

СИВУХИНА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АЭРАЦИИ ВОДЫ
В ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ
ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Специальность 05.14.14

“Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Казань 2001

Работа выполнена в Ульяновском государственном техническом университете.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Шарапов В. И.

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор

Чичирова Н.Д.

доктор технических наук, профессор

Шищенко В.В.

Ведущая организация:

Всероссийский теплотехнический
научно-исследовательский институт

Защита состоится “21” июня 2001 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 при Казанском Государственном Энергетическом Университете по адресу: г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Б-214.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим отсылать по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Ученый Совет КГЭУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “17” мая 2001 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент

Конахина И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы в связи с общим удорожанием и дефицитом топлива на тепловых электрических станциях (ТЭС) вопросы энергосбережения являются чрезвычайно актуальными. Для достижения экономии топливозергетических ресурсов и уменьшения вредных выбросов в окружающую среду необходимо радикальное совершенствование технологических процессов, осуществляемых на ТЭС и других теплоэнергетических предприятиях.

Одной из наиболее острых проблем, возникающих при эксплуатации систем теплоснабжения и теплоэнергетических установок, является внутренняя коррозия, которая приводит к сокращению срока эксплуатации оборудования и трубопроводов тепловых сетей, ТЭС и котельных.

Основной причиной, вызывающей внутреннюю коррозию, является присутствие в воде коррозионно-активных газов – диоксида углерода и кислорода. Для удаления этих газов широко используются вакуумные деаэраторы, однако возможности удаления диоксида углерода в этих аппаратах при пониженных параметрах воды ограничены. Поэтому в установках с вакуумной деаэрацией необходимо в качестве первой ступени десорбции диоксида углерода применять декарбонизаторы, эффективность работы которых непосредственно влияет на эффективность дальнейшего удаления CO_2 в вакуумных деаэраторах.

Декарбонизаторы являются достаточно энергоемкими аппаратами. Для их работы необходимы затраты энергии на нагрев воды и на подачу десорбирующего агента – воздуха, которые зависят от устанавливаемой температуры воды и требуемого расхода воздуха. Эти параметры процесса поддерживаются постоянными. При анализе работы существующих декарбонизаторов выявлено, что в ряде режимов требуемое качество декарбонизированной воды не достигается, в других - остаточное содержание CO_2 оказывается меньше заданной величины, а затраты на декарбонизацию – завышенными.

Актуальной задачей при проектировании и эксплуатации водоподготовительных установок с вакуумной деаэрацией, решению которой посвящена настоящая работа, является повышение надежности и экономичности работы систем теплоснабжения и теплоэнергетических установок путем обеспечения эффективной противокоррозионной обработки воды в декарбонизаторах ТЭС и котельных.

При использовании артезианских вод на водоподготовительных установках помимо противонакипной и противокоррозионной обработки возникает необходимость обезжелезивания воды. Связано это с тем, что присутствие соеди-

нений железа в подпиточной, сетевой или питательной воде приводит к повышению цветности воды и интенсификации отложений в поверхностях нагрева котлов, теплообменных аппаратах, трубопроводах и арматуре. Для поддержания нормативного значения содержания соединений железа в воде необходимы установка специальных устройств для обезжелезивания воды, и, следовательно, дополнительные капиталовложения и эксплуатационные затраты. Поэтому актуальной задачей при исследовании процесса обезжелезивания является разработка схем водоподготовительных установок, в которых затраты на обезжелезивание будут минимальны.

Аэрация является основой технологических процессов удаления диоксида углерода и обезжелезивания артезианских вод. Процессы обезжелезивания и декарбонизации тесно связаны – удаление соединений двухвалентного железа из артезианских вод возможно только при одновременном удалении диоксида углерода. Это позволило объединить исследование этих процессов в одной работе.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования Российской Федерации «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», подпрограмма «Топливо и энергетика», и гранта Ульяновского регионального отделения Академии наук Республики Татарстан.

Целью работы является повышение надежности и экономичности работы систем теплоснабжения и теплоэнергетических установок путем проведения эффективной противокоррозионной обработки воды в декарбонизаторах и использование энергосберегающей технологии обезжелезивания на водоподготовительных установках ТЭС и котельных.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- проведено экспериментальное исследование декарбонизаторов и получены многофакторные математические модели процесса декарбонизации;
- разработана серия технологий управления процессом декарбонизации, позволяющих обеспечить требуемое качество обработанной воды при минимальных энергетических затратах;
- выполнена оценка энергетической эффективности декарбонизаторов при использовании различных способов управления процессом декарбонизации и определены области применения этих способов;
- выполнено технико-экономическое сравнение физических и химических методов удаления диоксида углерода;
- проведено сравнение массообменной и энергетической эффективности различных типов насадок декарбонизатора и даны рекомендации по выбору ти-

па насадки;

- разработан новый метод определения сопротивления насадки декарбонизатора с помощью аэродинамической характеристики вентилятора;
- определены экспериментальным путем аэрогидродинамические характеристики декарбонизатора и выполнена корректировка методики подбора вентилятора, что позволяет выбирать вентилятор, обеспечивающий необходимый удельный расход воздуха на декарбонизацию во всем диапазоне расходов обрабатываемой воды;
- разработана энергосберегающая технология обезжелезивания воды, позволяющая без дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат обеспечить удаление соединений железа из воды; проведен технико-экономический расчет эффективности этой технологии.

Основные методы научных исследований.

В работе использованы методы активного многофакторного эксперимента, эксергетический метод термодинамического анализа энергоустановок, эвристические методы разработки новых технических решений, методы вычислительной математики, аэрогидродинамики, общей физики и химии.

Научная новизна работы.

1. Впервые экспериментально получены многофакторные математические модели, описывающие процесс декарбонизации с учетом влияния на массообменную эффективность декарбонизации расхода воздуха, подаваемого в декарбонизатор, и начального содержания диоксида углерода.
2. Разработан новый подход к управлению процессом декарбонизации, реализация которого позволяет обеспечить требуемое качество обработанной воды при минимальных энергетических затратах.
3. Разработан новый метод определения сопротивления насадки декарбонизатора с помощью аэродинамической характеристики вентилятора и экспериментально определены аэрогидродинамические характеристики промышленного декарбонизатора.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием современных методов экспериментальных и теоретических исследований, проведением экспериментов в реальных промышленных условиях, патентной чистотой разработанных технических решений.

Практическая ценность работы.

1. Разработаны новые технологии работы декарбонизационных установок, позволяющие осуществить декарбонизацию с минимумом энергетических затрат при обеспечении требуемого качества воды.

2. Разработана энергосберегающая технология обезжелезивания воды, позволяющая удалять соединения железа без дополнительных энергетических и капитальных затрат.

3. Проведено сравнение массообменной и энергетической эффективности различных типов насадок декарбонизаторов, технико-экономическое сравнение физических и химических методов удаления CO_2 и даны рекомендации по выбору оптимального типа насадки и метода удаления CO_2 .

4. Разработана скорректированная методика подбора вентилятора декарбонизатора, которая позволяет выбирать вентилятор, обеспечивающий подачу требуемого количества воздуха во всех режимах работы декарбонизационной установки.

Практическая реализация. На Ульяновских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3, на Саратовской ТЭЦ-5 использованы рекомендации по регулированию расхода воздуха, подаваемого в декарбонизаторы. На Ульяновской ТЭЦ-1 использованы рекомендации по переходу от химического связывания к физической десорбции CO_2 в декарбонизаторах. На Саратовской ТЭЦ-5 приняты к использованию рекомендации по компоновке декарбонизаторов и выбору вентиляторов. Результаты диссертации также используются в учебном процессе при преподавании дисциплины «Водоподготовительные установки систем теплоснабжения».

Апробация работы. Результаты работы представлены на V международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, март 1999 г.), на международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, ИГЭУ, июль 1999 г.), на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава УлГТУ (Ульяновск, 1998 - 2001 гг.), на научно-технической конференции «Инженерные проблемы совершенствования тепло- и электроэнергетических установок коммунального хозяйства» (Ульяновск, УлГТУ, июнь 1999 г.), на межвузовской научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности и надежности систем теплоэнергоснабжения» (Саратов, СарГТУ, 1999 г.), на 4-м Минском международном форуме по тепломассообмену (Минск, НАНБ, май 2000 г.), на Второй Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве» (Ульяновск, УлГТУ, июнь 2000), на Российской межвузовской конференции «Проблемы энергетики России и Поволжья» (Саратов, СарГТУ, ноябрь 2000 г.), на Третьей Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, УлГТУ, апрель 2001 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликована 41 печатная работа (1 монография, 13 статей, 5 полных текстов докладов, 5 тезисов докладов, 17 изобретений).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов, изложенных на 140 страницах машинописного текста, содержит 33 иллюстрации, 11 таблиц, список литературы из 127 наименований, приложения. Общий объем работы составляет 157 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность работы, дано описание структуры диссертации.

Первая глава посвящена анализу литературных данных о свойствах водных растворов диоксида углерода, массообмене в двухфазной среде при декарбонизации и коррозионном воздействии CO_2 . Рассмотрены существующие методы удаления диоксида углерода и соединений железа, основные конструкции декарбонизаторов, аэрогидродинамика насадочных аппаратов, поставлены задачи исследования.

В связи с возрастанием роли декарбонизаторов при широком применении вакуумных деаэраторов в водоподготовительных установках обнаружилось, что имеющихся данных о процессе декарбонизации недостаточно для организации эффективной десорбции свободного диоксида углерода из воды. При проектировании и расчете насадочных декарбонизаторов, как правило, пользуются данными о кинетике десорбции CO_2 , полученными в 50-е годы А. А. Кастальским, обобщенными в виде критериального уравнения.

Модель процесса, предложенная А.А. Кастальским, не позволяет получить отдельные оценки влияния каждого физического параметра или их взаимодействий из-за коррелированности между собой переменных величин, входящих в безразмерные комплексы. В. И. Шараповым были получены многофакторные математические модели процесса в виде зависимости остаточного содержания CO_2 от температуры, расхода и щелочности воды. Однако эти модели не учитывают влияние на эффективность процесса расхода десорбирующего агента – воздуха и начального содержания диоксида углерода. В связи с этим одной из основных задач явилось получение более полных математических моделей процесса декарбонизации путем проведения экспериментального исследования насадочных декарбонизаторов.

В отечественной теплоэнергетике наиболее распространены противоточ-

ные насадочные декарбонизаторы. Однако в последние годы физическую десорбцию CO_2 в декарбонизаторах нередко заменяют химическим связыванием щелочью (едким натром), даже в схемах водоподготовительных установок с подкислением воды, т.е. при значительном начальном содержании CO_2 . Одна из задач исследования заключается в оценке технико-экономической целесообразности замены декарбонизации подщелачиванием.

Декарбонизаторы являются достаточно энергоемкими аппаратами. Анализ процесса декарбонизации воды на ТЭС показал, что в настоящее время при эксплуатации декарбонизационных установок режимные параметры – температуру исходной воды и расход воздуха поддерживают постоянными, независимо от качества и количества обрабатываемой воды, что в ряде режимов приводит к перерасходу энергии на привод вентилятора или на нагрев воды, в других же режимах не обеспечивается требуемое качество декарбонизации. Следовательно, актуальнейшей задачей является разработка технологий декарбонизации, позволяющих исключить эти недостатки.

Анализ литературы по исследованию процесса декарбонизации и опыта промышленной эксплуатации декарбонизаторов показал, что при эксплуатации декарбонизационных установок вентилятор в режиме максимальной производительности декарбонизатора обеспечивает лишь половину своей номинальной производительности, что приводит к ухудшению качества обработанной воды. В связи с отсутствием теоретического и экспериментального обоснования методики выбора вентиляторов для декарбонизаторов поставлена задача экспериментального изучения аэрогидродинамики системы декарбонизатор-вентилятор и корректировки методики выбора вентилятора.

Для обезжелезивания артезианских вод наибольшее распространение получила вакуумно-эжекционная технология И.Г. Комарчева, на осуществление которой требуются значительные затраты, связанные с созданием избыточного давления перед вакуумным эжектором и с установкой самого эжектора. Одной из задач исследования является разработка технических решений, позволяющих осуществить процесс обезжелезивания с минимальными затратами.

Вторая глава посвящена анализу массообменной и энергетической эффективности способов десорбции диоксида углерода.

Методами математической теории эксперимента получены достаточно полные и точные зависимости эффективности десорбции диоксида углерода от гидравлических, тепловых и режимных факторов, на которые может непосредственно воздействовать эксплуатационный персонал электростанций.

На Ульяновской ТЭЦ-1 проведено экспериментальное исследование насадочных декарбонизаторов, при котором удалось оценить влияние на массо-

обменную эффективность декарбонизаторов трех основных режимных факторов: расхода $G_{ов}$ и температуры $t_{ов}$ обрабатываемой воды, и, впервые, расхода воздуха $D_{возд}$, подаваемого в декарбонизатор [30]. В качестве целевой функции принято остаточное содержание свободного диоксида углерода (Y_1). Особенность этого эксперимента в том, что исследовались декарбонизаторы после замены насадки из керамических колец Рашига насадкой из пластмассовых шитов, используемых для оросителей градирен.

Следующим этапом исследования декарбонизаторов стало испытание на Ульяновской ТЭЦ-3 насадочных декарбонизаторов производительностью 550 т/ч, снабженных вентилятором типа Ц4-76 № 8 с номинальной производительностью 14000 м³/ч и напором 1,4 кПа, в котором удалось количественно оценить влияние на эффективность процесса четырех регулируемых режимных факторов: расхода исходной воды $G_{ов}$, температуры исходной воды $t_{ов}$, расхода воздуха на декарбонизатор $D_{возд}$ и начального содержания диоксида углерода в исходной воде $C_{CO_2}^{исх}$ [19, 20]. Особенностью этого исследования является низкий температурный уровень декарбонизации, характерный для эксплуатации водоподготовительных установок в период энергетического кризиса. В качестве определяемых параметров эффективности (целевых функций) декарбонизаторов приняты остаточное содержание диоксида углерода в декарбонизированной воде в мг/л (целевая функция Y_2) и показатель pH декарбонизированной воды (Y_3).

Интервалы варьирования и обозначения факторов в нормированном виде представлены в табл. 1.

Табл 1 Данные для построения планов эксперимента

Целевые функции	Показатель для построения уравнения регрессии	Базовое значение X_{i0}	Интервал варьирования λ_i	Обозначение в нормированном виде
Y_1	$G_{ов}$, т/ч	335	95	X_1
	$t_{ов}$, °C	21	9	X_2
	$D_{в}$, % $D_{ном}$	59	41	X_3
Y_2, Y_3	$G_{ов}$, т/ч	380	140	X_1
	$t_{ов}$, °C	13	5	X_2
	$D_{в}$, % $D_{ном}$	75	25	X_3
	$C_{CO_2}^{исх}$, мг/л	61	50	X_4

При обработке результатов эксперимента получены многофакторные математические модели, описывающие процесс десорбции диоксида углерода в насадочных декарбонизаторах:

$$Y_1 = 16,1 + 1,8X_1 - 2,6X_2 - 2,5X_3 - 0,3X_1X_3 - 0,3X_2X_3, \quad (1)$$

$$Y_2 = 6,13 + 0,54X_1 - 0,73X_2 - 0,47X_3 + 2,53X_4 + 0,37X_1X_4 - 0,23X_2X_4 - 0,14X_3X_4 + 0,14X_1X_2X_3, \quad (2)$$

$$Y_3 = 7,537 - 0,025X_1 + 0,056X_2 + 0,056X_3 - 0,444X_4 + 0,012X_2X_3 + 0,02X_3X_4 + 0,01X_2X_3X_4. \quad (3)$$

Дисперсии воспроизводимости и адекватности для уравнений (1)-(3) равны соответственно 2,118 и 0,17; 0,2475 и 0,1428; 0,00135 и 0,00093.

Коэффициенты уравнений регрессии позволяют определять силу воздействия режимных факторов и их взаимодействий. Из уравнений видно, что изменение каждого исследованного фактора существенно сказывается на работе декарбонизаторов. Наибольшее влияние на эффективность декарбонизации оказывают начальное содержание CO_2 в исходной воде и температура обрабатываемой воды (коэффициенты при X_4 и X_2 в уравнениях 2 и 3). Расход воздуха, подаваемого в декарбонизатор, также оказывает существенное влияние, поскольку коэффициент при X_3 в уравнениях (1), (2) и (3) после математической обработки результатов опытов оказался значимым. В проведенных испытаниях впервые количественно оценено влияние на десорбцию диоксида углерода начального содержания CO_2 и расхода воздуха, подаваемого в декарбонизатор.

При наладке, эксплуатации и анализе работы декарбонизаторов можно пользоваться как непосредственно уравнениями регрессии, так и графической интерпретацией результатов испытания в виде двумерных сечений поверхностей отклика, описываемых этими уравнениями. Так, представление уравнения (1) и уравнения, полученного ранее при испытании этого же декарбонизатора, но с насадкой из керамических колец Рашига в виде зависимостей остаточного содержания CO_2 от температуры и расхода обрабатываемой воды (рис.1), позволяет сравнить массообменную эффективность насадок из керамических колец и пластмассовых щитов [22].

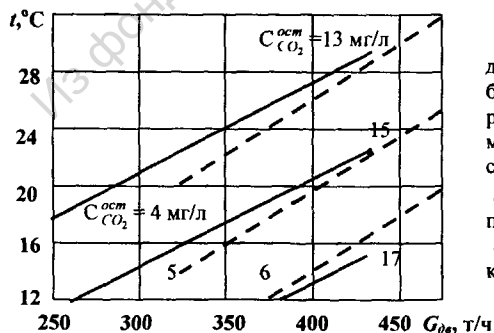


Рис 1 Зависимость остаточного содержания диоксида углерода в декарбонизированной воде от температуры и расхода исходной воды при $III=1,05$ мг-экв/л и 100%-ной производительности вентилятора
 — декарбонизатор с насадкой из пластмассовых щитов,
 - - - декарбонизатор с насадкой из керамических колец Рашига

Из рис. 1 видно, что при прочих равных условиях остаточное содержание диоксида углерода при обработке воды в декарбонизаторах с насадкой из пластмассовых щитов значительно выше, чем при обработке воды в декарбонизаторах с насадкой из керамических колец Рашига. Следовательно, замена насадки декарбонизатора из керамических колец Рашига на насадку из пластмассовых щитов, используемых для оросителей градирен, ведет к ухудшению массообмена между водой и воздухом и, следовательно, к увеличению содержания CO_2 в обработанной воде. В качестве альтернативы применению насадки из разрушающихся керамических колец рекомендовано использовать более легкие кольца Палля из нержавеющей стали, по массообменной эффективности не уступающие керамической насадке. Некоторое удорожание насадки вполне окупается более длительным сроком эксплуатации.

Проведено технико-экономическое сравнение методов удаления диоксида углерода – физической десорбции в декарбонизаторах и химического связывания едким натром [23, 34, 41]. Сравнение показало, что введение едкого натра для связывания CO_2 целесообразно использовать лишь как дополнительный метод коррекции водного режима тепловых сетей и котлов, – например, при неполном удалении свободной углекислоты в деаэраторах. При этом желательно, чтобы коррекция pH подпиточной воды подщелачиванием производилась как завершающий этап водоподготовки, после деаэраторов. Применение подщелачивания в качестве основного метода возможно в водоподготовительных установках без снижения бикарбонатной щелочности воды.

В третьей главе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования аэрогидродинамики насадочных декарбонизаторов.

Анализ многолетнего опыта эксплуатации насадочных декарбонизаторов и результатов промышленного эксперимента [21, 24] показал, что существующие методы расчета сопротивления орошаемой насадки неточны. Вентилятор с недостаточным напором в эксплуатационных условиях не обеспечивает поддержание заданной величины удельного расхода воздуха на декарбонизацию во всем диапазоне расходов обрабатываемой воды.

Экспериментальное определение сопротивления орошаемой насадки проведено на промышленном декарбонизаторе путем измерения статического давления дифманометрами под и над насадкой при различных расходах обрабатываемой воды. Определение сопротивления орошаемой насадки выполнено также по полупырическим методам Тэйча и Эдулджи. Для более точного определения сопротивления орошаемой насадки декарбонизатора необходимо рассматривать его работу не как изолированного аппарата, а в системе с вентилятором. Оценка аэродинамических характеристик системы декарбонизатор -

вентилятор выполнена с помощью разработанной автором методики, основанной на методе наложения характеристик вентилятора и сети (включающей декарбонизатор). Результаты экспериментального и теоретического исследования аэрогидродинамики обобщены на рис. 2 [31, 40].

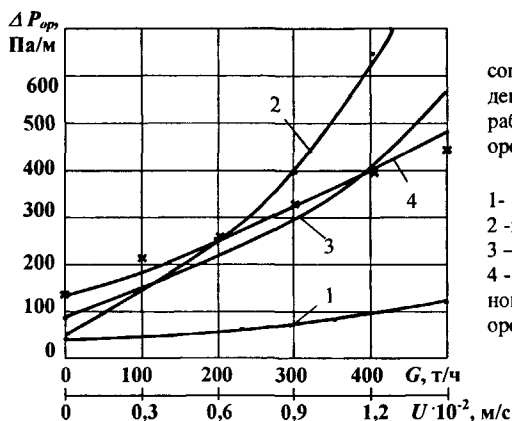


Рис 2 Зависимости удельного сопротивления орошаемой насадки декарбонизатора от расхода обрабатываемой воды (плотности орошения насадки), полученные:

- 1 - по методу Тэйча,
- 2 - по характеристике вентилятора,
- 3 - по методу Эдулджи,
- 4 - по результатам непосредственного измерения сопротивления орошаемой насадки

Из рис.2 видно, что зависимости, полученные с помощью характеристики вентилятора (линия 2), метода Эдулджи (линия 3) и по результатам прямого измерения сопротивления орошаемой насадки (линия 4), достаточно схожи между собой, в то время как полученная по методу Тэйча зависимость удельного сопротивления орошаемой насадки от расхода обрабатываемой воды (линия 1) значительно отличается от них. Действительное значение удельного сопротивления орошаемой насадки декарбонизатора оказалось в несколько раз больше значений, полученных по методу Тэйча, и принимаемых в справочной литературе ($\Delta P_{оп} = 120-250$ Па/м) при расходе воды 550 т/ч. Увеличением сопротивления насадки декарбонизатора по сравнению со значением, принимаемым при подборе вентилятора, и объясняется уменьшение расхода подаваемого вентилятором в аппарат воздуха при повышении расхода обрабатываемой воды.

Для того чтобы исключить уменьшение подачи воздуха вентилятором с течением времени рекомендовано при подборе вентилятора для декарбонизационных установок принимать величину удельного сопротивления насадки декарбонизатора по методу Эдулджи и, кроме того, ввести коэффициент запаса по напору вентилятора $\kappa_v = 1,2$ [25, 26]. Это позволит на весь период эксплуатации установки без смены насадки обеспечить расчетное количество воздуха. Установка вентилятора с большим напором и использование разработанного способа регулирования расхода воздуха, подаваемого вентилятором, по остаточному содержанию CO_2 , позволит снизить затраты электроэнергии на работу вентиля-

тора и при этом обеспечить требуемое качество декарбонизации во всех режимах. Удельный расход воздуха на декарбонизацию и производительность вентилятора рекомендовано определять с учетом начального содержания CO_2 и щелочности обрабатываемой воды [25, 26].

Четвертая глава посвящена совершенствованию технологий аэрации воды и анализу энергетической эффективности разработанных технологий.

Анализ полученных математических моделей процесса декарбонизации (1), (2) и (3), отражающих степень влияния режимных факторов на эффективность декарбонизации, позволил сформулировать новый подход к регулированию декарбонизаторов, в основе которого лежит использование в качестве регулируемого параметра процесса заданной величины остаточного содержания CO_2 [28, 36, 37]. В качестве регулирующих параметров процесса декарбонизации целесообразно использовать температуру воды и расход воздуха.

Разработана серия технических решений для повышения надежности и экономичности процесса декарбонизации [1-17]. На рис. 3 в качестве примера изображена схема декарбонизационной установки, в которой реализуется новый подход к регулированию декарбонизаторов.

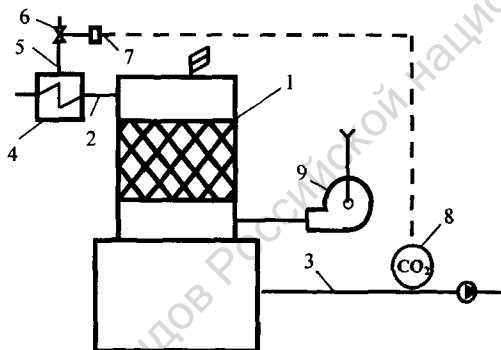


Рис 3 Схема декарбонизационной установки с регулированием температуры исходной воды [9,10] 1-декарбонизатор, 2- трубопровод исходной воды, 3- трубопровод декарбонизированной воды, 4- водоподогреватель, 5- трубопровод греющей среды, 6- регулирующий орган, 7- регулятор температуры исходной воды, 8- датчик концентрации диоксида углерода, 9- вентилятор декарбонизатора

Заданное качество декарбонизации обеспечивается путем поддержания оптимальной температуры исходной воды перед декарбонизатором. Регулирование температуры декарбонизируемой воды проводится по величине заданного остаточного содержания диоксида углерода в декарбонизированной воде 3 мг/л с помощью регулятора температуры 7, регулирующего органа 6, установленного на трубопроводе греющей среды 5 водоподогревателя 4, и датчика концентрации диоксида углерода в декарбонизированной воде 8.

Определены области применения новых методов регулирования насадочных декарбонизаторов. Так, регулирование температуры (при этом расход воздуха остается неизменным, равным максимальному значению) целесообразно в

теплофикационных установках с подогревом подпиточной воды паром производственного отбора турбин или в котельных, где вода перед водоподготовкой подогревается паром, вырабатываемым котлами, работающими на мазуте. Регулирование расхода воздуха экономично осуществлять в теплофикационных установках с подогревом воды перед декарбонизаторами в конденсаторах турбин и (или) паром отопительного отбора, при этом температуру воды необходимо поддерживать на уровне 35-50 °С.

На рис. 4 представлена схема водоподготовительной установки, в которой реализуется новая технология обезжелезивания подпиточной воды [4,5]. Основными особенностями новой технологии водоподготовки являются применение разомкнутой схемы включения водоструйного эжектора вакуумного деаэраатора и совмещение процессов отвода выпара из деаэраатора и аэрации подпиточной воды.

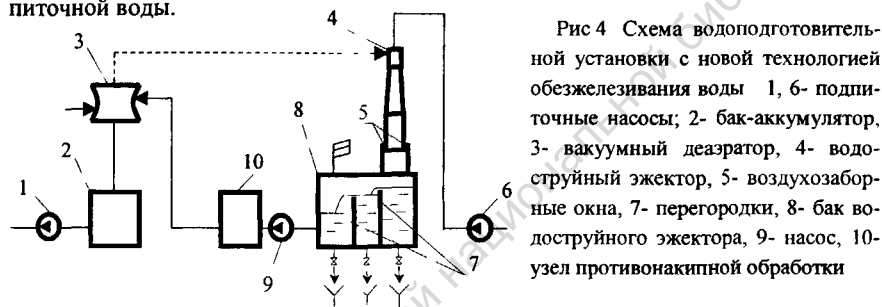


Рис 4 Схема водоподготовительной установки с новой технологией обезжелезивания воды 1, 6- подпиточные насосы; 2- бак-аккумулятор, 3- вакуумный деаэраатор, 4- водоструйный эжектор, 5- воздухозаборные окна, 7- перегородки, 8- бак водоструйного эжектора, 9- насос, 10- узел противонакипной обработки

Эжекция атмосферного воздуха происходит за счет кинетической энергии струи подпиточной воды, падающей в бак после водоструйного эжектора вакуумного деаэраатора позволяет перевести содержащиеся в исходной воде ионы железа Fe^{2+} в ионы Fe^{3+} без применения специального водоподготовительного оборудования. Образующиеся при аэрации хлопья гидрооксида железа отстаиваются в баке и периодически удаляются из него через дренажи. Кроме того, аэрация за счет эжекции воздуха потоком воды в ряде случаев позволяет обеспечить эффективную десорбцию диоксида углерода из подпиточной воды и отказаться от применения в схеме водоподготовительной установки декарбонизаторов, являющихся энергоемкими аппаратами [29, 32].

Оценена экономичность разработанных технологий декарбонизации в сравнении с существующими технологиями без регулирования и разработанной технологией обезжелезивания в сравнении с традиционной вакуумно-эжекционной технологией.

Энергетическая эффективность технологии декарбонизации с регулированием температуры воды и технологии обезжелезивания рассчитана методом эксергетического анализа [28].

На рис. 5 представлены зависимости технологически необходимых температуры декарбонизируемой химически очищенной воды, используемой в качестве регулирующего параметра, и удельных затрат эксергии на декарбонизацию $E^{ок}$, МДж/т, от нагрузки декарбонизатора при регулировании по заданному остаточному содержанию диоксида углерода 3 мг/л (линии 1 и 2) и при отсутствии регулирования в традиционных способах декарбонизации (линии 3 и 4).

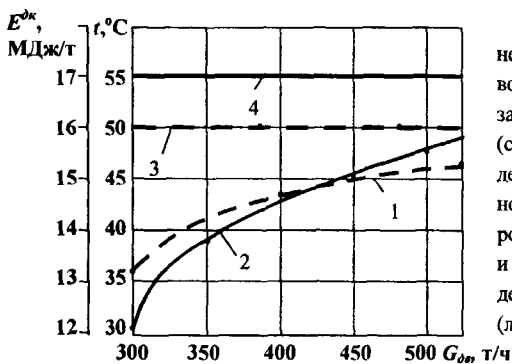


Рис 5 Зависимости технологически необходимых температуры исходной воды (пунктирные линии) и удельных затрат эксергии на декарбонизацию (сплошные линии) от нагрузки декарбонизатора насадочного типа при новом способе регулирования параметров процесса декарбонизации (линии 1 и 2) и традиционном способе декарбонизации без регулирования (линии 3 и 4)

Из графиков видно, что применение новой технологии декарбонизации позволяет снизить на 5-15°C температуру исходной воды и на 5-30% удельные затраты эксергии на декарбонизацию.

Для определения экономической эффективности технологии регулирования расхода воздуха по остаточному содержанию диоксида углерода, рассчитаны затраты на декарбонизацию без регулирования и с регулированием расхода воздуха [40]. Поскольку температура воды в обоих случаях одинакова, для упрощения расчета затраты на нагрев воды не учитывались. Величина расхода воздуха $D_{возд}$, м³/ч, необходимого и достаточного для обеспечения остаточного содержания CO_2 в воде 3 мг/л определена из уравнение регрессии (2).

Результаты расчета представлены графически на рис. 6.

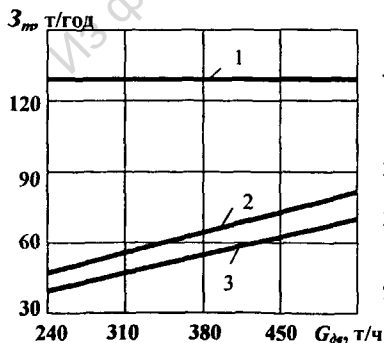


Рис 6 Зависимости расхода условного топлива на декарбонизацию от расхода обрабатываемой воды

- 1- при постоянной величине расхода воздуха на декарбонизацию,
- 2- при регулировании расхода воздуха по остаточному содержанию CO_2 дросселем,
- 3- при регулировании расхода воздуха по остаточному содержанию CO_2 осевым направляющим аппаратом

Зависимости построены при температуре воды 23°C

Из технико-экономического анализа разработанных технологий регулирования температуры воды и расхода воздуха по остаточному содержанию CO_2 следует, что их применение приводит к сокращению затрат на декарбонизацию при одновременном обеспечении требуемого качества десорбции CO_2

Величина снижения удельных затрат эксергии при использовании разработанной технологии обезжелезивания составляет 1556 кДж/м^3 , что соответствует экономии 350 тонн условного топлива в год для водоподготовительной установки производительностью $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ [27].

Заключение

1. В работе представлены результаты проведенного автором исследования процесса обезжелезивания воды, процессов массообмена и аэрогидродинамики в технологиях десорбции диоксида углерода из воды, разработанные и внедренные на тепловых электростанциях новые энергосберегающие технологии аэрации воды.

2. Впервые получены многофакторные математические модели работы декарбонизаторов насадочного типа, учитывающие влияние на массообменную эффективность аэрации расхода воздуха и начального содержания CO_2 .

3. С помощью полученных многофакторных моделей исследовано влияние типа насадки декарбонизатора на массообменную и энергетическую эффективность десорбции диоксида углерода; разработаны рекомендации по выбору оптимального типа насадки декарбонизатора.

4. На основе анализа результатов многофакторного экспериментального исследования процесса аэрации разработан новый подход к управлению декарбонизаторами, в основу которого положено использование в качестве регулируемого параметра процесса декарбонизации заданной величины остаточного содержания диоксида углерода. Установлено, что в качестве регулирующих параметров для повышения экономичности и массообменной эффективности десорбции CO_2 следует использовать расход воздуха, подаваемого в декарбонизатор и температуру обрабатываемой воды.

5. Новый подход к управлению декарбонизаторами реализован в технологиях декарбонизации воды на тепловых электростанциях. Полученные в результате экспериментов модели, описывающие эффективность десорбции CO_2 из подпиточной воды, позволяют оценить, до какого технологически приемлемого уровня и при каких условиях можно снизить энергетические затраты на нагрев воды и на подачу воздуха в декарбонизатор при использовании новых технологий, обеспечивая при этом требуемое качество декарбонизации.

6. С помощью методов термодинамического анализа оценены энергетические затраты на осуществление процесса декарбонизации. Применение новой технологии десорбции диоксида углерода, когда заданное качество декарбонизации обеспечивается путем поддержания оптимальной температуры исходной воды перед декарбонизатором, позволяет снизить на 5-15°C температуру воды и на 5-30% удельные затраты эксергии на декарбонизацию. Применение регулирования расхода воздуха по остаточному содержанию CO_2 позволяет снизить затраты условного топлива на декарбонизацию на 10-40%.

7. Проведено технико-экономическое сравнение методов удаления диоксида углерода – физической десорбции в насадочных декарбонизаторах и химического связывания; определены области применения каждого из методов.

8. Разработана энергосберегающая технология обезжелезивания воды в теплоэнергетических установках с вакуумными деаэраторами, которая позволяет осуществить процесс аэрации подпиточной воды без дополнительных капитальных и энергетических затрат, а в ряде случаев - обеспечить эффективную десорбцию CO_2 из подпиточной воды и отказаться от применения в схеме водоподготовительной установки декарбонизаторов.

9. Разработан новый метод определения сопротивления насадки декарбонизатора с помощью аэродинамической характеристики вентилятора. Проведено экспериментальное исследование аэрогидродинамических характеристик декарбонизатора, позволившее выполнить корректировку методики расчета аэрогидродинамических режимов декарбонизации. Уточненная методика позволяет выбирать вентилятор, обеспечивающий технологически необходимый удельный расход воздуха на декарбонизацию во всем диапазоне расходов обрабатываемой воды и требуемое качество десорбции CO_2

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

1. Патент № 2148021 (RU). МКИ С 02 F 1/20. Установка для декарбонизации воды/В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №12.
2. Патент № 2148207 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Установка для декарбонизации воды/В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №12.
3. Патент № 2148208 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Способ декарбонизации воды/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №12.
4. Патент № 2149284 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Водоподготовительная установка системы теплоснабжения / В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №14.

5. Патент № 2149285 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Способ подготовки подпиточной воды теплоэнергетических установок/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №14.

6. Патент № 2149286 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Способ противокоррозионной обработки подпиточной воды систем теплоснабжения/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №14.

7. Патент № 2151951 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Способ декарбонизации воды/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №18.

8. Патент № 2151952 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Установка для декарбонизации воды/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №18.

9. Патент № 2153627 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Установка для подготовки подпиточной воды теплосети/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №21.

10. Патент № 2153628 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Способ подготовки подпиточной воды теплосети / В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №21.

11. Патент № 2153629 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Способ декарбонизации воды/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №21.

12. Патент № 2153630 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Установка для декарбонизации воды/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №21.

13. Патент №2155713 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Способ декарбонизации воды/ В. И. Шарапов, М. А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №25.

14. Патент № 2160712 (RU). МКИ F 22 D 1/50. Способ дегазации воды/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2000. №35.

15. Патент № 2163567 (RU). МКИ С 02 F 1/20. Способ подготовки подпиточной воды теплосети/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина// Бюллетень изобретений. 2001. №6.

16. Положительное решение по заявке №2000101932/12 от 23.11.00. Установка для подготовки подпиточной воды теплосети/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина.

17. Положительное решение по заявке №99119519/12 от 25.12.00. Способ дегазации воды/ В.И. Шарапов, М.А. Сивухина.

18. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Декарбонизаторы. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. 204 с.

19. Сивухина М.А., Шарапов В.И. Исследование массообменной эффективности насадочных декарбонизаторов большой производительности// Научно-технический калейдоскоп. 2000. № 3.С.94-99.

20. Шарапов В., Дерябин А., Орлов М., Сивухина М., Цюра Д. Экспериментальное исследование установки для подпитки системы теплоснабжения// Энергосбережение. 2000. №1. С. 90,91.

21. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Экспериментальное исследование аэрогидродинамики системы декарбонизатор – вентилятор// Энергосбережение. 2000. №1. С. 86,87.

22. Шарапов В.И., Сивухина М.А. О влиянии типа насадки на массообменную и энергетическую эффективность декарбонизаторов // Энергосбережение. 1999. № 3. С. 12-14.

23. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Экономичность физических и химических методов десорбции агрессивной углекислоты// Энергосбережение. 1999. №3. С. 15,16.

24. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Об аэрогидродинамике системы декарбонизатор – вентилятор.// Вестник УлГТУ. 2000. №1. С. 81-89.

25. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Об определении удельного расхода воздуха в декарбонизаторах.// Теплоэнергетика. 2000. №7. С. 28-30.

26. Sharapov V.I., Sivukhina M.A. Determining the Specific Air Flowrate in Decarbonizers// Thermal Engineering. 2000. V.47. №7. P. 603-605.

27. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Повышение экономичности обезжелезивания воды для систем теплоснабжения // Вестник УлГТУ. 1999. №3. С. 97-102.

28. Шарапов В.И., Сивухина М.А., Цюра Д.В. Совершенствование методов управления тепломассообменными аппаратами тепловых электростанций//Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2000. № 3-4. С. 22-30.

29. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Энергосберегающая технология аэрации воды в теплоэнергетических установках//Энергосбережение.1999.№1.С. 28 - 32.

30. Сивухина М.А., Шарапов В.И. Результаты многофакторного экспериментального исследования массообменной эффективности декарбонизаторов на Ульяновских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3// Материалы Второй Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве». Ульяновск: УлГТУ, 2000. С. 115-119.

31. Сивухина М.А., Шарапов В.И. Экспериментальное исследование аэрогидродинамики насадочного декарбонизатора // Материалы Второй Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве». Ульяновск: УлГТУ, 2000. С. 120-122.

32. Сивухина М.А., Шарапов В.И. Новая технология аэрации воды в теплоэнергетических установках с вакуумными деаэраторами// Тезисы докладов XXXIII научно-технической конференции. Ульяновск: УлГТУ, 1999. С. 72,73.

05.14.

33. Сивухина М.А., Шарапов В.И. О эффективность десорбции CO₂// Инженерны тепло- и электроэнергетических установок к докладов научно-технической конференции: У

РНБ Русский фонд

2003-4

795

34. Сивухина М.А., Шарапов В.И. Сравн методов предотвращения углекислотной Инженерные проблемы совершенствования

установок коммунального хозяйства. Тезисы докладов научно-технической конференции: Ульяновск, УлГТУ. 1999. С. 32-34.

35. Сивухина М.А., Шарапов В.И. Энергосберегающая технология обезжелезивания воды в теплоэнергетических установках с вакуумными деаэраорами// Тезисы докладов V Международной НТК студентов и аспирантов: Москва, МЭИ. 1999. т.2. С. 286-288.

36. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Повышение экономичности методов аэрации воды в теплоэнергетических водоподготовительных установках// Со-стояние и перспективы развития электротехнологии. Тезисы докладов между-народной научно-технической конференции. Иваново: ИГЭУ. 1999. С. 172.

37. Шарапов В.И., Сивухина М.А., Цюра Д.В. Выбор параметров регулирования тепломассообменных аппаратов водоподготовительных установок электростанций // Материалы IV Международного Форума «Тепло- и массоперенос – 2000», т.10. Минск: АНК «ИТМО им. А. В. Лыкова» НАНБ, 2000. С.446-454.

38. Шарапов В.И., Сивухина М.А, Цюра Д.В. О новом подходе к повыше-нию энергетической эффективности тепломассообменных аппаратов водопод-готовительных установок // Проблемы повышения эффективности и надеж-ности систем теплоэнергоснабжения. Материалы межвузовской научной конференции: Саратов. 1999. С. 60,61.

39. Шарапов В.И., Сивухина М.А, Цюра Д.В. Эволюция подхода к проблеме повышения качества противокоррозионной обработки воды в теплоэнергетиче-ских установках //Перспективные методы и средства обеспечения качества. Сборник научных трудов: Ульяновск, УлГТУ. 2000: С. 170-181.

40. Сивухина М.А., Шарапов В.И. Результаты экспериментального исследо-вания массообмена и аэрогидродинамики насадочных декарбонизаторов// Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике и промышленности. Материалы 3-й Российской научно-технической конференции: Ульяновск: УлГТУ, 2001. С. 310-317.

41. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Выбор методов предотвращения углекис-лотной коррозии тепловых сетей// Электрические станции. 2001. №3. С. 23-27.

Рос
Федерация
Областной ка
29 С.Петербург

30 МАЯ 2001