

В большинстве случаев внутренняя коррозия оборудования и трубопроводов теплоэнергетических установок и систем теплоснабжения обусловлена присутствием в воде, используемой в качестве греющего или нагреваемого теплоносителя, растворенных коррозионно-агрессивных газов, прежде всего, кислорода O_2 и диоксида углерода CO_2 . В нашей стране и за рубежом основным средством противокоррозионной обработки воды являются методы физической десорбции газов при нагреве и диспергировании обрабатываемой воды: термическая деаэрация и декарбонизация. Подпиточная вода для систем теплоснабжения, как правило, обрабатывается в вакуумных деаэраторах. Эти аппараты позволяют осуществить деаэрацию в водогрейных котельных, не имеющих источников пара, исключить потери конденсата греющего пара с подпиточной водой на ТЭЦ и в промышленных котельных и существенно повысить экономичность ТЭЦ за счет нагрева потоков деаэрируемой воды паром низкопотенциальных отборов теплофикационных турбин. В большинстве случаев для эффективной работы вакуумных деаэраторов необходимо предварительное удаление из воды диоксида углерода — декарбонизация. В закрытых системах теплоснабжения с небольшими величинами подпитки применяются атмосферные деаэраторы.

Исследование и совершенствование технологий деаэрации воды для ТЭЦ и систем теплоснабжения является одним из основных направлений деятельности научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» (НИЛ ТЭСУ) Ульяновского государственного технического университета [1–4].

Кратко рассмотрим основные результаты этих работ.

О новых конструкциях деаэраторов

В установках для подготовки подпиточной воды систем теплоснабжения наиболее распространены и относительно освоены струйно-барботажные вакуумные деаэраторы горизонтального и вертикального типов, разработанные НПО ЦКТИ и серийно выпускаемые Саратовским заводом энергетического машиностроения (СЗЭМ). Наряду с этими аппаратами, на ТЭЦ и в котельных имеются десятки разнообразных конструкций вакуумных деаэраторов, изготовленных по проектам различных организаций местными ремонтными и монтажными службами. В последние годы широко рекламируются как последнее чудо техники струйные аппараты «Кварк» и «АВАКС», не прошедшие сколько-нибудь серьезной экспериментальной проверки. Более того, даже из рекламных материалов видно, что эти деаэраторы по многим характеристикам уступают серийным аппаратам традиционных конструкций, прошедшим длительный эволюционный отбор. Появившиеся в последнее время публикации и отзывы специалистов-практиков показывают, что эти аппараты ненадежны и имеют крайне низкую массообменную и энергетическую эффективность.

Анализ массообменной и энергетической эффективности вакуумных деаэраторов показал, что из применяемых в настоящее время конструкций лучшие показатели имеют серийные аппараты горизонтального типа ЦКТИ-СЗЭМ [2]. Многолетняя эксплуатация горизонтальных вакуумных деаэраторов ЦКТИ-СЗЭМ позволила накопить значительный опыт совершенствования технологий водоподготовки и схем теплофикационных установок с их применением. На ТЭЦ и котельных с высоким уровнем культуры эксплуатации эти аппараты работают экономично и обеспечивают нормативное качество деаэрации [1, 5].

В то же время на многих ТЭЦ и котельных в случае проектных недоработок и недостаточной подготовки инженерно-технического персонала эксплуатация вакуумных деаэраторов вызывает большие трудности. Не разобравшись в большом числе факторов, от которых зависит качество вакуумной деаэрации, специалисты этих предприятий, а также ряда исследовательских и наладочных организаций, как правило, пытаются решить проблемы противокоррозионной обработки изменением конструкции вакуумных деаэраторов.

Весьма показателен в этом отношении пример Набережночелнинской ТЭЦ, которая стала своеобразным полигоном для испытания неудачных конструкций вакуумных деаэраторов. На этой станции семь вакуумных деаэраторов ДВ-800 из восьми установленных подверглись дорогостоящей реконструкции по проектам УралВТИ и других организаций. Однако все восемь деаэраторов работали крайне неудовлетворительно, потому что не были созданы условия их эффективной эксплуатации: отсутствовали рациональные схемы подогрева теплоносителей водоподготовительной установки, не выдерживался температурный режим вакуумной деаэрации, не обеспечивались плотность вакуумных

систем и работа газоотводящих аппаратов, не выдерживалось качество обработки воды до вакуумных деаэраторов. При осмотрах выявлены многочисленные повреждения внутренних элементов, показавшие, что надежность реконструированных аппаратов значительно ниже, чем серийных вакуумных деаэраторов. Более того, большинство новых конструкций обладают крайне низкой ремонтпригодностью.

Наш опыт показывает, что эффективность работы вакуумных деаэраторов зависит не столько от их конструкции, сколько от условий эксплуатации. Организация эффективной работы вакуумных деаэраторов возможна лишь при высоком качестве проектирования теплофикационных установок и достаточной квалификации наладочного и эксплуатационного персонала. Тепловые схемы ТЭЦ и котельных должны обеспечивать стабильное поддержание технологически необходимых режимов вакуумной деаэрации, которые определяются типом применяемых деаэраторов, качеством исходной воды и методами ее додеаэрационной обработки. При эксплуатации вакуумных деаэрационных установок должен осуществляться комплекс эффективных мер по поддержанию герметичности их вакуумной системы, обеспечению отвода пара из деаэраторов, режима работы сливных трубопроводов и баков-аккумуляторов, регулированию процесса деаэрации [1, 2, 5].

Оценка возможности работы термических деаэраторов с предельно низким остаточным содержанием растворенного кислорода

Государственным стандартом [6] регламентированы максимальные концентрации остаточного содержания растворенного кислорода за деаэраторами повышенного давления (10 мкг/дм³), атмосферными (30 мкг/дм³) и вакуумными (50 мкг/дм³) деаэраторами. Однако нередко на практике эти величины рассматриваются не как предельно допустимые, а как предельно достижимые для перечисленных типов деаэраторов. При испытании деаэраторов, в т.ч. аппаратов новых конструкций, как правило, оценивается лишь соответствие аппарата требованиям стандарта, поэтому в литературе отсутствуют сведения о предельно достижимой глубине десорбции растворенного кислорода из воды при термической деаэрации.

В проведенном авторами экспериментальном исследовании струйно-барботажного атмосферного деаэратора ДА-25 [3] в качестве одной из основных была поставлена задача достижения минимального остаточного содержания растворенного кислорода, а также определения режимов деаэрации, в которых оно обеспечивается. В табл. 1 приведена выборка опытов, характеризующих работу деаэратора. Данные табл. 1 получены при нагрузке деаэратора 60–70% номинальной и начальном содержании

■ Содержание растворенного кислорода в воде после атмосферного струйно-барботажного деаэратора

табл. 1

Номер опыта	Температура химически очищенной воды, °С	Средняя величина нагрева потоков воды в деаэраторе, °С	Удельный расход пара, кг/т д.в.	Остаточное содержание O ₂ , мкг/дм ³
1	51,0	42,2	1,33	9
2	53,5	41,6	1,23	8
3	55,0	41,1	0,06	10
4	56,0	40,9	2,27	9
5	37,7	46,9	1,70	5
6	38,3	47,1	1,58	5
7	36,0	56,8	0,78	8
8	43,0	46,1	0,26	8
9	45,5	50,2	0,20	5
10	35,0	51,3	0,90	2
11	35,7	48,3	0,12	10
12	35,8	50,0	0,91	3
13	33,0	53,2	0,35	7
14	40,0	46,3	3,97	8
15	66,0	36,6	6,95	60
16	87,0	29,0	2,26	40
17	75,0	33,9	0,50	43
18	35,7	49,8	0,90	4
19	45,0	45,3	0,23	3

растворенного кислорода в химически очищенной воде 12–13 мг/дм³. Измерения остаточного и начального содержания кислорода в воде проводились портативными анализаторами МАРК-301Т, а также дублировались химическими методами для примерной оценки интервалов концентраций кислорода, которые измеряются кислородомерами. Из табл. 1 видно, что деаэратор в достаточно большом диапазоне рабочих режимов работает с весьма низкой остаточной концентрацией кислорода 3–5 мкг/дм³. Полученные результаты подтвердили высказанные нами ранее доводы о целесообразности отказа от гидразинной обработки питательной воды котлов ТЭЦ в связи с возможностью надежного обеспечения остаточного содержания кислорода менее 10 мкг/дм³ в деаэраторах современных конструкций [7]. Эта рекомендация учтена при формулировке условий применения

гидразина в 16-м издании ПТЭ электрических станций и сетей [8].

Отметим, что глубокое удаление растворенного кислорода достигается и при рациональной организации работы вакуумных деаэраторов [1].

Оценка возможности работы термических деаэраторов с минимальным удельным расходом выпара

Стандарт [6] устанавливает величины удельных расходов выпара для вакуумных деаэраторов, деаэраторов атмосферного и повышенного давления соответственно в 5,0; 2,0 и 1,5 кг на тонну деаэрированной воды. Эти нормативы, установленные много десятилетий назад по практике эксплуатации далеко не самых совершенных конструкций деаэраторов, не имеют достаточного экспериментального и какого-либо теоретического обоснования. О величине потерь с выпаром говорит такой факт: для соблюдения стандарта в режимах работы деаэраторов с минимальными нагрузками с выпаром необходимо удалять из деаэратора до 35–40% греющего пара. Реальный расход выпара на электростанциях, как правило, значительно больше.

В работах [2, 4] показано, что теоретически необходимый удельный расход выпара термических деаэраторов, соответствующий минимальным энергетическим затратам на деаэрацию, в десятки раз меньше регламентированных стандартом [6] значений.

Результаты эксперимента (табл. 1) показывают, что в оптимальных температурных режимах высокоэффективная деаэрация с остаточным содержанием кислорода 10 мкг/дм^3 и менее обеспечивается при удельном расходе выпара $0,06\text{--}0,20 \text{ кг/т д.в.}$, т.е. при весьма существенном приближении к теоретически необходимой величине выпара. Анализ результатов исследования позволяет сделать вывод, что для деаэраторов современных конструкций нормативные удельные расходы выпара даже при достаточно большом коэффициенте запаса должны быть установлены как минимум в два-три раза ниже величин, указанных в стандарте [6].

Разработка энергетически эффективных технологий эксплуатации термических деаэраторов в теплоэнергетических установках

Повышение энергетической эффективности термической деаэрации может быть достигнуто за счет совершенствования конструкции деаэратора (отметим, что упомянутый выше деаэратор ДА-25 НПО ЦКТИ имеет одну из наиболее удачных конструкций), за счет выбора оптимальных температурных режимов эксплуатации (прежде всего это относится к вакуумным деаэраторам), за счет снижения расхода выпара, утилизации его теплоты и массы (в вакуумных деаэрационных установках — за счет снижения затрат на транспорт выпара), а также за счет совершенствования схем включения деаэраторов на тепловых электростанциях и в котельных. Определяющее значение для энергетической эффективности деаэрации воды, особенно на тепловых электростанциях, имеют схемы включения термических деаэраторов.

Наш анализ показывает, что наиболее значительные резервы повышения энергетической эффективности можно реализовать при совершенствовании схем дегазации потоков питательной воды котлов и подпиточной воды теплосети.

В НИЛ ТЭСУ создана серия высокоэкономичных схем деаэрации этих потоков воды на ТЭЦ и разработана методика оценки энергетической эффективности технологий подготовки воды [1, 3, 9]. Общей особенностью новых схем является использование для подогрева потоков воды на различных стадиях ее подготовки низкопотенциальных теплоносителей. Отметим, что большинство разработанных схем не требует для своей реализации установки дополнительного теплообменного оборудования и больших капитальных затрат. Применение новых схем, например, в крупных установках для подпитки открытых систем теплоснабжения дает годовую экономию до 30 тыс. тонн условного топлива на каждые 1000 т/ч производительности подпиточной установки.

Предложена серия решений по повышению надежности и полноты утилизации теплоты и массы выпара деаэраторов [2, 3]. В частности, доказана целесообразность более широкого применения смешивающих охладителей выпара и разработаны способы их установки.

Поддержание оптимальных температурных режимов деаэрации, снижение до технологического минимума расхода выпара наиболее эффективно достигаются путем совершенствования технологий управления деаэраторами.

Разработка технологий управления процессом термической деаэрации

При проектировании и эксплуатации деаэрационных установок в качестве основного регулируемого параметра технологического процесса обычно принимается величина давления (разрежения) в деаэраторе или соответствующей ему температуры деаэрированной воды. Подразумевается, что принятый за оптимальный фиксированный уровень регулируемого параметра обеспечивает требуемое качество деаэрации воды. Поддержание рабочего давления или температуры деаэрированной воды в заданных пределах осуществляется путем изменения регулирующего параметра — расхода греющего агента, подаваемого в деаэратор. Традиционная технология регулирования термических деаэраторов в значительной степени была обусловлена простотой измерения давления и температуры, принятых в качестве регулируемых параметров.

Однако анализ эксплуатации деаэраторов показывает, что при традиционной технологии управления процессом термической деаэрации, с одной стороны, во многих случаях не гарантируется достижение требуемого качества обработки воды, а с другой, — нередко деаэрация проводится с повышенными энергетическими затратами [2].

Появление достаточно надежных и точных приборов для оценки качества деаэрированной воды, прежде всего, кислородомеров, позволило реализовать новый подход к управлению деаэраторами, по которому регулируемые параметрами служат заданные конечные показатели эффективности деаэрации: остаточные концентрации растворенных кислорода и диоксида углерода [2, 10]. На рис. 1 показана одна из схем [10], в которой реализуется новый подход к управлению термическими деаэраторами.

В соответствии с этой схемой регулирование расхода греющего агента производят по величине заданного остаточного содержания растворенного кислорода в деаэрированной подпиточной воде с помощью регулятора 5, регулирующего органа 6 и датчиков 7. Это позволяет гарантированно обеспечить заданное качество воды при минимально необходимых и достаточных энергетических затратах на деаэрацию.

В рамках нового подхода создана серия технологий управления процессами деаэрации, отмеченных медалью Российской академии наук и золотой медалью Всемирного салона изобретений в Брюсселе.

Экспериментальное построение динамических характеристик деаэраторов

Для практической реализации новых технологий управления необходимо знание динамических характеристик термических деаэраторов как объектов регулирования.

Динамическая характеристика отражает реакцию объекта управления во времени на регулирующее воздействие. Для деаэратора такие характеристики могут быть представлены динамикой изменения во времени регулируемого параметра (остаточной концентрации кислорода) при изменении какого-либо регулирующего параметра (расхода пара или греющего агента, температуры воды, подаваемой на деаэрацию).

Эмпирические зависимости (линии 2), описывающие приведенную на рис. 2 динамическую характеристику (линия 1), аппроксимированы в виде формул [11]:

(1)

$$\text{CO}_2 = 0,0123 t^3 - 0,6148 t^2 + 7,7523t + 3,5625. \quad (2)$$

Разработка технологий предотвращения вторичного насыщения деаэрированной воды газами при ее хранении и транспорте

Обследование теплоэнергетических предприятий ряда городов показало, что основной причиной увеличения кислорода в подпиточной воде теплосети является не столько недостаточное качество деаэрации, сколько вторичное насыщение сетевой воды коррозионно-активными газами.

В системах теплоснабжения Саратова, Ростова, Ульяновска и других городов до 90% повреждений от внутренней коррозии обусловлено вторичным насыщением подпиточной и сетевой воды кислородом и диоксидом углерода. Аэрация деаэрированной воды происходит в период хранения ее в баках-аккумуляторах, через сальниковые уплотнения подпиточных и сетевых насосов, неплотности подогревателей горячего водоснабжения (ГВС) в закрытых системах теплоснабжения, а также в местных системах отопления и ГВС при их завоздушивании.

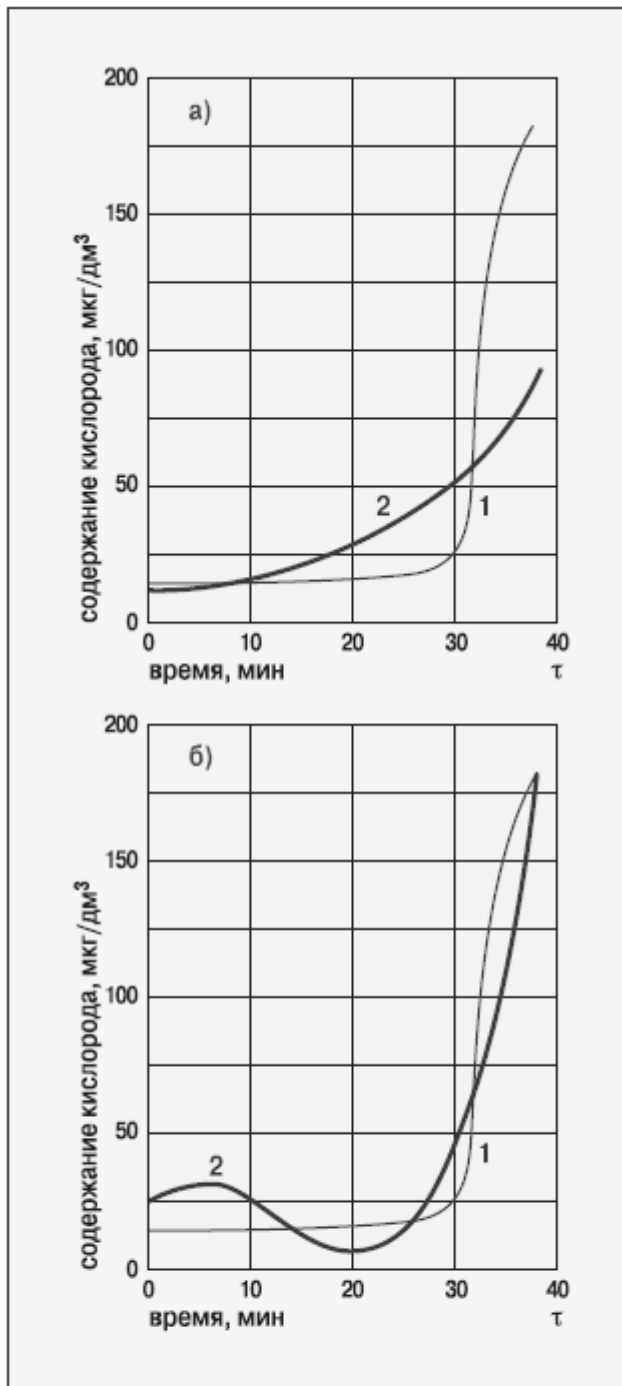
В НИЛ ТЭСУ разработаны высокоэффективные решения по защите систем теплоснабжения от

вторичного насыщения воды коррозионно-агрессивными газами [12].

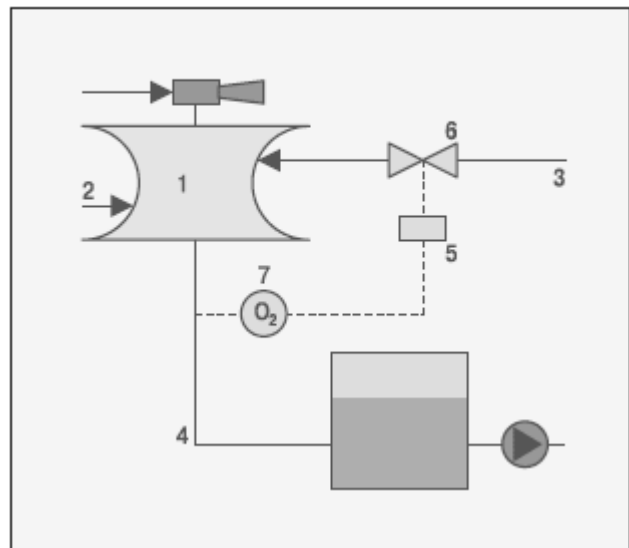
Так, разработано устройство для защиты баков-аккумуляторов от аэрации [12]. Сообщение с атмосферой осуществляется через трубу, вваренную в крышу бака-аккумулятора, причем нижний конец трубы размещен ниже уровня трубопровода отвода воды, а верхний конец трубы выступает над крышей бака. При заполнении бака-аккумулятора вода при подъеме сжимает воздух, находящийся над поверхностью воды. Масса воздуха давит на поверхность воды и выжимает некоторое количество воды в трубу. Насыщение воды коррозионноагрессивными газами уменьшается во много раз, так как аэрация происходит только на поверхности воды в пределах зеркала воды трубы, которая значительно меньше общей площади бака-аккумулятора.

Практика реализации рассмотренных в статье решений призывает, что они позволяют существенно повысить качество, надежность и экономичность термической деаэрации воды, эффективность защиты от внутренней коррозии оборудования и трубопроводов тепловых электростанций и систем теплоснабжения.

-
1. Шарапов В.И. Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов. М.: «Энергоатомиздат», 1996.
 2. Шарапов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэратеры. Ульяновск: УлГТУ. 2003.
 3. Шарапов В.И., Макарова Е.В. Защита от коррозии тракта питательной воды ТЭЦ. Ульяновск: УлГТУ. 2004.
 4. Шарапов В.И., Малинина О.В., Цюра Д.В. О предельной массообменной и энергетической эффективности термических деаэраторов. — «Энергосбережение и водоподготовка», №2/2003.
 5. Шарапов В.И. О реконструкции вакуумных деаэраторов. — «Промышленная энергетика», №5/1999.
 6. ГОСТ 16860–88. Термические деаэратеры. М.: Изд-во стандартов, 1989.
 7. Шарапов В.И., Макарова Е.В. О гидразинной обработке питательной воды ТЭЦ. «Электрические станции», №6/2002.
 8. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. 16-е изд. М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
 9. Шарапов В.И., Пазушкин П.Б., Цюра Д.В., Макарова Е.В. Методика расчета энергетической эффективности технологий подготовки воды на тепловых электростанциях.— Проблемы энергетики. Известия ВУЗов, №7–8/2002.
 10. Патент №2144508(RU). МПК6 С 02 F 1/20. Способ термической деаэрации воды. В.И. Шарапов, Д.В. Цюра.— Бюллетень изобретений, № 2/2000.
 11. Шарапов В.И., Феткуллов М.Р., Цюра Д.В. Технологии управления термическими деаэраторами. Ульяновск: УлГТУ, 2004.
 12. Шарапов В.И., Ямлеева Э.У. Защита воды в системах теплоснабжения от вторичного насыщения коррозионно-агрессивными газами. Ульяновск.: УлГТУ, 2004.



▲ Рис. 2. Динамика изменения содержания кислорода CO₂ в деаэрированной воде (а — экспоненциальная кривая; б — полиномиальная кривая; линия 1 — экспериментальная динамическая характеристика деаэратора; линии 2 — зависимости, построенные по эмпирическим формулам)



▲ Рис 1. Схема вакуумной деаэрационной установки с регулированием расхода греющего агента по заданным значениям O₂ и CO₂ (1 — вакуумный деаэратор; 2 — трубопровод исходной воды; 3 — трубопровод греющего агента; 4 — трубопровод отвода деаэрированной воды; 5 — регулятор расхода перегретой воды; 6 — регулирующий клапан; 7 — датчики остаточного содержания кислорода деаэрированной воды)