% всех повреждений связано с внутренней язвенной коррозией. Как правило, все это является следствием технического и технологического несовершенства применяемых методов обработки воды.

Общей проблемой физико-химической очистки природных вод в энергетических системах является необходимость дальнейшего усовершенствования процессов очистки и коррекции свойств воды на базе новых наукоемких энергоэффективных технологий, что в существенной степени определяет актуальность настоящего исследования.

Возникающие проблемы энергоресурсосбережения и экобезопасности в системах водоподготовки в энергетических комплексах могут быть решены с помощью кавитационной технологии, основанной на использовании эффектов кавитации и являющейся по своей сути экологически чистой. Однако вопросы изменения физико-химических свойств воды (реологических, структурных и др.) и их влияния (на макроуровне) на ход и результат технологических процессов на современном этапе изучены недостаточно.

В связи с этим возникает много важных вопросов: о нахождении устойчивых режимов обработки воды, о влиянии кавитационного воздействия на физико-химические характеристики и релаксацию полученных свойств и др., ответы на которые должны быть найдены в процессе всесторонних исследований.

Работа выполнена в рамках научных исследований по Всероссийской программе «Энергосбережение Минобразования РФ» в 2003–2005 гг.

Основная идея диссертационного исследования заключается в комплексном использовании эффектов кавитации в процессах обработки воды в энергетических системах с целью обеспечения наилучших технико-

экономических показателей (параметров) новых технологических решений на стадии проектирования.

Объект исследования – оборудование для обработки воды в энергетических комплексах.

Предмет исследования – технологические процессы обработки и коррекции свойств воды из поверхностных источников.

Цель диссертационной работы: усовершенствовать технологию обработки воды в энергетических системах и комплексах для повышения энергоэффективности работы тепловых сетей за счет использования эффектов кавитации.

Задачи исследований:

1. На основе представлений физикохимии дисперсных систем провести анализ существующих методов водоподготовки, дать теоретическую оценку существующих технологий и определить направления по повышению их эффективности;

2. Экспериментально определить изменения физико-химических свойств воды в зависимости от качественного состава (дистиллят, водопроводная вода) и параметров кавитационного воздействия (чисел кавитации, геометрии оборудования, температуры и т. п.);

3. Установить длительность и степень релаксации измененных физико-химических свойств воды в зависимости от режимов обработки с максимальным кавитационным эффектом;

4. Разработать энергоэффективные технологические режимы кавитационного метода коррекции физико-химических характеристик воды в энергетических системах и комплексах;

5. На основе математического моделирования с учетом экспериментальных данных разработать методику проектирования технологического оборудования для обработки воды в тепловых сетях.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

1. Впервые показана возможность эффективного применения кавитационной технологии в процессе обработки воды и коррекции ее физико-химических характеристик в энергетических системах;

2. Разработана и реализована математическая модель суперкавитационного течения в технологическом аппарате обработки воды, основанная на полученных экспериментальных данных и учитывающая вязкость, сжимаемость и двухфазность потока;

3. Установлены зависимости, определяющие влияние режимных параметров кавитационной обработки (температуры, давления, скорости и времени обработки, числа кавитации, воздухосодержания и др.) на физико-химические свойства воды (электропроводность, pH среды, окислительно-восстановительный потенциал, кислородосодержание), позволяющие использовать их при разработке режимов обработки воды;

4. Найдены закономерности релаксации физико-химических характеристик активированной воды в зависимости от температуры, давления, числа кавитации и времени кавитационной обработки;

5. Разработаны энергосберегающие технологические режимы и метод проектирования технологического оборудования для обработки воды с использованием кавитации, позволяющие достигать положительных эффектов в областях энергоресурсосбережения и экологической безопасности производств.

Практическая значимость и использование результатов работы. Предложенный метод коррекции физико-химических характеристик воды с использованием эффектов кавитации обеспечивает интенсификацию технологии обработки и коррекции свойств воды, расширяет ее возможности, является существенным шагом по ее усовершенствованию и может быть использован в других отраслях производства (например при очистке сточных вод или кондиционирования вод питьевого назначения и т.д.).

Разработанная новая технология обработки воды для тепловых сетей, а также методика проектирования технологического оборудования использована на энергетических предприятиях ООО «Красноярский жилищно-коммунальный комплекс».

Математические модели суперкавитационных течений в технологических аппаратах включены в курс лекций «Водоподготовка» для студентов ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Теплоэнергетика».

Достоверность полученных результатов в диссертационной работе, выводов и рекомендаций обеспечивается применением общенаучных методов исследования и подтверждается метрологическими характеристиками использованного оборудования и приборов. Основные выводы рекомендации подтверждены сопоставлением экспериментальных и теоретических данных и не противоречат физическим закономерностям.

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

Апробация работы. Основные положения работы, результаты теоретических, вычислительных и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались на: Всероссийской НПК «Красноярск. Энергосбережение: проблемы и перспективы» (Красноярск, 2000), II и III Всероссийской НПК с международным участием «Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов» (Красноярск, 2000; 2001), Всероссийской НПК «Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения» (Красноярск, 2001; 2002, 2003; 2004; 2005; 2006), Всероссийской НПК «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (Красноярск, 2005).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из которых 2 статьи в периодических изданиях из перечня ВАК, 2 – в сборниках научных трудов, 8 работ в материалах Всероссийских научно-технических конференций.

Объем и структура работы. Материалы диссертации изложены на 206 страницах основного текста, включающих 56 рисунков и 32 таблиц. Работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников из 300 наименований и приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность, поставлена цель и определены задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость.

Первый раздел посвящен анализу объекта исследования и современного состояния проблемы. Рассмотрены основные физико-химические свойства воды. Почти все физико-химические свойства воды – исключения в природе, что объясняется наличием водородных связей и структуры в жидком состоянии. Этим обусловлена и высокая растворяющая способность воды. В. И. Классен выявил, что примеси, находящиеся в воде, влияют на ее структуру и, следовательно, на ее физико-химические свойства.

Для удовлетворения требований к качеству воды, потребляемой при транспортировке тепловой энергии, возникает необходимость физико-химической обработки природной воды. В наиболее известных классификациях Л. Л. Кульского и М. И. Лапшина приведен обширный перечень примесей, которые должны быть удалены из воды, а также методы, применяемые при ее обработке в теплоэнергетике.

В последние десятилетия путем различных физических воздействий на воду стало возможно получение новых ее физико-химических свойств, способных сохраняться достаточно для практического использования время. Получаемую воду стали называть активированной или модифицированной. При этом активность растворов, смесей, электролитов и т.д., зависит от различных внешних факторов.

Изменение структуры и, следовательно, физико-химических свойств воды рассмотрено в работах Э. В. Миллера, В. И. Классена и др. по омагничиванию водных систем, Ф. А. Летникова и др. – по термической активации, Ю. А. Сикорского, И. К. Никишина – по исследованиям свойств талой воды и др. Время релаксации модифицированной воды может составлять от нескольких минут до нескольких лет, в зависимости от метода воздействия и условий хранения.

Целый ряд методов обработки воды основан только на механическом воздействии. Физико-химические аспекты изменения свойств воды с использованием ультразвуковых генераторов кавитации рассмотрены в работах С. П. Зубрилова, М. А. Маргулиса. В работах В. М. Ивченко, В. А. Кулагина, А. Ф. Немчина и др. рассмотрены различные аспекты гидродинамической кавитации, выявлены достоинства и недостатки аппаратов кавитационной технологии. Установлено, что общими недостатками ультразвуковых аппаратов является то, что режимы кавитации выражены недостаточно сильно, причем наибольшая степень развития пузырьковой кавитации наблюдается у поверхностей рабочих органов аппарата, что приводит к их быстрому износу и к малоэффективному воздействию. Работа проточных аппаратов связана с трудностями регулирования интенсивности кавитационного воздействия.

Физическое моделирование кавитационных течений и воздействий основано на идеях и исследованиях Г. В. Логвиновича, Р. Кнеппа, В. М. Ивченко, В. А. Кулагина и др. В исследование искусственных кавитационных течений внесли вклад ученые: А. Ф. Болотин, А. А. Бутозов, Л. А. Эпштейн и др., работы которых в значительной степени раскрыли физические процессы, характеризующие явление кавитации, и позволили установить ряд закономерностей. Теоретическим и экспериментальным исследованиям начальной стадии кавитации, в частности статике и динамики одиночного пузырька в безграничной жидкости и вблизи стенки, посвящены работы В. К. Андреева, Херринга и др. Однако при проектировании технологических аппаратов для различных производств с применением гидротермодинамических эффектов кавитации и необходимости учета специфических особенностей конкретного технологического процесса не всегда удается воспользоваться предложенными формулами и методами. Существующие теория и методы расчета развитых кавитационных течений не позволяют с достаточной точностью рассчитать суперкавитационный аппарат.

Несмотря на многообразие исследований изменения физико-химических свойств воды, прошедшей кавитационную обработку, в литературных источниках отсутствуют сведения о продолжительности метастабильного состояния обработанной воды, что влечет за собой необходимость исследования процессов релаксации свойств воды. Специфика определенного круга задач, связанных с применением кавитации при водоподготовке в энергетических системах и комплексах обуславливает необходимость подробных исследований в этом направлении.

Результаты проведенного анализа литературных источников подтверждают актуальность выбранной темы диссертационного исследования и целесообразность решаемых задач.

Во втором разделе рассмотрены физические характеристики жидкости, оказывающие различное влияние на интенсивность кавитационного воздействия, увеличивая либо уменьшая скорость кумулятивных струек. Увеличение вязкости и плотности снижает интенсивность кавитационного воздействия; силы поверхностного натяжения ускоряют коллапс пузырьков; наличие растворенных и нерастворенных газов в жидкости замедляет этот процесс, демпфируя соударения стенок пузырька. Поэтому дегазация жидкости служит одним из способов усиления «жесткости» кавитационного воздействия.

Изменение условий проведения технологических процессов также может существенно влиять на интенсивность кавитационного воздействия, а следовательно, и на скорость протекания соответствующего процесса. Например, снижение температуры и давления насыщенных паров повышает интенсивность кавитационного воздействия. Повышение давления, как было показано выше, увеличивает скорость кумулятивной струйки при схлопывании пузырька, однако при значительном повышении статического давления трудно получить режимы развитой кавитации.

Выявлено, что учет влияния сил вязкости и поверхностного натяжения целесообразен для жидкостей со значительно большей вязкостью и поверхностным натяжением, чем у воды. Значительно большее влияние на скорость замыкания кавитационных пузырьков, особенно на последней стадии, оказывает концентрация газа, которая в растворе пропорциональна давлению газа над свободной поверхностью.

Учет реальных свойств потока при проектировании различных механизмов и оборудования, в которых используется кавитация для достижения определенного технологического эффекта, приводит к необходимости использовать математические модели движущейся среды, в которых бы учитывалась ее двухфазность. В энергетике к воде, как к теплоносителю предъявляется ряд специфических требований, от строгого выполнения которых зависит работоспособность систем водоподготовки в целом. В этой связи необходимо при разработке математических моделей и расчетных схем обеспечить решение задачи максимального кавитационного воздействия в технологическом аппарате уже на стадии его проектирования.

В данном разделе рассмотрена краевая задача обтекания телесного профиля потоком сжимаемой жидкости на малых отстояниях от опорной поверхности, что является развитием существующих методов расчета суперкавитационных течений для технологических аппаратов (А. П. Вильченко, В. М. Ивченко, В. А. Кулагин и др.). Изучался дозвуковой диапазон течений. При решении задачи использован метод малых возмущений.

Краевая задача в декартовой системе координат, связанной с профилем, в которой ось Ox направлена на скорости набегающего потока, формулируется в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 (\alpha^2 - \Phi_x^2)\Phi_{xx} - 2\Phi_x\Phi_y\Phi_{xy} + (\alpha^2 - \Phi_y^2)\Phi_{yy} &= 0; & q \in \Omega; \\
 \alpha^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = \gamma \frac{P}{\rho}; \alpha^2 / (\gamma - 1) + V^2 / 2 = \alpha_\infty^2 / (\gamma - 1) + V_\infty^2 / 2; & q \in S; \\
 \Phi_{y^\pm}(x, y^\pm, (x)) / \Phi_{x^\pm}(x, y^\pm, (x)) = tg \alpha_m(x); & q \in \Omega; \\
 P = P_\infty (1 + 0,5 \cdot (\gamma - 1) M_\infty^2 (1 - V^2 / V_\infty^2))^{\gamma / (\gamma - 1)}; & q \in L; \\
 [P]_L = 0; [V]_L = fin; V_n = 0; \nabla y_h = -h; \nabla \Phi \rightarrow \bar{V}_\infty; & q \rightarrow -\infty,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где Φ - потенциал скорости; P - давление и ρ - плотность, связанные уравнением адиабаты; α - скорость звука; γ - показатель адиабаты; M_∞ - число Маха невозмущенного потока; α_m - местный угол атаки.

Введем потенциал возмущенных скоростей в связанной системе координат:

$$\Phi(x, y) = V_\infty (x \cos \alpha + y \sin \alpha) + \varphi(x, y), \tag{2}$$

где V_∞ - скорость набегающего потока; α - угол атаки.

В случае первого приближения по углу атаки представление потенциала скоростей в связанной и скоростной системах координат, при стационарном обтекании, одинаково:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-1}^{+1} \chi(s, \varphi) \left\{ \frac{1}{\xi - s} - G_1 \right\} ds = -F_{cp}(\xi, \varphi) - \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^{+1} \chi(s, \varphi) G_2 ds \tag{3}$$

где $\chi(s, \varphi)$ и $F_{cp}(\xi; \varphi)$ считаются заданными, а ядра для тонкого профиля можно представить в форме:

$$\begin{aligned}
 G_1 &= (\xi - s) / \Delta; \quad G_2 = 4\bar{h}_1 / \Delta; \\
 \Delta &= (\xi - s)^2 + 16\bar{h}_1^2; \quad \bar{h}_1(\eta) = 0,5\bar{h}(\eta)K.
 \end{aligned}$$

Если ограничиться линеаризованной постановкой, то можно непосредственно определить суммарные АДХ: коэффициенты подъемной силы и момента тангажа по формулам:

$$C_y^{(n)} = \int_{-1}^{+1} \gamma^{(n)}(s) ds; C_m^{(n)} = \int_{-1}^{+1} \gamma^{(n)}(s) s ds. \quad (4)$$

С помощью преобразования координат краевая задача для нелинейного дифференциального уравнения переводится в краевую задачу для уравнения Лапласа в плоскости $\{\xi, \eta\}$, где ее решение сводится к нахождению решения сингулярного интегрального уравнения.

Полученное решение о влиянии ограничивающих поверхностей подставляется в математическую модель суперкавитационного обтекания клиновидного кавитатора, разработанную В. А. Кулагиным. Реализация данного метода позволяет учитывать влияние стенок технологических аппаратов водоподготовки на стадии проектирования.

В третьем разделе изложена методика экспериментального исследования, дано описание лабораторных стендов и измерительного оборудования.

Для оценки эффективности кавитационной обработки использовался ряд физико-химических показателей воды: температура; концентрация растворенного кислорода (КРК); показатель pH; электропроводность; окислительно-восстановительный потенциал.

На рисунке 1 показан внешний вид кавитационного миксера с блоком управления и питания. Мощность двигателя составляет 1 кВт, объем рабочей камеры $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$. В качестве рабочего органа используется двухлопастная крыльчатка с клиновидным профилем, с углами раскрытия клина от 10 до 90°. Рабочие числа оборотов регулируются до 14000 об/мин., что обеспечивает получение чисел кавитации до $\chi = 0,005$. Схема управления позволяет плавно изменять частоту вращения ротора, поддерживать число оборотов независимо от изменяющейся нагрузки и фиксировать время обработки.



Рисунок 1 – Общий вид суперкавитационного миксера

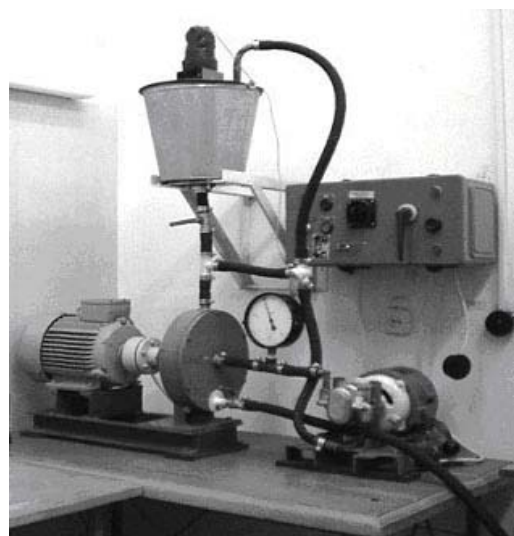
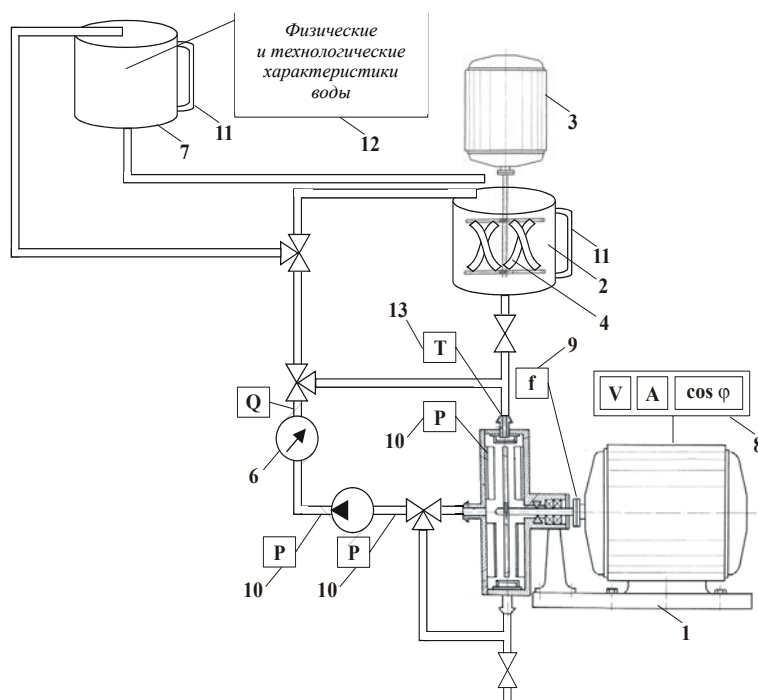


Рисунок 2 – Внешний вид экспериментального стенда

На рисунках 2 и 3 показаны внешний вид и схема стенда. Мощность электродвигателя 4 кВт, объем рабочей камеры составляет $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$, скорость вращения четырехлопастного клиновидного кавитатора составляет 4000 об/мин. Для измерения физико-химических показателей воды использовался анализатор растворенного кислорода «МАРК-201» и 4-параметровый прибор «Water Test». Оценка погрешности подтвердила удовлетворительную точность полученных результатов.



1 – кавитационный смеситель ; 2 – емкость с исходным продуктом; 3 – электродвигатель; 4 – механический гомогенизатор; 5 – насос; 6 – расходомер; 7 – контрольная емкость; 8 – блок измерения электрических параметров привода кавитационного аппарата; 9 – блок измерения частоты вращения; 10 – блок измерения давления; 11 – уровнемер; 12 – измерительно-лабораторный комплекс для определения характеристик воды; 13 – блок измерения температуры

Рисунок 3 – схема стенда для кавитационной обработки воды

В четвертом разделе излагаются результаты экспериментальных исследований. Приведены результаты влияния кавитационной обработки на свойства воды. Рассмотрено применение кавитационной технологии в процессе водоподготовки и других отраслях техники и производства с целью определения энергоресурсосберегающего и иных эффектов, что позволило получить ряд основных и дополнительных результатов.

Установлено, что в результате гидродинамической обработки воды ее физико-химические характеристики существенно изменяются, что позволяет использовать модифицированную воду в технологических процессах водоподготовки и коррекции свойств воды в энергетических комплексах. На рисунках 4–8 представлены результаты серии опытов по определению влияния

кавитационного воздействия на физико-химические свойства воды при условии максимального кавитационного эффекта.

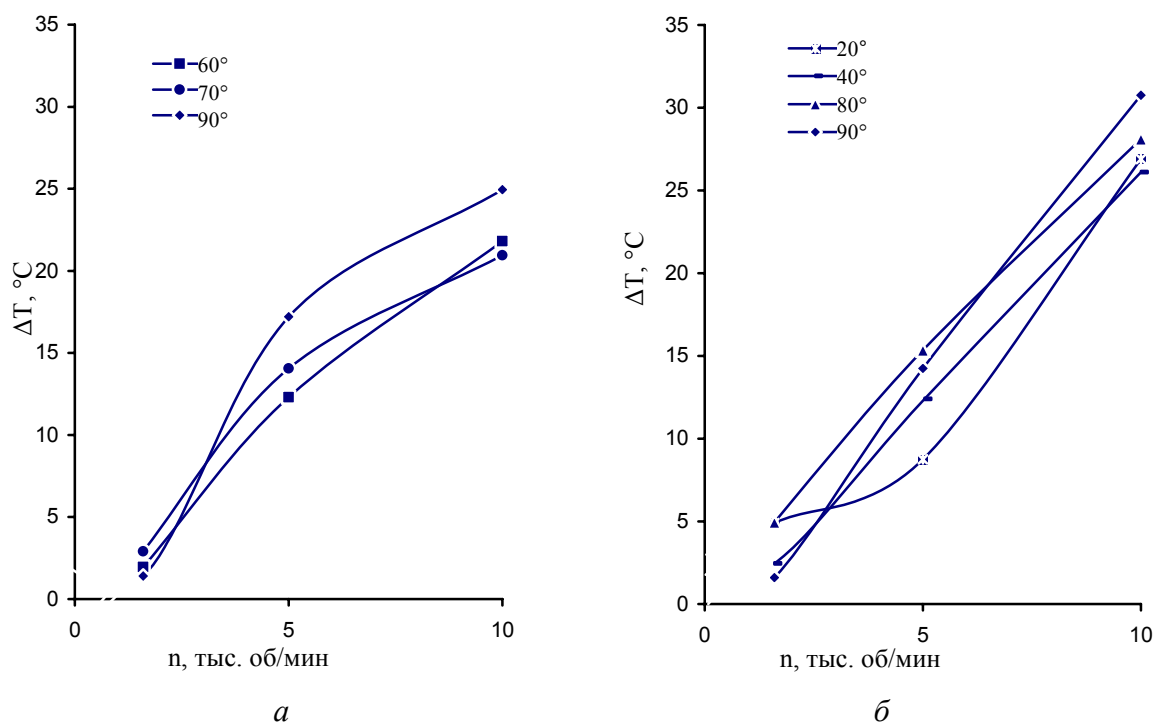


Рисунок 4 – Зависимость изменения температуры воды от частоты вращения ротора: а – дистиллированная вода, б – отстоявшаяся водопроводная вода

В случае обработки воды с частотой вращения ротора 1600 об/мин преобладающее значение имеет кинетический механизм, оказывающий влияние на повышение температуры (рисунок 4), а в остальных случаях (при 5000 и 10000 об/мин) повышение температуры происходит за счет кавитационных эффектов, которые более четко проявляются с уменьшением числа кавитации (0,14 и 0,035, соответственно).

В процессе кавитационной обработки воды происходит увеличение электропроводности. Максимальное увеличение электропроводности дистиллированной воды, соответствующее значению $28,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, схоже с увеличением электропроводности при термической активации с нагревом до 200°C и связано с диссоциацией молекул воды на катионы водорода и анионы гидроксила. Наиболее значительное увеличение электропроводности отстоявшейся водопроводной воды связано, как с диссоциацией молекул воды, так и с ионизацией примесей (рисунок 5).

Уменьшение концентрации растворенного кислорода (рисунок 6) происходит вследствие действия как теплового (закрывающийся в снижении растворимости кислорода в воде с ростом температуры), так и химического (закрывающийся в присоединении ионов кислорода к ионам гидрооксония) факторов.

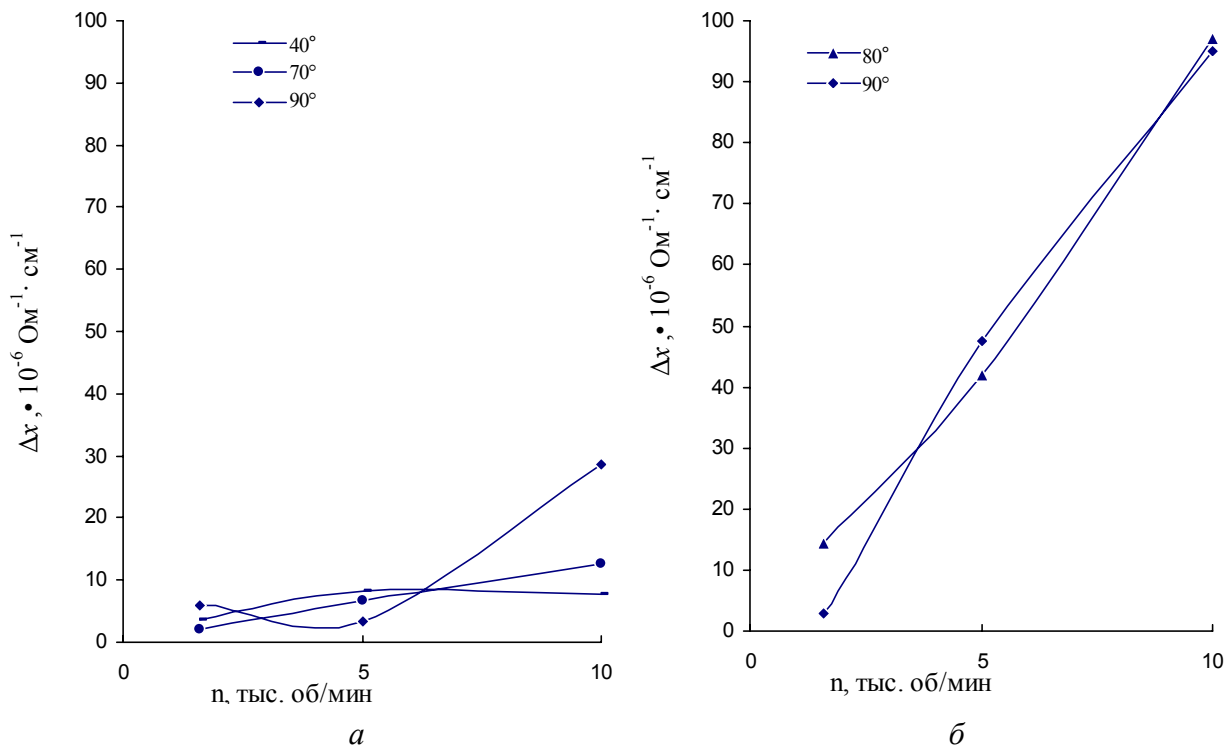


Рисунок 5 – Влияние частоты вращения ротора на изменение электропроводности воды: *а* – дистиллированная вода, *б* – отстоявшаяся водопроводная вода

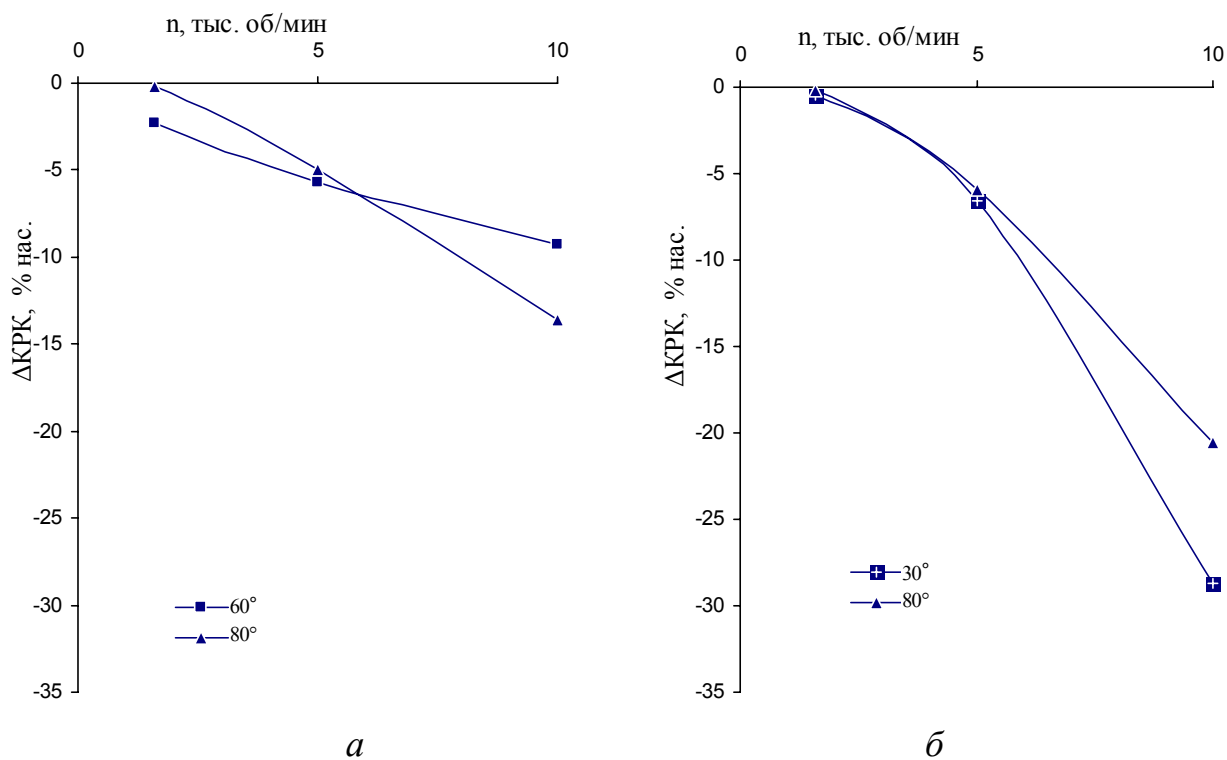


Рисунок 6 – Изменение кислородосодержания воды: *а* – дистиллированная вода, *б* – отстоявшаяся водопроводная вода

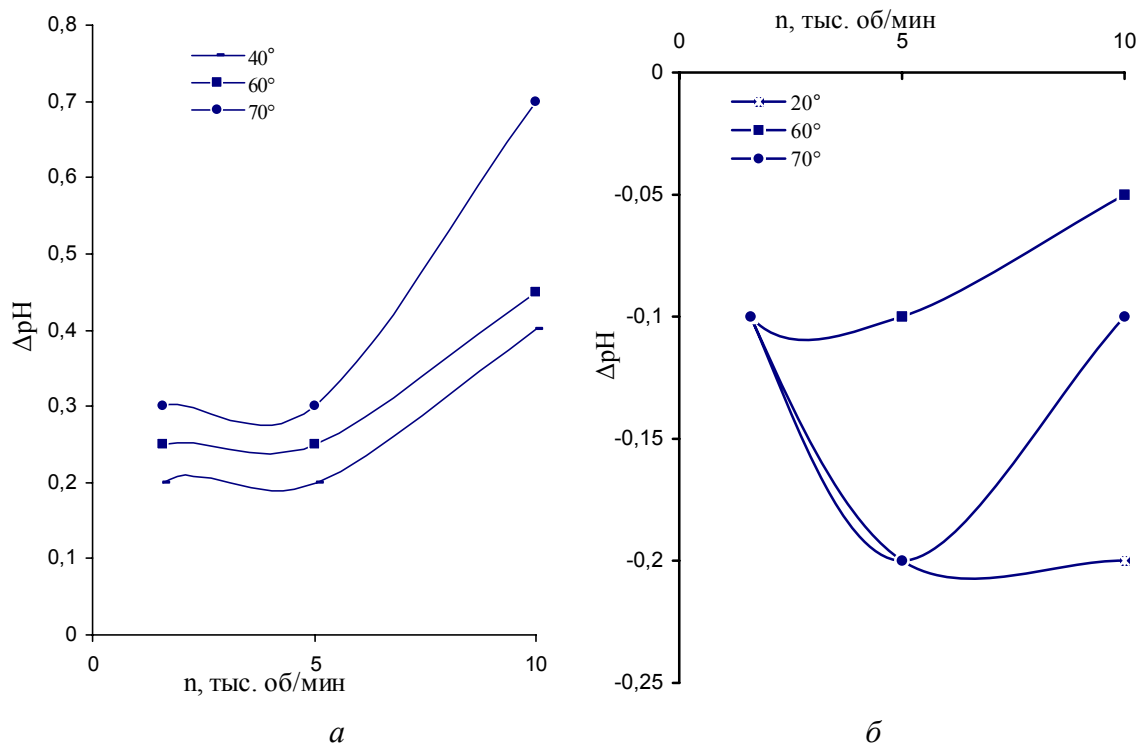


Рисунок 7 – Изменения показателя рН воды:
a – дистиллированная вода, *б* – отстоявшаяся водопроводная вода

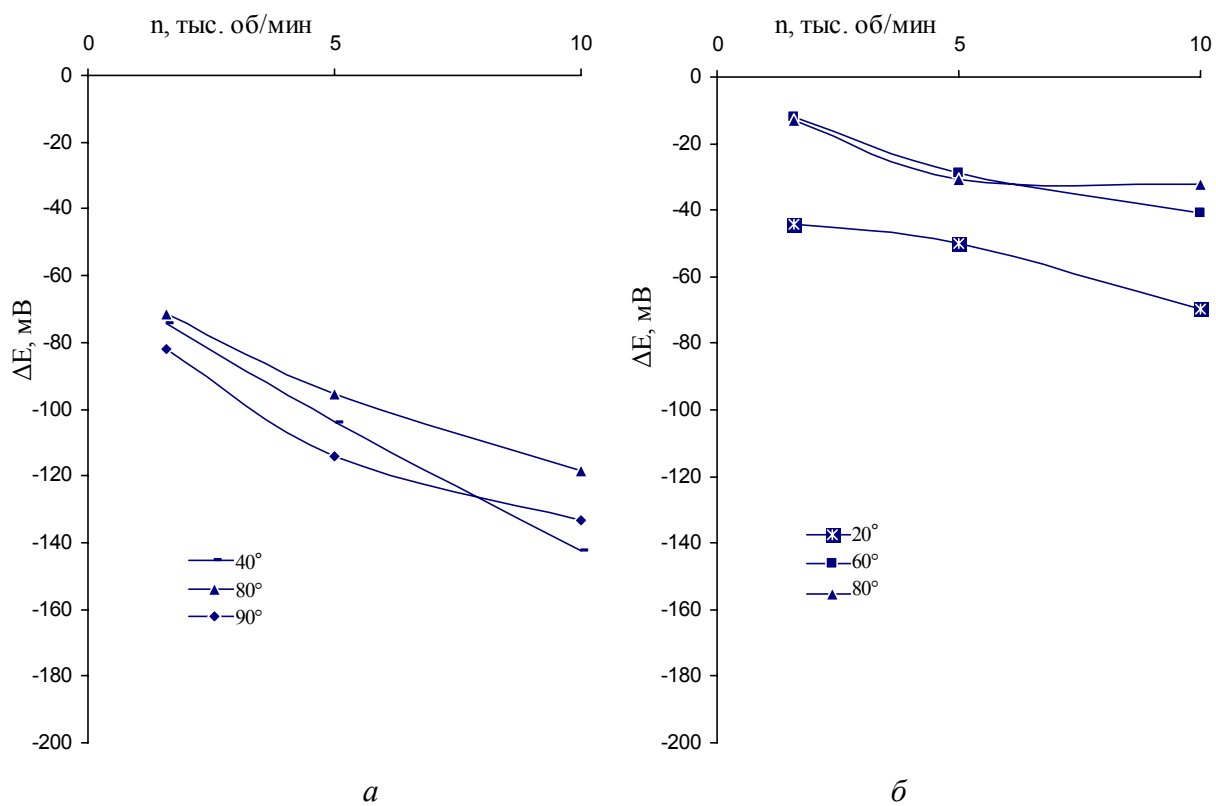


Рисунок 8 – Зависимость изменения окислительно-восстановительного потенциала воды: *a* – дистиллированная вода, *б* – отстоявшаяся водопроводная вода

Вследствие присоединения ионов кислорода к ионам гидрооксония происходит повышение концентрации ионов гидроксила, что выражается в повышении рН (рисунок 7 а).

Уменьшение окислительно-восстановительного потенциала воды в результате гидродинамической обработки (рисунок 8) доказывает протекание реакций:



что выражается в повышении щелочных свойств.

Выявлено, что зависимости изменения физико-химических свойств от режима обработки имеют подобный характер для всех типов воды, а степень изменения пропорционально увеличению частоты вращения ротора, следовательно уменьшению числа кавитации. Максимальное влияние кавитационного воздействия наблюдается при минимальных числах кавитации.

Из анализа экспериментальных данных для каждого типа воды, по изменению всех физико-химических показателей можно сделать следующие выводы:

при обработке дистиллята максимальный кавитационный эффект наблюдается при использовании насадок с углами клина 20, 40, 70, 90 °;

при обработке отстоявшейся водопроводной воды максимальный кавитационный эффект наблюдается при использовании насадок с углами клина 20, 30, 80, 90 °;

при обработке водопроводной воды максимальный кавитационный эффект наблюдается при использовании насадок с углами клина 80, 90 °.

В области релаксации полученных свойств воды установлено:

с течением времени все физико-химические показатели во всех пробах претерпевают значительные изменения (рисунки 9, 10);

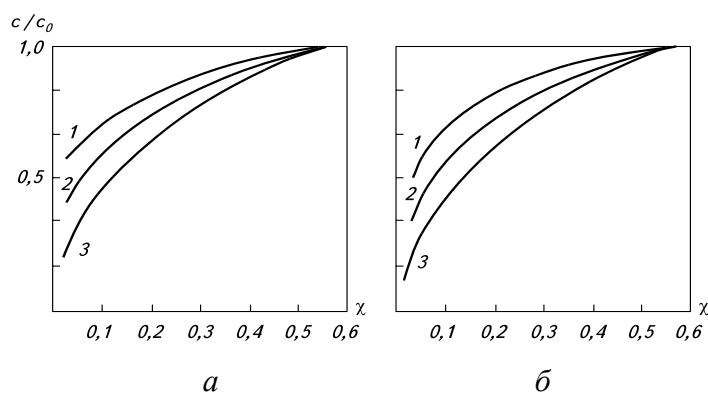
изменения физико-химических показателей в дистиллированной воде несколько отличны от изменения этих показателей в других пробах воды: рН в дистиллированной воде с течением времени уменьшается, но конечные показания рН выше показаний до обработки $\Delta\text{pH} \approx 0,3$. Конечные показания рН в водопроводной отстоявшейся и неотстоявшейся воде значительно меньше показаний до обработки $\Delta\text{pH} \approx -0,8$; конечное значение окислительно-восстановительного потенциала (E) в дистиллированной воде имеет незначительное отличие от начального $\Delta E \approx -30$ мВ. В водопроводной отстоявшейся и неотстоявшейся воде конечные показания E значительно меньше показаний до обработки $\Delta E \approx -210$ и -400 мВ соответственно;

изменения физико-химических показателей в водопроводной отстоявшейся и неотстоявшейся воде подобны и имеют схожий временной ход;

в дистиллированной воде отсутствует определенный временной отрезок стабильного изменения физико-химических показателей: интенсивное изменение КРК происходит в течение 500 ч.; интенсивное изменение рН происходит в течение 300 ч.; интенсивное изменение электропроводности происходит в течение от 1 до 24 ч.; интенсивное изменение окислительно-восстановительного потенциала происходит в течение 48 ч;

в водопроводной отстоявшейся и неотстоявшейся воде соблюдается некоторая закономерность стабильного изменения физико-химических показателей: интенсивное изменение КРК происходит в течение 48 ч.; интенсивное изменение рН происходит в течение от 48 до 72 ч.; интенсивное изменение электропроводности происходит в течение 24 ч.; интенсивное изменение окислительно-восстановительного потенциала происходит в течение от 1 до 24 ч.

В области биологического воздействия представляет интерес влияние бактерицидного воздействия кавитации. В работе изучалось влияние кавитационной обработки в суперкавитационном миксере на содержание кишечной палочки и золотистого стафилококка в питьевой воде. Опыты проводились с клиновидным кавитатором (угол при вершине клина составлял $\alpha=20^\circ$) при температуре от 20 до 22°C. Варьировались число оборотов ротора в диапазоне от 2 до 10 тыс. об/мин и время обработки (τ). Число кавитации (χ), подсчитанное для диаметра крыльчатки, составило от 0,56 до 0,02. Измерения проводились с помощью метода светорассеяния и электронного микроскопа. Результаты эксперимента представлены на рисунке 11.



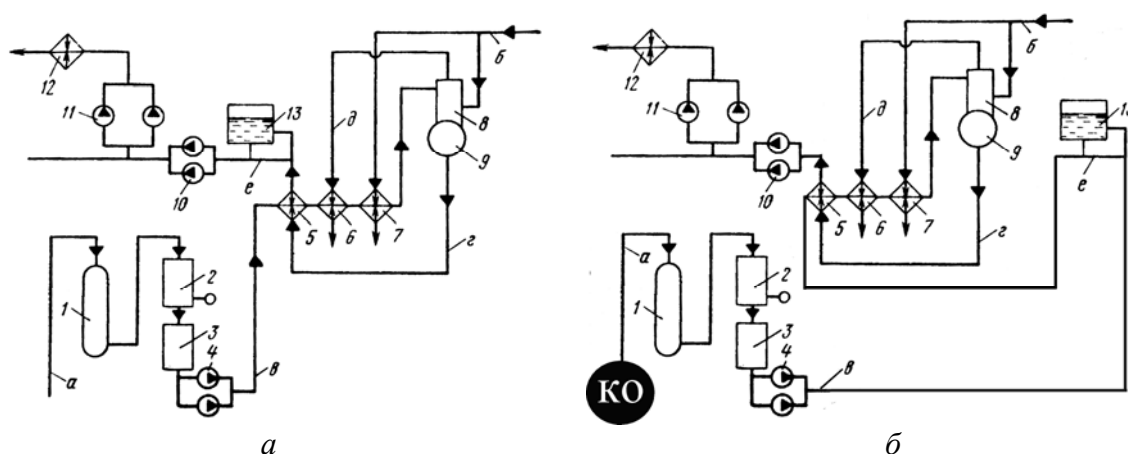
1 – $t = 30$ с; 2 – $t = 60$ с; 3 – $t = 180$ с; C_0 – исходная концентрация

Рисунок 11 – Зависимость безразмерной концентрации c/c_0 от числа кавитации: а – кишечная палочка; б – золотистый стафилококк

Как видно, характер изменения концентрации для кишечной палочки и стафилококка одинаков, близки и количественные характеристики, что, видимо, объясняется примерно одинаковыми характеристиками клеток. Модуль Юнга равен соответственно $\sim 5 \cdot 10^9$ и $4 \cdot 10^8$ дин/см², а предел прочности клеточных оболочек составляет $\sim 10^6 - 10^{11}$ дин/см². Учтя эти данные и уровень расчетных значений при кавитационном воздействии ($P \sim 10000$ атм; $\dot{T} \sim 10^{11}$ К/с; $T \sim 2000$ К; $P_m \sim 10^8$ Па), можно сделать заключение о достаточности силового воздействия для разрушения клеточного материала. Эти результаты хорошо согласуются с работами С. А. Есикова в этой области.

Существенное влияние кавитационного воздействия на физико-химические свойства и биологические показатели позволяют использовать эту технологию в системах водоподготовки и кондиционирования вод из поверхностных источников. Экспериментальные результаты по релаксации физико-химических свойств воды, прошедшей кавитационную обработку дают основание рекомендовать применение обработанной воды по истечении 48 часов, т. к. в течении этого времени происходит существенная дегазация.

Рекомендуется применять кавитационную обработку подпиточной воды на стадии водоподготовки (рисунок 12), а так же применять оборудования кавитационной технологии для горячего водоснабжения в открытых системах непосредственно перед потребителем.



1 – катионитовый фильтр; 2 – декарбонизатор; 3 – бак умягченной воды; 4 – насосы; 5 – охладитель деаэрированной воды; 6 – охладитель выпара; 7 – пароводяной подогреватель; 8 – деаэрационная головка; 9 – бак деаэрированной воды; 10 – подпиточные насосы; 11 – сетевые насосы; 12 – теплофикационный подогреватель; 13 – аккумулятор; а – сырая вода; б – греющий пар; в – холодная умягченная вода; г – горячая деаэрированная вода; д – выпар; е – охлажденная деаэрированная вода.

Рисунок 12 – Принципиальная схема установки для обработки подпиточной воды Н-катионированием и деаэрацией: а – до рекомендуемой реконструкции; б – после рекомендуемой реконструкции

Применение эффектов кавитационной обработки на стадии очистки позволяет получить следующие результаты:

повышение температуры позволяет кондиционировать сырую воду до благоприятного термического режима при умягчении;

уменьшение кислородосодержания воды приводит к повышению качества и интенсивности деаэрации;

высокая степень дегазации воды в процессе ее обработки после активации, позволяет рекомендовать применение деаэраторов после аккумуляторов по схеме на рисунке 12.

Применение кавитаторов проточного типа непосредственно перед потребителем для горячего водоснабжения в открытых системах позволяет получить следующие эффекты:

повышение температуры позволяет снизить затраты на подогрев теплоносителя;

обеззараживающее действие кавитации позволяет доставлять до потребителя воду питьевого качества.

Такие кавитационные эффекты, как дегазация и повышение температуры и обеззараживание позволяют рекомендовать внедрение оборудования кавитационной технологии в системы теплоснабжения и горячего водоснабжения. В этом случае достигается экономический эффект, складывающийся из экономии средств на проведение ремонтных работ тепломагистралей и предотвращенного экологического ущерба.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе комплексного анализа и обобщения результатов исследования разработана усовершенствованная технология водоподготовки применительно к энергетическим системам и комплексам. К наиболее значимым относятся следующие результаты, составляющие в совокупности научную и практическую основу применения кавитации в технологических процессах водоподготовки:

1. Установлено, что при воздействии на воду полей высоких давлений (до 100 МПа) и температур (до 2000 °С), возникающих при схлопывании кавитационных микропузырьков, происходит явление механотермолиза – в воде инициируются механохимические реакции, в результате деструкции образуются свободные водородные связи, что в свою очередь влечет за собой изменение электропроводности, кислородосодержания, рН среды и окислительно-восстановительного потенциала, которое возможно использовать с высокой степенью эффективности в процессах водоподготовки в энергетике и других отраслях производства;

2. Выявлено, что наибольшая интенсивность кавитационного воздействия осуществляется при числах кавитации $\chi \approx 0,035$, что соответствует размерам кавитационных пузырьков (R) от 20 до 50 мкм, характеризующихся наибольшей эффективностью воздействия; определены оптимальные режимы обработки с максимальным кавитационным эффектом, которые необходимо учитывать при проектировании оборудования для водоподготовки;

3. Определены время и степень релаксации модифицированных свойств воды (для различных условий оно находится в интервале от 1 до 500 часов), что позволяет использовать их в различных технологических процессах и при проектировании техники и технологии обработки воды в энергетике;

4. Выявленные закономерности изменения физико-химических свойств дистиллированной и водопроводной воды (примеси, содержащиеся в водо-

проводной воде усиливают изменение физико-химических свойств) и другие экспериментальные результаты наряду с использованием усовершенствованной математической моделью суперкавитационного течения в технологическом аппарате легли в основу предложенного метода проектирования техники и технологии обработки воды в энергетических комплексах для повышения эффективности работы тепловых сетей;

5. Рекомендации по применению кавитационной технологии для коррекции физико-химических характеристик воды промышленного назначения позволяют снизить капитальные затраты и интенсифицировать процессы при транспорте тепловой энергии, а также использовать предложенные методы в областях водоснабжения и водоотведения в системах кондиционирования воды и очистки стоков.

Основное содержание работы отражено в публикациях:

1. **Криволицкий, А. С.** Изменение окислительно-восстановительного потенциала воды в результате кавитационной обработки / **А. С. Криволицкий, В. А. Кулагин** // Вестник КрасГАУ, 2007. – №2 (17). С. 139–146.

2. Кулагин, В. А. Повышение энергоэффективности водоподготовки на ТЭС и котельных с использованием кавитационной технологии / В. А. Кулагин, **А. С. Криволицкий**. // Энергосбережение и водоподготовка, 2007. – № 4. – С. 85–88.

3. Кулагин, В. А. Экспериментальный стенд для получения высокодисперсных эмульсий (суспензий) / В. А. Кулагин, **А. С. Криволицкий, А. Ю. Радзюк** // Вестник Ассоциации выпускников КГТУ. Вып. 4. – Красноярск: КГТУ, 2000. – С. 77–79.

4. **Криволицкий, А. С.** Возможности ресурсосбережения на базе кавитационной технологии / **А. С. Криволицкий** // Красноярск. Энергосбережение: проблемы и перспективы: Материалы Всеросс. НПК. – Красноярск, 2000. – С. 130–131.

5. Кулагин, В. А. Некоторые аспекты влияния физико-химических факторов на механические характеристики продукта в процессе диспергирования / В. А. Кулагин, **А. С. Криволицкий** // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Труды Всеросс. НПК. Вып. VII. – Красноярск: Красноярское краевое НТО, 2001. – С. 102–118.

6. Кулагин, В. А. Решение задачи обтекания профиля ограниченным потоком сжимаемой жидкости / В. А. Кулагин, А. П. Вильченко, **А. С. Криволицкий** // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всеросс. НПК. Вып. VIII. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. – С. 107–130.

7. **Криволицкий, А. С.** Изменение физико-химических свойств воды под воздействием гидродинамической кавитации / **А. С. Криволицкий, В. А. Кулагин** // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всеросс. НПК. Вып. IX. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – С. 61–74.

8. **Криволуцкий, А. С.** Релаксация физико-химических свойств воды, прошедшей обработку гидродинамической кавитацией / **А. С. Криволуцкий, В. А. Кулагин** // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всеросс. НТК. Вып. X. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – С. 22–29.

9. **Криволуцкий, А. С.** Использование эффектов кавитации для кондиционирования вод различного назначения / **А. С. Криволуцкий** // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всеросс. НТК. Вып. XI. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – С. 97–103.

10. **Криволуцкий, А. С.** Применение кавитационной технологии для кондиционирования воды в теплоэнергетике / **А. С. Криволуцкий** // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы VI Всеросс. НТК. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – С. 250–258.

11. **Криволуцкий, А. С.** Применение кавитационной технологии для нагрева воды в системах отопления и горячего водоснабжения / **А. С. Криволуцкий** // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всеросс. НТК. Вып. XII. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – С. 101–107.

12. **Криволуцкий, А. С.** Применение кавитационной технологии в бытовом водоснабжении / **А. С. Криволуцкий** // Труды КГТУ. Вып. 2–3. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – С. 148–154.

Криволуцкий Алексей Сергеевич

Совершенствование технологии водоподготовки в энергетических системах

Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Подписано в печать 01.10.2007 Заказ № 842/2

Формат 60 × 90/16. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИПЦ Политехнического института
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

660074, Красноярск, ул. Киренского, 28