

УДК 621.187.12

Д. В. ЦЮРА

Технологии управления процессами термической деаэрации воды в теплоэнергетических установках

Общая характеристика работы

Защита оборудования и трубопроводов тепловых электростанций и систем теплоснабжения от внутренней коррозии является одной из актуальнейших проблем теплоэнергетики. Отрицательными последствиями внутренней коррозии являются сокращение времени эксплуатации оборудования и трубопроводов тепловых сетей, ТЭС и котельных, а также значительное снижение мощности источников тепловой и электрической энергии.

К числу факторов, вызывающих внутреннюю коррозию, относится присутствие в воде растворенных коррозионно-активных газов: кислорода и диоксида углерода.

В отечественной и зарубежной теплоэнергетике основным методом противокоррозионной обработки питательной воды котлов и подпиточной воды систем теплоснабжения является термическая деаэрация.

Массообменная и энергетическая эффективность термической деаэрации существенно зависит от технологий управления работой деаэраторов. Анализ опыта эксплуатации термических деаэраторов, как в России, так и за рубежом, показывает, что пониженное качество и экономичность деаэрации в значительной мере обусловлены неэффективными методами регулирования процессов деаэрации, созданными более полувека назад.

Настоящая работа посвящена проблемам повышения качества и экономичности термической деаэрации воды путем совершенствования технологий управления деаэраторами.

Работа выполнена в НИЛ «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ и является частью проводимых в лаборатории исследований по совершенствованию технологий управления производственными процессами теплоэнергетических установок [1].

Целью настоящей работы является повышение массообменной и энер-

гетической эффективности термических деаэраторов. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведено экспериментальное исследование вакуумного деаэратора, в результате которого получены многофакторные математические модели процесса деаэрации воды;
- выполнена оценка влияния режимных факторов на эффективность деаэрации воды;
- доказана необходимость и технологическая возможность корректировки стандарта по содержанию растворенного кислорода в подпиточной воде систем теплоснабжения;
- разработан новый подход к управлению термическими деаэраторами, в рамках которого создана серия высокоэффективных технологий термической деаэрации;
- оценена энергетическая эффективность новых и традиционных технологий термической деаэрации воды.

Построение многофакторных математических моделей процесса деаэрации

Наиболее полные экспериментальные данные о работе термических деаэраторов получены проф. В.И. Шараповым в виде многофакторных математических моделей процесса, отражающих зависимость остаточного содержания кислорода и pH деаэрируемой воды от расхода и температуры химически очищенной воды и греющего агента [2]. Однако эти модели не учитывают влияния на эффективность процесса начального содержания диоксида углерода в обрабатываемой воде. Кроме того, они не описывают процессы термической деаэрации при пониженных температурах теплоносителей. В связи с этим в работе поставлена задача экспериментально исследовать работу вакуумного деаэратора при пониженном температурном режиме и количественно оценить влияние на деаэрацию начального содержания CO_2 и особенностей режима работы первой ступени дегазации – декарбонизации.

Многофакторное экспериментальное исследование работы вакуумной деаэрационной установки проведено на Ульяновской ТЭЦ-3 в 1999 - 2000 гг.

Методами математической теории активного эксперимента получены достаточно полные и точные зависимости эффективности десорбции коррозионно-активных газов от гидравлических, тепловых и режимных факторов,

на которые может непосредственно воздействовать эксплуатационный персонал электростанции [3].

Экспериментальная установка состоит из последовательно включенных насадочного декарбонизатора производительностью 550 т/ч и серийно выпускаемого Саратовским заводом энергетического машиностроения струйно-барботажного вакуумного деаэратора горизонтального типа ДВ-800 производительностью 800 т/ч.

Оценено влияние четырех основных режимных факторов: расхода исходной воды $G_{и.в}$, температуры исходной воды $t_{и.в}$, начального содержания диоксида углерода CO_2 в исходной воде и расхода воздуха на декарбонизатор D_a на эффективность процесса десорбции.

Значения режимных факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения регулируемых факторов

Факторы	$G_{и.в}$ т/ч	$t_{и.в}$ °C	D_a , % $D_a^{НОМ}$	CO_2 , мг/дм ³
Базовый (нулевой) уровень $X_{i,0}$	380	13	75	62
Интервал варьирования λ_i	140	5	25	51
Обозначение в нормированном виде X_i	X_1	X_2	X_3	X_4

Особенностью проведенного испытания является низкий температурный уровень деаэрации, обусловленный дефицитом топлива на электростанции, что характерно для эксплуатации водоподготовительных установок в условиях экономического кризиса. Величина подогрева обрабатываемой воды в вакуумном деаэраторе поддерживалась в интервале $\Delta t_a = 13-17$ °C, расход греющего агента – сетевой воды при этом колебался в пределах 80-150 т/ч, температура сетевой воды составляла 54-80 °C. Бикарбонатная щелочность исходной воды изменялась методом подкисления. Щелочность воды до подкисления составляла 2,2-2,8 мг-экв/дм³, после подкисления – 0,65-2,2 мг-экв/дм³.

Оценено влияние расхода воздуха, подаваемого в декарбонизатор, и начального содержания растворенного диоксида углерода в исходной воде перед декарбонизатором на десорбцию CO_2 в вакуумном деаэраторе. Подобные измерения проводились впервые. Таким образом, результаты эксперимента оценивают эффективность не только вакуумного деаэратора, но и системы декарбонизатор – вакуумный деаэратор.

При оценке эффективности работы вакуумных деаэраторов в качестве определяемых параметров (целевых функций) использовались остаточное содержание растворенного кислорода в деаэрированной воде в мкг/дм^3 (Y_1), показатель pH деаэрированной воды (Y_2) и остаточное содержание растворенного диоксида углерода в мг/дм^3 (Y_3). Остаточное содержание CO_2 в деаэрированной воде исследовалось в качестве целевой функции впервые. В обычных условиях при испытаниях деаэраторов принять CO_2 в качестве целевой функции невозможно, так как при этом нарушается требование теории активного эксперимента о необходимости существования целевой функции во всем факторном поле эксперимента. В связи с низким температурным уровнем процесса деаэрации при проведении исследования Y_3 существует практически во всем поле эксперимента. Отсутствие CO_2 в деаэрированной воде достигается только при сочетаниях регулируемых параметров, находящихся на «краю» факторного поля.

Математические модели работы вакуумного деаэратора представлены полиномами:

$$Y_1 = 148,75 + 58,75X_1 - 56,25X_2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 8,08 - 0,17X_1 + 0,16X_2 + 0,08X_3 - 0,18X_4 - 0,05X_1X_2 - 0,07X_1X_4; \quad (2)$$

$$Y_3 = 2,3 + 1,2X_1 - 1,1X_2 - 0,6X_3 + 0,8X_4 - 0,4X_1X_4. \quad (3)$$

Дисперсии воспроизводимости и адекватности в уравнениях (1), (2), (3) равны соответственно: 87,5 и 506,25; 0,0154 и 0,00178; 0,53 и 1,144.

По коэффициентам регрессии при факторах X_i можно судить о силе влияния того или иного фактора на определяемую функцию. Из трех полученных уравнений видно, что наиболее значимый из всех – расход исходной воды, подаваемой на деаэрацию (коэффициент при X_1). Весьма сильное влияние на эффективность десорбции газов оказывает и температура исходной воды (коэффициент при X_2). На десорбцию диоксида углерода в системе декарбонизатор – вакуумный деаэратор существенное влияние оказывает начальное содержание диоксида углерода в воде перед декарбонизатором (коэффициент при X_4).

Полученные математические модели работы вакуумного деаэратора позволяют оценить, до какого минимального технологического уровня можно снизить температуру исходной воды, а следовательно, и энергетические затраты на ее подогрев.

При наладке и эксплуатации вакуумных деаэраторов удобно пользоваться графической интерпретацией уравнений регрессии. На рис. 1

представлены графические зависимости, построенные по уравнениям (1), (2), (3).

Из графиков видно, что несмотря на низкий температурный уровень процесса подготовки подпиточной воды, требуемая эффективность десорб-

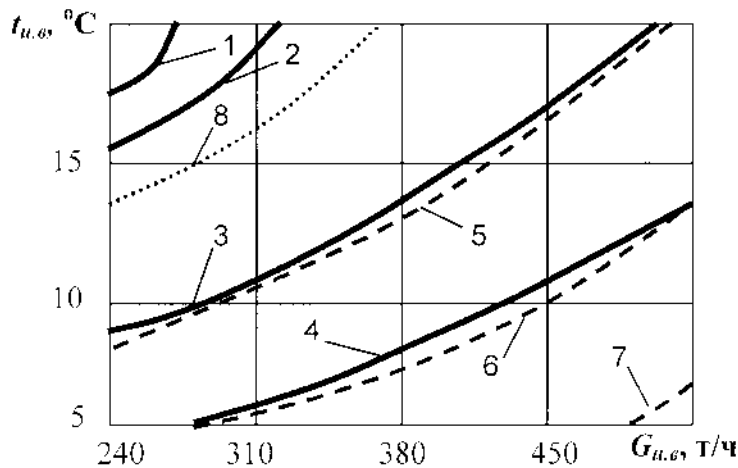


Рис. 1. Линии равного остаточного содержания кислорода 50, 100, 150, 200 мкг/дм³ (1, 2, 3, 4 соответственно); остаточного содержания диоксида углерода 2, 3, 4 мг/дм³ (5, 6, 7 соответственно) и *pH* деаэрированной воды 8,33 (линия 8) при $X_3 = +1$ и $X_4 = 0$

ции диоксида углерода ($Y_2 \geq 8,33$) достигается в значительном диапазоне исследованных режимов. Это можно объяснить достаточно высокой бикарбонатной щелочностью обрабатываемой воды. Требуемая эффективность десорбции растворенного кислорода ($Y_1 \leq 50$ мкг/дм³) достигается только при нижнем уровне производительности установки и при верхнем уровне температуры обрабатываемой воды в исследованных интервалах изменения параметров.

Корректировка нормативов по содержанию растворенного кислорода в подпиточной воде систем теплоснабжения

Анализ состояния отечественных систем теплоснабжения и результатов экспериментального исследования вакуумных деаэраторов, являющихся самым массовым средством противокоррозионной обработки воды для систем теплоснабжения, выявил настоятельную необходимость и технологическую возможность разработки более строгих нормативов по содержанию кислорода в подпиточной воде систем теплоснабжения.

Рассмотрены разработанные в последние годы рекомендации для систем теплоснабжения Североевропейских стран: $pH=9,5-10,0$, O_2 в подпиточной воде – не более 20 мкг/дм³ и нормы, рекомендуемые Европейской Ассоциацией производителей труб для систем централизованного тепло-

снабжения: $pH=9,5-10,0$, O_2 в подпиточной воде – не более 20 мкг/дм^3 , O_2 в сетевой воде – отсутствие. Установлено, что такой режим позволяет полностью исключить внутреннюю коррозию трубопроводов тепловых сетей при использовании большинства типов вод (за исключением особо агрессивных).

Преобразовав полученные проф. Шарановым В.И. многофакторные модели работы струйно-барботажных вакуумных деаэраторов горизонтального типа [2], можно определить предельную нагрузку деаэратора $G_{н.в}$, т/ч, при которой обеспечивается заданное остаточное содержание кислорода 20 мкг/дм^3 при различных параметрах режима деаэрации (для деаэратора ДВ-800):

$$G_{н.в} \leq 600 + [G_{г.а} (0,064t_{н.в} + 0,1037t_{г.а} - 13,44) - 25,92t_{г.а} - 5,252t_{н.в} + 4800] / [0,001G_{г.а} (42,24 - 0,4t_{н.в} - 0,2304t_{г.а}) + 0,01t_{н.в} (19,6 - 0,096t_{г.а}) + 0,1037t_{г.а} - 17,76], \quad (4)$$

где $G_{г.а}$, $t_{г.а}$ – соответственно расход, т/ч, и температура греющего агента – перегретой воды, °С; $t_{н.в}$ – температура исходной воды, °С.

Остаточное содержание кислорода 30 мкг/дм^3 деаэратор ДВ-800 обеспечивает при нагрузке

$$G_{н.в} \leq 600 + [G_{г.а} (0,064t_{н.в} + 0,1037t_{г.а} - 13,44) - 25,92t_{г.а} - 23,2t_{н.в} + 4368] / [0,001G_{г.а} (42,24 - 0,4t_{н.в} - 0,2304t_{г.а}) + 0,01t_{н.в} (19,6 - 0,096t_{г.а}) + 0,1037t_{г.а} - 17,76]. \quad (5)$$

Совместно с Всероссийским теплотехническим научно-исследовательским институтом разработаны предложения по нормированию содержания растворенного кислорода в подпиточной воде систем теплоснабжения. Рекомендовано принять в качестве норматива остаточную концентрацию 30 мкг/дм^3 . С 2001 г. этот норматив установлен в Теплосети Мосэнерго [4].

Разработка новых технологий термической деаэрации воды

Анализ многофакторных математических моделей процесса деаэрации, отражающих степень влияния режимных факторов на эффективность деаэрации, позволил радикально изменить подход к организации технологий термической деаэрации. Сформулированы новые принципы управления процессом деаэрации, в основе которых лежит использование в качестве регулируемых параметров заданных показателей качества деаэрированной воды: остаточных концентраций растворенного кислорода и диоксида углерода [5]. Основное достоинство нового подхода заключается в безусловном

обеспечении нормативного качества деаэрации. В качестве регулирующих параметров процесса деаэрации целесообразно использовать расход и температуру греющего агента, температуру исходной воды и расход выпара.

На основании сформулированного выше подхода создана и запатентована серия новых технологий термической деаэрации [6-20].

Проанализированы управляемые тепловые и гидравлические параметры процесса термической деаэрации, которые было бы возможно наиболее эффективно использовать в качестве регулирующих параметров. Особенно большое количество параметров применимо для регулирования вакуумных деаэрационных установок. Выбор регулирующих параметров определяется составом оборудования и особенностями эксплуатации вакуумных деаэрационных установок.

В качестве примеров технических решений, в которых реализуется новый подход к управлению термическими деаэраторами, ниже рассмотрены четыре способа работы деаэрационной установки. По первому из этих способов заданное качество деаэрации обеспечивается регулированием расхода перегретой воды, подаваемой в качестве греющего агента в вакуумный деаэратор (рис. 2).

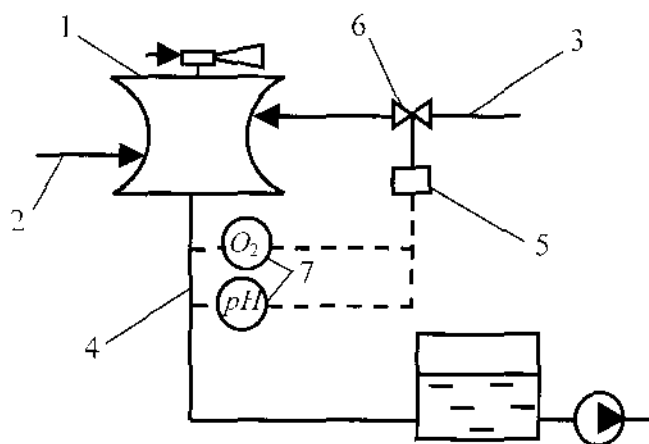


Рис. 2. Схема вакуумной деаэрационной установки с регулированием расхода греющего агента: 1 – вакуумный деаэратор; 2 – трубопровод исходной воды; 3 – трубопровод греющего агента; 4 – трубопровод отвода деаэрированной воды; 5 – регулятор расхода перегретой воды; 6 – регулирующий клапан; 7 – датчики остаточного содержания растворенного кислорода и pH деаэрированной воды

Регулирование расхода греющего агента производится по величине нормативного остаточного содержания растворенного кислорода в деаэрированной подпиточной воде 50 мкг/дм^3 и по заданной величине $pH=8,33$, соответствующей отсутствию в воде диоксида углерода, с помощью регулирующего клапана 6, регулятора расхода перегретой воды 5 и датчиков 7. Датчиками 7 измеряется остаточное содержание кислорода и pH деаэрированной воды и, при отклонении их от заданных величин, регулятор расхода 5

с помощью регулирующего клапана *б* изменяет расход перегретой воды на деаэратор *1*, устанавливая тем самым его величину необходимой и достаточной для поддержания заданных величин *pH* и остаточного содержания кислорода.

На рис. 3 *а* изображена схема вакуумной деаэрационной установки, в которой реализуется технология управления процессом деаэрации, по которой заданное качество деаэрации обеспечивается путем поддержания оптимальной температуры исходной воды перед деаэратором.

Схема вакуумной деаэрационной установки, изображенной на рис. 3 *б*, предусматривает регулирование качества деаэрации с помощью поддержания оптимальной температуры греющего агента.

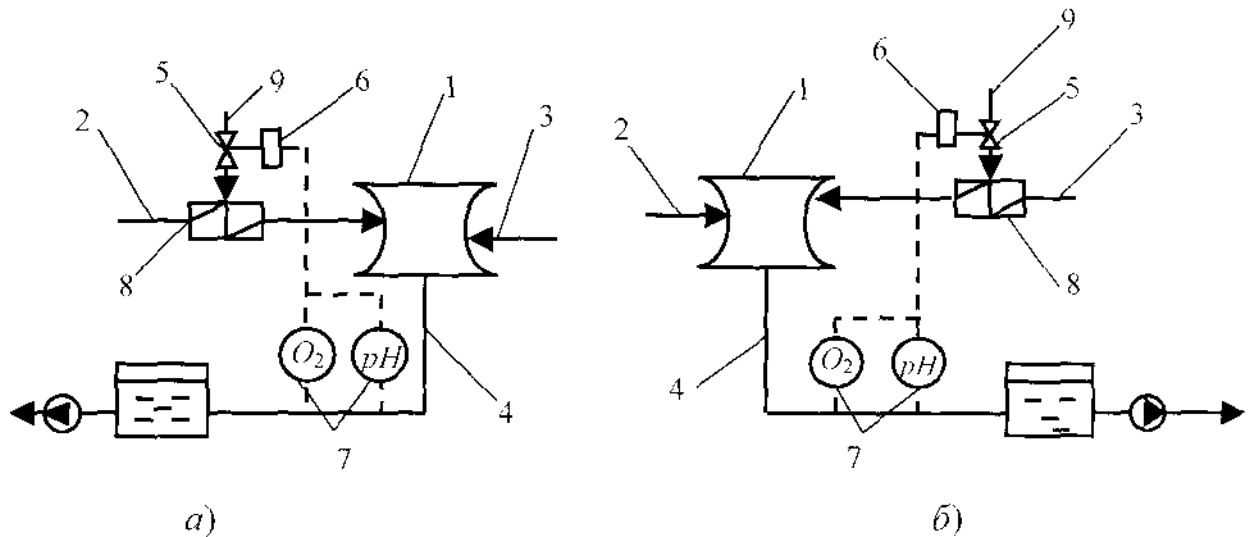


Рис. 3. Схемы вакуумных деаэрационных установок с использованием в качестве регулирующих параметров температуры исходной воды (*а*) и температуры греющего агента (*б*): 1- вакуумный деаэратор; 2 - трубопровод исходной воды; 3 - трубопровод греющего агента; 4 - трубопровод деаэрированной воды; 5 - регулирующий клапан; 6 - регулятор температуры исходной воды и греющего агента соответственно; 7 - датчики остаточного содержания растворенного кислорода и *pH* деаэрированной воды; 8 - подогреватель исходной воды и греющего агента соответственно; 9 - паропровод

Схема деаэрационной установки повышенного давления, изображенной на рис. 4, предусматривает использование в качестве регулирующего параметра расхода пара.

Десорбция растворенного в воде кислорода осуществляется при контакте обрабатываемой воды и греющего агента, которые по трубопроводам 2 и 3 подаются в деаэратор 1, деаэрированная вода отводится из деаэратора по трубопроводу 4, а образовавшийся выпар удаляется из деаэратора по трубопроводу выпара 5.

Регулирование расхода греющего агента производят по величине давления в деаэраторе, с помощью регулятора 6 и регулирующего органа 7, а регулирование расхода выпара – по величине заданного остаточного содержания растворенного кислорода в деаэрированной подпиточной воде с помощью регулятора 8, регулирующего органа 9 и датчика 10.

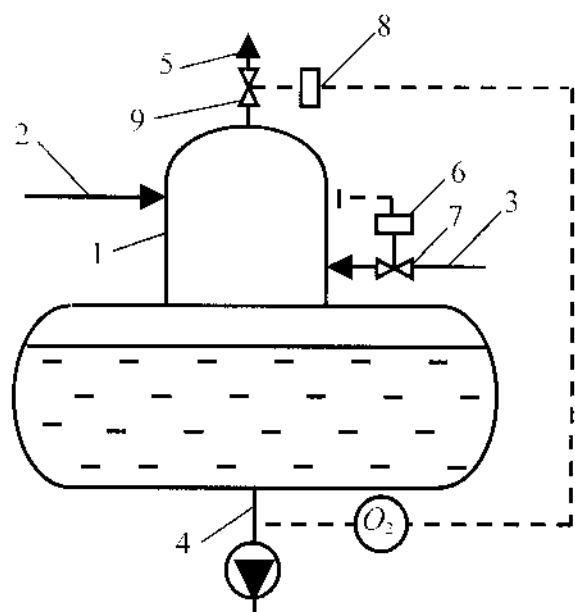


Рис. 4. Схема деаэрационной установки избыточного давления с использованием в качестве регулируемых параметров заданных показателей качества деаэрированной воды, а в качестве регулирующего параметра - расхода выпара: 1 – термический деаэратор избыточного давления; 2 – трубопровод исходной воды; 3 – трубопровод греющего агента; 4 – трубопровод деаэрированной воды; 5 – трубопровод выпара; 6 – регулятор давления; 7, 9 – регулирующий орган; 8 – регулятор расхода выпара; 10 – датчик содержания растворенного кислорода

Датчиком 10 измеряется остаточное содержание кислорода в деаэрированной воде и, при отклонении его от заданной величины, регулятор 8 воздействует на регулирующий орган 9 для увеличения или уменьшения количества выпара. При повышении содержания кислорода сверх заданной величины расход выпара увеличивается, при понижении уменьшается, тем самым изменяется величина давления в деаэраторе и увеличивается или уменьшается расход греющего агента в деаэраторе. Во всех режимах термической деаэрации расходы выпара и греющего агента поддерживаются необходимыми и достаточными для обеспечения заданного остаточного содержания растворенного кислорода, благодаря чему исключается работа деаэрационной установки с излишними или недостаточными расходами выпара и греющего агента, т.е. повышается экономичность и качество термической деаэрации воды.

Эффективность рассмотренных технологий вакуумной деаэрации можно оценить с помощью преобразованных уравнений регрессии, описывающих десорбцию растворенного кислорода в установке с серийным горизонтальным струйно-барботажным деаэратором производительностью 800 т/ч [2].

Определение расхода греющего агента – перегретой воды $G_{г.в}$, т/ч, необходимого и достаточного для обеспечения нормативного остаточного содержания кислорода 50 мкг/дм^3 , производится по формуле

$$G_{г.в} = 250 + [G_{х.о.в} (0,0024t_{г.в}t_{х.о.в} - 0,24t_{х.о.в} - 0,1152t_{г.в} + 18) + t_{х.о.в} (96 - 1,44t_{г.в}) + 69,12t_{г.в} - 10440] / [G_{х.о.в} (0,1056 - 0,000576t_{г.в} - 0,001t_{х.о.в}) + 0,0864t_{г.в} + 0,44t_{х.о.в} - 29,76]. \quad (6)$$

Величины расходов деаэрируемой химически очищенной воды $G_{х.о.в}$ подставляются в формулы (6), (7), (8) в т/ч, температуры химически очищенной воды $t_{х.о.в}$ и перегретой воды $t_{г.в}$ – в $^{\circ}\text{C}$.

При реализации технологии с применением в качестве регулирующего агента температуры исходной химически очищенной воды ее оптимальная величина определяется по формуле

$$t_{х.о.в} = 48 + [G_{х.о.в} (0,144t_{г.в} + 0,0576G_{г.в} - 0,000576G_{г.в}t_{г.в} - 20,88) + G_{г.в} (0,0864t_{г.в} - 8,64) - 21,6t_{г.в} + 7992] / [G_{х.о.в} (0,001G_{г.в} + 0,0024t_{г.в} - 0,49) - 1,44t_{г.в} - 0,44G_{г.в} + 206]. \quad (7)$$

Оптимальное значение температуры греющего агента – перегретой воды $t_{г.в}$, $^{\circ}\text{C}$, необходимое и достаточное для обеспечения нормативного остаточного содержания кислорода, определяется из выражения

$$t_{г.в} = 100 + [G_{х.о.в} (0,0052G_{г.в}t_{х.о.в} - 1,3t_{х.о.в} - 0,2496G_{г.в} - 96,096) + G_{г.в} (109,824 - 2,28t_{х.о.в}) - 322,4t_{х.о.в} - 45801,6] / [G_{х.о.в} (1,35 - 0,003G_{г.в} - 0,0125t_{х.о.в}) + 7,5t_{х.о.в} + 0,45G_{г.в} - 472,5]. \quad (8)$$

Выполнен расчет расходов вышара $D_{выш}$ т/ч, термического деаэратора ДП-500 в зависимости от удельных теоретического d' , нормативного d'' и фактического $d^{ф}$ расходов вышара. Результаты расчетов представлены на рис. 5.

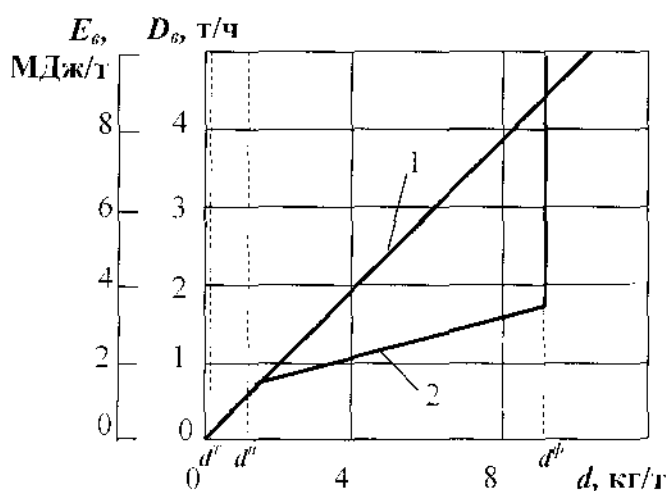


Рис. 5. Зависимости расхода вышара (линия 1) термического деаэратора ДП – 500 и удельных затрат эксергии с вышаром (линия 2) от величины удельного расхода вышара

Энергетическая эффективность новых технологий регулирования деаэрационных установок

Проанализирована тепловая экономичность новых технологий термической деаэрации воды с помощью метода определения удельных затрат эксергии на деаэрацию (УЗЭД) и с помощью метода определения удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении (УВЭТП) [21].

Удельные затраты эксергии E , кДж/т, на термическую деаэрацию 1 т воды определяются по формуле:

$$E = E_e + E_m + E_{z.o.a} + E_{вып} - E_{o.a} \quad (9)$$

где E_e – затраты эксергии в виде электроэнергии; E_m – затраты эксергии в виде теплоты на подогрев теплоносителей перед деаэратором; $E_{z.o.a}$ – затраты эксергии на работу газоотводящего аппарата вакуумного деаэратора в пересчете на 1 т обрабатываемой воды; $E_{вып}$ – потери эксергии с выпаром; $E_{o.a}$ – эксергия деаэрированной воды.

На рис. 6 представлены зависимости технологически необходимого расхода перегретой воды, используемого в качестве регулирующего параметра, и удельных затрат эксергии на деаэрацию от нагрузки деаэратора при регулировании по заданному остаточному содержанию растворенного

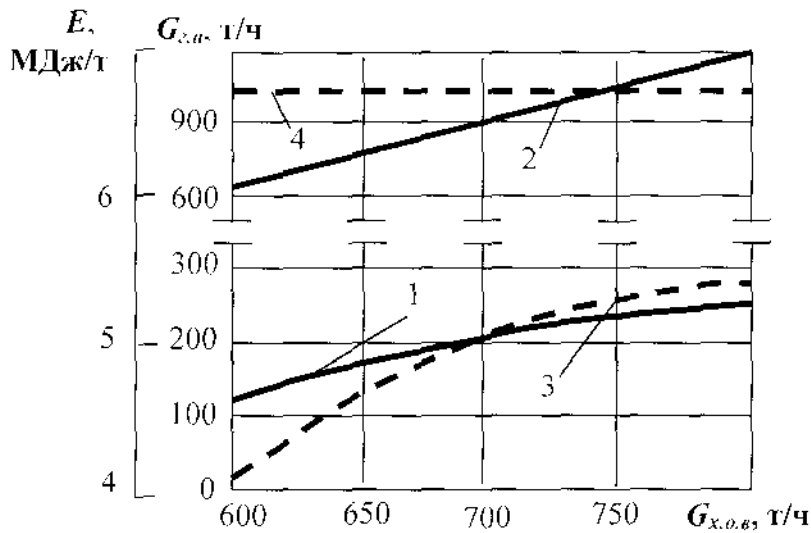


Рис. 6. Зависимости технологически необходимого расхода перегретой воды (1, 2) и удельных затрат эксергии (3, 4) при регулировании термической деаэрации по новой (1, 3) и традиционной (2, 4) технологиям. Линии построены при $t_{х.о.в} = 30^\circ\text{C}$, $t_{с.а} = 80^\circ\text{C}$

кислорода в деаэрированной воде $O_2 = 50 \text{ мкг/дм}^3$ (линии 1 и 3) и по традиционной технологии по поддержанию постоянного давления в деаэраторе $p = 0,032 \text{ МПа}$ (линии 2, 4).

Как следует из графиков, применение нового способа дает возможность поддерживать расход перегретой воды на 500-750 т/ч ниже, чем при регулировании по заданной величине давления (разрешения) в деаэраторе и, соответственно, снизить удельные затраты эксергии на 20 – 40 %.

На рис. 5 представлены расходы пара и удельные потери эксергии с отводом пара для деаэратора ДП – 500 при различных значениях удельных расходов пара: теоретическом удельном расходе пара d' , нормативном удельном расходе пара d'' , и фактическом удельном расходе пара при полностью открытом трубопроводе отвода пара d''' . Фактическому значению удельного расхода пара соответствуют два значения удельных потерь эксергии. Значение $E_a = 3,54$ МДж/т характеризует затраты эксергии при утилизации пара в охладителе пара, а значение $E_a = 9,97$ МДж/т – затраты эксергии при отводе пара непосредственно в атмосферу.

Регулирование расхода пара по новым технологиям позволяет снизить расход греющего пара, подаваемого в деаэратор ДП - 500 при полной нагрузке, и затраты эксергии на 55 – 85 % по сравнению с традиционным нерегулируемым отводом пара из деаэратора.

Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении $v_{т.ф.}$, кВт ч/т, получаемая за счет отборов пара на подогрев 1 т деаэрируемой воды, определяется по формуле

$$v_{т.ф.} = (\sum N_{т.ф.і} - N_{с.п.}^{с.д.}) / G_{подп.}, \quad (10)$$

где $\sum N_{т.ф.і}$ – сумма мощностей, развиваемых теплофикационной турбоустановкой на тепловом потреблении за счет отборов пара на подогрев теплоносителей водоподготовительной установки, кВт; $N_{с.п.}^{с.д.}$ – мощность, затрачиваемая на привод насосов, перекачивающих в контуре установки воду, используемую в качестве греющего агента для вакуумной деаэрации, кВт; $G_{подп.}$ – расход обрабатываемой подпиточной или добавочной питательной воды, т/ч.

На рис. 7 представлены зависимости удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении при регулировании расхода греющего агента по новым (линия 1) и традиционным (линия 2) технологиям регулирования термической деаэрации воды при $t_{х.о.в} = 30$ °С, $t_{г.д} = 80$ °С.

Годовая экономия условного топлива ΔB , т/год, при переходе от традиционных технологий термической деаэрации к новым определяется по формулам:

$$\Delta B = 2,78 \cdot 10^{-10} \Delta E b_2 G_{\text{ноот.}}; \quad (11)$$

$$\Delta B = 10^{-6} \Delta v_{\text{т.ф.}} \Delta b_2 G_{\text{ноот.}}, \quad (12)$$

где ΔE , $\Delta v_{\text{т.ф.}}$ – изменение удельных затрат эксергии на деаэрацию, кДж/т, и удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении за счет отборов пара на деаэрацию и на подогрев теплоносителей перед деаэраторами, кВт·ч/т; $G_{\text{ноот.}}$ – годовой расход деаэрированной воды, т/год; b_2 – удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии г/кВт·ч; Δb_2 – разность удельных расходов условного топлива на выработку электрической

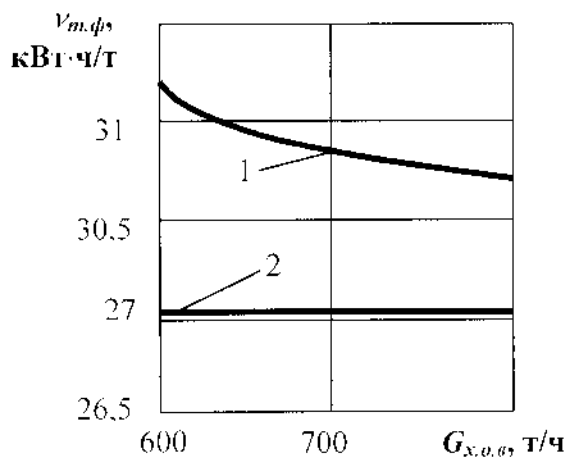


Рис. 7. Зависимости удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении при регулировании расхода греющего агента по заданному остаточному содержанию растворенного кислорода в деаэрированной воде $O_2 = 50 \text{ мкг/дм}^3$ (линия 1) и по поддержанию постоянного давления в деаэраторе $p = 0,032 \text{ МПа}$ (линия 2). Линии построены при $t_{\text{х.о.в.}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{г.д.}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

энергии по конденсационному и теплофикационному циклам, г/кВт·ч.

На рис. 8 представлены зависимости экономии условного топлива

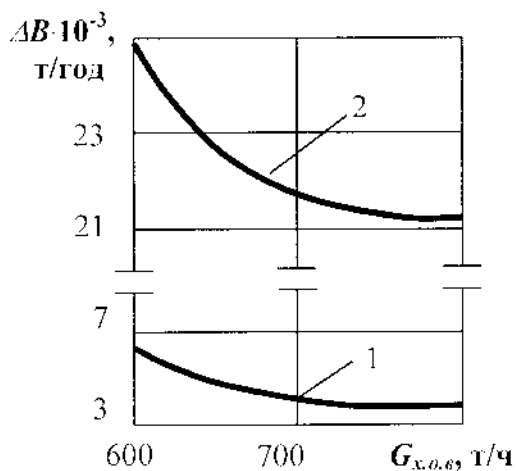


Рис. 8. Зависимости экономии условного топлива от нагрузки деаэратора ДВ-800 при переходе от традиционных к новым технологиям регулирования термической деаэрации воды, определенной по удельным затратам эксергии (линия 1) и по удельной выработке электроэнергии на тепловом потреблении (линия 2)

в установке со средней производительностью 3000 т/ч от нагрузки деаэраторов ДВ-800.

Как видно из рис. 8, экономия топлива, полученная при расчете методом УВЭТП, почти на порядок выше величины экономии, определенной по методу УЗЭД. Эта разница объясняется тем, что с помощью метода удельных затрат эксергии учтена экономия топлива, затрачиваемого собственно на работу деаэрационной установки, а с помощью метода определения удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении удастся определить общестанционную экономию условного топлива от совершенствования технологий термической деаэрации, в том числе, – за счет оптимального перераспределения нагрузки между отборами теплофикационных турбин.

Из приведенного анализа тепловой экономичности разработанных технологий термической деаэрации следует, что их применение приводит к значительному снижению энергетических затрат на деаэрацию при одновременном обеспечении требуемого качества десорбции коррозионно-активных газов.

Выводы

1. Выполнен комплекс научно обоснованных технических и технологических разработок, позволяющих существенно повысить эффективность термической деаэрации воды на тепловых электростанциях.
2. В результате промышленного эксперимента получены многофакторные математические модели процесса вакуумной деаэрации, новизна которых заключается в описании области режимов с низкой температурой теплоносителей перед деаэраторами и оценке влияния на массообменную эффективность деаэрации воды расхода воздуха, подаваемого на декарбонизаторы, и начального содержания CO_2 в исходной воде.
3. Доказана необходимость и технологическая возможность корректировки стандарта по содержанию растворенного кислорода в подпиточной воде систем теплоснабжения. Рекомендовано принять в качестве этого норматива 30 мкг/дм³.
4. На основании анализа результатов многофакторного экспериментального исследования процесса деаэрации воды разработан новый подход к обеспечению эффективности термической деаэрации, в основу которого положено использование в качестве регулируемых параметров заданных

- показателей качества деаэрированной воды: остаточных концентраций растворенных кислорода и диоксида углерода.
5. Новый подход к управлению термическими деаэраторами реализован в серии технологий деаэрации воды на тепловых электростанциях. Полученные в результате экспериментов модели, описывающие эффективность десорбции кислорода и диоксида углерода из подпиточной воды, позволяют оценить, до какого минимального технологического уровня можно снизить энергетические затраты на деаэрацию.
 6. Для определения энергетической эффективности новых технологий термической деаэрации в котельных установках рекомендовано применение метода удельных затрат эксергии. На ТЭЦ экономия топлива от применения новых технологий рекомендовано определять методом удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении за счет отборов пара на деаэрацию и подогрев теплоносителей перед деаэраторами.
 7. Оценены энергетические затраты на осуществление новых и традиционных технологий термической деаэрации воды. Установлено, что применение новых технологий позволяет снизить энергетические затраты на деаэрацию до 50 % при гарантированном обеспечении заданного качества деаэрированной воды. Наибольший эффект достигается в вакуумных деаэрационных установках ТЭЦ с крупными открытыми системами теплоснабжения. Так, на деаэрационной установке Саратовской ТЭЦ-5 со средним расходом подпиточной воды 3000 т/ч годовая экономия условного топлива от применения новых технологий (патенты № 21445508, № 2144509) превышает 10000 тонн.

Список литературы

1. Шарпов В.И. Принципы управления технологическими процессами// Теплоэнергетика и теплоснабжение. Сборник научных трудов НИЛ «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ. Вып.1. Ульяновск. 2002. С. 8-20.
2. Шарпов В.И. Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов. М.: Энергоатомиздат. 1996. 176 с.
3. Шарпов В.И., Цюра Д.В. Экспериментальное исследование системы декарбонизатор - вакуумный деаэратор// Научно-технический калейдоскоп. 2000. № 3. С. 100-104.
4. Шарпов В.И., Балабан-Ирменит Ю.В., Цюра Д.В. О нормах содержания растворенного кислорода в подпиточной воде систем теплоснабжения// Теплоэнергетика. 2002. № 1. С. 69-71.

5. Шаратов В.И., Цюра Д.В. О регулировании термических деаэраторов// Электрические станции. 2000. № 7. С. 21-24.
6. Патент № 2142417(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Способ вакуумной деаэрации воды/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 1999. № 34.
7. Патент № 2143402(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Деаэрационная установка/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 1999. № 36.
8. Патент № 2144508(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Способ термической деаэрации воды/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 2.
9. Патент № 2144509(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Способ термической деаэрации воды/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 2.
10. Патент № 2147558(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Способ вакуумной деаэрации воды/ В.И. Шаратов, Д.В.Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 11.
11. Патент № 2147559(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Вакуумная деаэрационная установка/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 11.
12. Патент № 2148022(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Деаэрационная установка/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 12.
13. Патент № 2148023(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Деаэрационная установка/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 12.
14. Патент № 2155713(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Способ термической деаэрации воды/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 25.
15. Патент № 2155712(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Способ термической деаэрации воды/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 25.
16. Патент № 2155715(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Деаэрационная установка/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 25.
17. Патент № 2153468(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Деаэрационная установка/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 21.
18. Патент № 2153469(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Вакуумная деаэрационная установка/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 21.
19. Патент № 2154030(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Способ термической деаэрации воды/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 22.
20. Патент № 2155161(RU). МПК⁶ С 02 F 1/20. Способ термической деаэрации воды/ В.И. Шаратов, Д.В. Цюра// Бюллетень изобретений. 2000. № 24.
21. Шаратов В.И., Цюра Д.В. О методах оценки энергетической эффективности технологий управления процессами термической деаэрации воды на тепловых электростанциях// Материалы Третьей Российской научно-технической конференции "Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности". Ульяновск: УлГТУ. 2001. С. 289-292.