



ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАКУУМНО-КАВИТАЦИОННОГО СПОСОБА ДЕАЭРАЦИИ ВОДЫ

Д.т.н., проф. Кудинов А. А.¹, к.т.н. Зиганшина С. К.¹ (ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»)

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты экспериментальных исследований вакуумно-кавитационного деаэратора подпиточной воды Самарской ГРЭС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вакуум, кавитация, деаэратор, химически очищенная вода, температура насыщения, растворенный кислород, удаление, деаэрированная вода, тепловые испытания.

В настоящее время противокоррозионную обработку питательной воды паровых котлов и подпиточной воды систем теплоснабжения производят в основном путем физической десорбции растворенных в воде газов. В качестве физических десорберов применяются теплообменные аппараты различных конструкций. Первоначальное выделение диоксида углерода из исходной воды производится в декарбонизаторах, а окончательное удаление растворенных кислорода и диоксида углерода осуществляется в термических деаэраторах за счет нагрева и диспергирования воды в потоке пара и последующего удаления образовавшейся парогазовой смеси – выпара [1, 2].

Термическая деаэрация позволяет снизить содержание кислорода и диоксида углерода в обрабатываемой воде до величин, допускаемых нормами Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей [3]. В качестве дополнительных средств противокоррозионной обработки воды на заключительной стадии водоподготовки применяются различные методы химического связывания растворенных коррозионно-активных газов с помощью едкого натра, аммиака, гидразина, сульфата натрия и др.

Обязательным условием глубокой деаэрации воды в термических деаэраторах является нагрев деаэрируемой воды до температуры насыщения t_s , соответствующей давлению в деаэраторе. По способу достижения температуры насыщения t_s деаэрируемой воды термические деаэраторы бывают двух типов: 1) деаэраторы-подогреватели; 2) деаэраторы перегретой воды.

В деаэратор-подогреватель деаэрируемая вода поступает при температуре на 10–30°C ниже t_s . В деаэраторе вода подогревается до температуры t_A , приближающейся к t_s , но всегда меньшей чем t_s [2]. Невозможность достижения t_s объясняется тем, что для нагрева воды до t_s требуется бесконечно большая поверхность теплообмена, т.к. в результате нагрева воды температурный напор

$\Delta t_s = t_s - t_A$ стремится к нулю. Для повышения эффективности работы деаэраторы-подогреватели имеют развитые поверхности теплообмена, расположенные в зоне подогрева воды и специальные барботажные устройства, что усложняет их конструкцию и снижает надежность. Наименьшей надежностью обладают дырчатые листы, с помощью которых организуется поверхность теплообмена. Каждый лист имеет несколько тысяч отверстий диаметром 8–10 мм, которые в процессе работы деаэратора засоряются и интенсивно корродируют в горячей, частично деаэрируемой воде.

В деаэраторе перегретой воды подогрев деаэрируемой воды не производят, т.к. она подается в деаэратор перегретой, т.е. при температуре превышающей t_s . В деаэраторе часть перегретой деаэрируемой воды превращается в пар, а оставшаяся часть воды приобретает температуру t_s , соответствующую давлению в деаэраторе. В этом случае отпадает необходимость организации теплообмена второй ступени подогрева и деаэрации в виде барботажного листа, что значительно упрощает конструкцию деаэратора.

Несмотря на многие преимущества, деаэраторы перегретой воды в настоящее время не нашли широкого применения в промышленности и на ТЭЦ. Это обусловлено тем, что устройства (форсунки), применяемые для распыливания деаэрируемой воды, имеют несовершенную конструкцию, на них образуются солевые отложения, из-за чего происходит грубое распыливание, что приводит к снижению интенсивности десорбции газов из воды в пар и к повышению их концентрации в деаэрируемой воде.

Поэтому на отечественных ТЭЦ для десорбции растворенных газов из подпиточной воды тепловых сетей применяются, как правило, вакуумные струйно-барботажные деаэраторы горизонтального типа серии ДВ (ДСВ) производительностью 400–1200 м³/ч конструкции НПО ЦКТИ г. Санкт-Петербурга совместно с Саратовским заводом энергетического машиностроения (СЗЭМ). В соответствии с ГОСТ 16860-88 деаэраторы должны

¹ 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244



обеспечивать содержание кислорода в деаэрированной воде не более 50 мкг/дм³ [3].

На кафедре ТЭС Самарского государственного технического университета разработан и внедрен на центральной отопительной котельной (ЦОК) Самарской ГРЭС деаэратор перегретой воды, который назван вакуумно-кавитационным [4]. Способ деаэрации химически очищенной воды основан на применении явления кавитации в движущемся потоке жидкости [5, 6]. В потоке движущейся жидкости (воды) создаются условия для понижения статического давления до значения, равного упругости насыщенного пара при данной температуре. Для случая, когда в деаэраторе поддерживается давление меньше атмосферного, такой способ деаэрации химически очищенной воды назван вакуумно-кавитационным [4]. При реализации данного способа деаэрации воды не нужно подавать в деаэратор греющий теплоноситель и не требуется создавать специальные устройства для дробления потока на тонкие струйки и мелкие капли, а также устройства для увеличения поверхности массообмена теплоносителей, т. к. греющий теплоноситель отсутствует.

Таким образом, вакуумно-кавитационный способ деаэрации воды заключается в том, что в деаэраторе поддерживается с помощью эжектора давление более низкое, чем давление насыщения при температуре, до которой нагрета деаэрируемая вода. За счет этого вода, подаваемая в деаэратор, оказывается перегретой и вскипает. Для реализации данного метода деаэрации воды была создана экспериментальная установка, включенная в технологическую схему деаэратора типа ДСА-200 ЦОК Самарской ГРЭС Волжской территориальной генерирующей компании.

ЦОК Самарской ГРЭС Волжской территориальной генерирующей компании снабжает теплом ряд микрорайонов г. Самара. Система теплоснабжения открытого типа, теплота используется на отопление и горячее водоснабжение жилых зданий и коммунально-бытовых объектов. Теплопроизводительность ЦОК составляет 600 Гкал, проектная величина подпитки теплосети – 2000 т/ч. По первоначальному проекту подготовка подпиточной воды осуществлялась по следующей схеме: 1) частичное умягчение воды на Н-катионитных фильтрах при «голодной регенерации»; 2) освобождение воды от СО₂ в декарбонизаторах; 3) подогрев воды до температуры 60÷80°С в поверхностных подогревателях типов ОГ-130 и МВН 2052-36 горячей сетевой водой; 4) деаэрация воды в вакуумных деаэраторах паром, образующимся из перегретой воды.

Деаэрация производилась в четырех деаэрационных колонках типа ДСА-200 и четырех колонках типа ДСА-300. Колонки размещены на четырех баках – аккумуляторах, по две однотипные колонки на каждом баке. Номинальная производительность деаэраторов составляет 2000 м³/ч (два деаэратора

производительностью по 400 т/ч и два деаэратора производительностью по 600 т/ч каждый).

Одним из недостатков в работе ЦОК была плохая деаэрация подпиточной воды. Причина заключалась в том, что в соответствии с проектом на ЦОК были установлены деаэраторы типа ДСА (атмосферного типа), рассчитанные на подвод в качестве греющего теплоносителя пара от постороннего источника. Однако в действительности деаэрация подпиточной воды осуществлялась под вакуумом с помощью собственного пара, образующегося при вскипании перегретой воды. Деаэрация воды в таких деаэраторах происходила недостаточно глубоко. Вследствие этого содержание СО₂ и О₂ в 2÷3 раза превышало нормируемые ПТЭ величины, составляющие соответственно 0 и 50 мкг/дм³. Особенно ухудшалось качество деаэрированной воды при нагрузках деаэраторов, близких к номинальным. Это приводило к интенсивной коррозии трубопроводов тепловых сетей и оборудования котельной. Проведенные в 1973 году работы по наладке режимов деаэрации желаемых результатов не дали. Было принято решение выполнить реконструкцию деаэраторов ЦОК Самарской ГРЭС. Для этих целей применен вакуумно-кавитационный способ деаэрации химически очищенной воды, основанный на использовании явления кавитации в движущемся потоке жидкости.

С целью внедрения теоретических разработок была создана экспериментальная установка, состоящая из деаэрационной колонки и кавитатора, включенная в технологическую схему деаэратора ст. № 2 ЦОК, на которой были проведены исследования. Результаты исследований опубликованы в [4].

Следующим этапом работы было создание опытно-промышленной установки, деаэрация воды в которой осуществляется вследствие кавитации в движущемся потоке жидкости. Работа выполнялась также на ЦОК Самарской ГРЭС. Для этих целей использовался бак-аккумулятор ДСА ст. №4, который имеет емкость 75 м³, длину 11,5 м, диаметр 3,2 м. Деаэратор подвергался следующему переоборудованию:

1. Деаэрируемая вода подводится в паровой объем бака через сопла переменного поперечного сечения – кавитационно-разгонные устройства (КРУ) [5, 6].

2. КРУ с помощью фланцев прикреплены к патрубкам $d_y=300$ мм, сварены в обе торцевые стенки бака. На каждом баке-аккумуляторе установлены 4 КРУ, по два с каждого торца. Расстояние между осями соседних по торцу КРУ по горизонтали составляет 1000 мм, расстояние по вертикали между осями КРУ и осью бака – 1000 мм.

3. Проложен трубопровод $d_y=200$ мм для подвода деаэрируемой воды к КРУ.

4. Для измерения расхода воды через КРУ на



Рис. 1. Кавитационно-разгонные устройства бака-аккумулятора деаэрата DCA-200.



Рис. 2. Общий вид деаэрата.

трубопроводах установлены измерительные шайбы (диафрагмы).

5. В баке установлены три поворотных паротборника для отбора проб деаэрируемой воды из движущегося в паровом пространстве бака пароводяного потока с целью контроля десорбции по длине потока.

6. Поверхностный подогреватель деаэрируемой воды заменен на подогреватель смешивающего типа.

В целом схема и устройства вакуумирования деаэрата были оставлены без изменений. Общий вид кавитационно-разгонных устройств (сопл переменного поперечного сечения) и деаэрата представлены на рисунках 1 и 2.

Деаэрационная установка, снабженная четырьмя КРУ-80-4,5 и смешивающим подогревателем, обеспечивала устойчивую деаэрацию воды при расходах деаэрируемой воды в пределах 160÷500 т/ч. При этом в деаэрированной воде свободная углекислота отсутствовала, а среднее значение концентрации кислорода в деаэрированной воде составляло 10 мкг/дм³ (см. таблицу 1). В целом установка работала надежно. При температуре греющей воды в интервале 126÷135°С и давлении в интервале 2,7÷4,8 ата в смешивающем подогревателе отсутствовали гидравлические удары. Анализ работы деаэрата показал, что для глубокой деаэрации воды необходимо, чтобы перегрев воды был не менее 3,5°С. При больших расходах деаэрируемой воды (свыше 800 т/ч) проявились недостатки в работе охладителей эжекторов, отчего вакуум в деаэрате ухудшался, не достигалась требуемая степень перегрева и, как следствие, увеличивалась концентрация CO₂ и O₂.

Было выявлено, что для обеспечения безопасной работы смешивающего подогревателя и бака-аккумулятора деаэрата в случае аварийного снижения давления деаэрируемой воды перед

Таблица 1. Результаты испытаний вакуумно-кавитационного деаэрата.

Расход воды, т/ч			Температура воды, °С				$\Delta t_{\text{пер}}$, °С	Абсолютное давление, кгс/см ²		Остаточная концентрация, мкг/дм ³	
$G_{\text{хов}}$	$G_{\text{см}}$	G_r	$t_{\text{хов}}$	t_r	$t_{\text{см}}$	t_d		$p_{\text{см}}$	p_d	CO ₂	O ₂
500	800	300	40	135	76	72,5	3,5	2,7	0,35	0	10
450	680	230	51	131	78	74	4,0	4,4	0,38	0	10
435	650	215	46	123	72	68,2	3,8	4,1	0,29	0	10
400	610	210	49	134	78	74	4,0	3,3	0,38	0	10
350	700	350	32	128	80	75	5,0	3,8	0,40	0	10
190	320	130	43	126	87	81	6,0	4,3	0,50	0	10
160	340	180	45	126	78	84	4,0	4,5	0,57	0	10

Примечание: концентрация CO₂ в химочищенной воде на входе в деаэрат составляла 2,2–2,8 мг/дм³.

смешивающим подогревателем целесообразно установить автоматически действующий клапан, прекращающий подачу греющей воды в подогреватель. Для предупреждения эрозии подпиточных насосов уровень деаэрированной воды в баке-аккумуляторе следует поддерживать не ниже геометрической оси бака. Необходимо улучшить работу вакуумирующих устройств.

Результаты исследования экспериментальной модели и опытно-промышленной установки позволили внедрить метод вакуумно-кавитационной деаэрации на ЦОК Самарской ГРЭС. В настоящее время в котельном цехе установлено 4 деаэрационные установки, каждая из которых включает следующее оборудование:

1. Бак-аккумулятор деаэрированной воды объемом 75 м³, длиной 11,5 м и диаметром 3,2 м.

2. Четыре КРУ, максимальной производительностью 250 т/ч каждая (производительность деаэратора 1000 т/ч).

3. Смешивающий подогреватель производительностью 1000 м³/ч.

4. Два охладителя выпара.

5. Четыре водоструйных эжектора.

6. Бак эжекторной воды объемом 8 м³.

7. Два гидрозатвора, которые служат для предохранения бака деаэратора от разрушения при повышении вакуума.

Внутри корпуса деаэратора установлены 4 отражательных экрана для увеличения площади соприкосновения воды и пара. Деаэрированная вода подается на насосы подпиточной воды по трубопроводу, который врезан в нижнюю часть бака-аккумулятора. В нижнюю часть бака-аккумулятора врезан дренажный трубопровод $d_y = 100$ мм. По воде и вакууму деаэраторы соединены уравнительными трубопроводами $d_y = 300$ мм и $d_y = 150$ мм соответственно. В верхней части корпуса деаэратора имеются 2 врезки трубопроводов $d_y = 300$ мм, по которым происходит отсос паро-воздушной смеси эжекторами. Контроль за уровнем воды и вакуумом в деаэраторе, за температурой воды на входе и выходе из деаэратора осуществляется с помощью вторичных приборов, установленных на главном щите управления, и первичных, установленных непосредственно на деаэраторе. Схема включения

вакуумно-кавитационного деаэратора в систему теплоснабжения Самарской ГРЭС представлена на рис. 3.

Осенью 2009 г. были проведены обследования вакуумно-кавитационных деаэраторов ЦОК Самарской ГРЭС, результаты которых представлены в таблице 2.

Анализ результатов обследования показал, что вакуумно-кавитационные деаэраторы, установленные на ЦОК Самарской ГРЭС в настоящее время работают достаточно эффективно, средние значения содержаний кислорода в деаэрированной воде составляют 4,5; 5,0; 13,6; 7,1 мкг/дм³ соответственно для деаэраторов ст. № 1, 2, 3, 4.

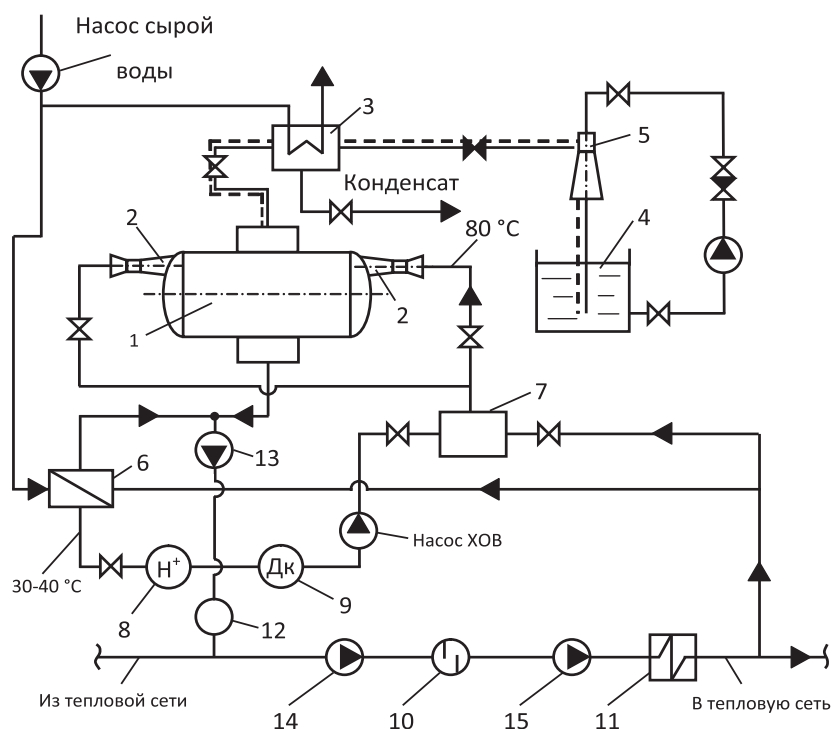


Рис. 3. Схема включения вакуумно-кавитационного деаэратора: 1 – корпус деаэратора; 2 – сопло переменной поперечного сечения; 3 – охладитель выпара; 4 – расходный бак эжектора; 5 – водоструйный эжектор; 6, 7 – подогреватели исходной и химочищенной воды; 8 – Н-катионитный фильтр; 9 – декарбонизатор; 10 – фильтр; 11 – водогрейный котел; 12 – узел подпитки; 13, 14, 15 – соответственно подпиточный, бустерный и сетевой насос.

Таблица 2. Содержание кислорода O_2 , мкг/дм³ в деаэрированной воде.

Дата	Расход воды, т/час	Давление p , кг-с/см ²	Температура воды t_b , °C	Перегрев воды Δt_b , °C	Станционный номер деаэратора			
					№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
26.12. 2009 г.	550	0,65	76,8	4,5	3,5	3,5	7,5	7,0
27.12. 2009 г.	578	0,62	78,7	4,5	4,0	5,5	17,5	6,0
28.12. 2009 г.	580	0,64	77,4	4,5	3,0	4,5	8,0	6,0
29.12. 2009 г.	579	0,64	77,4	4,5	8,0	5,0	16,5	11,0
30.12. 2009 г.	564	0,62	78,7	4,5	4,0	6,5	18,5	5,5

Норма содержания растворенного O_2 в подпиточной воде тепловых сетей – не более 50 мг/дм³, концентрация CO_2 в воде после всех деаэраторов равна нулю.

В заключении отметим, что в соответствии с требованием СанПиН 2.1.4.2496-09 (п. 3.3.4) деаэрация подпиточной воды открытых систем теплоснабжения должна проводиться при температуре более 100°C. Результаты исследований изложены в [8, 9, 10]. Для оценки применимости вакуумных деаэраторов в водоподготовительных установках открытых систем теплоснабжения проведен анализ поведения патогенных микроорганизмов при технологически оптимальных температурах вакуумной деаэрации подпиточной воды. Санитарно-показательными микробами, определение которых необходимо в воде, являются микробы группы кишечной палочки и энтерококки. Данные по термостойкости этих бактерий и других патогенных микроорганизмов (сальмонеллы, холерного вибриона и др.) показывают, что полное уничтожение их гарантируется в результате выдержки воды при температуре 70°C в течение 1 ч или при температуре 60°C в течение 2 ч. Таким образом, оптимальная для вакуумной деаэрации по условиям экономичности температура 60°C позволяет обеспечить термическую дезинфекцию воды.

Вытеснение атмосферных деаэраторов вакуумными в водоподготовительных установках открытых систем теплоснабжения в 70-е годы прошлого столетия было обусловлено стремлением исключить недостатки, присущие атмосферным аппаратам: низкое качество деаэрации, малая единичная производительность, низкая экономичность, особенно при подготовке больших объемов подпиточной воды.

При расходе подпиточной воды теплосети 5000–6000 м³/ч, характерном для ТЭЦ Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Самары и других крупных городов, годовая экономия приведенных затрат при использовании вакуумных деаэраторов вместо атмосферных достигает десятки млн. руб. Отсюда следует, что замена вакуумной

деаэрации подпиточной воды открытых систем теплоснабжения на атмосферную, предписываемая СанПиН 2.1.4.2496-09, связана с колоссальными народнохозяйственными издержками и на практике не может быть осуществлена.

Следует отметить, что бактериологические показатели горячей сетевой воды на участках системы теплоснабжения, подключенных как к ТЭЦ с вакуумными деаэраторами, так и к станциям с атмосферными деаэраторами подпиточной воды, одинаковы, т.е. способ деаэрации практически не сказывается на эпидемической надежности открытых систем теплоснабжения [10].

Литература

1. Копылов А. С., Лавыгин В. М., Очков В. Ф. Водоподготовка в энергетике. М.: Издательство МЭИ, 2006. 309 с.
2. Исследование режимов работы вакуумных деаэраторов сетевой воды Самарской ТЭЦ и их реконструкция. / А. А. Кудинов, Ю. С. Панамарев, Д. В. Обухов и др. // Электрические станции, 2010. № 2. С. 38–40.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: СПО ОРГРЭС, 2003. 320 с.
4. Исследование режимов работы вакуумно-кавитационных деаэраторов Самарской ГРЭС / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина, Н. В. Борисова и др. // Электрические станции, 2011. № 2. С. 38–42.
5. Патент № 2321545 (RU). МПК7 С 02 F 1/20. Способ работы деаэратора перегретой воды / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина, А. С. Кувькин // Б. И. № 10, 2008.
6. А. С. № 635045 (СССР). С 02 В 1/10. Деаэратор перегретой воды / В. Д. Муравьев, В. Б. Черепанов, А. Г. Свердлов и др. // Б. И. № 44, 1978.
7. Патент № 2476767 (RU). МПК7 F 22 D 1/50. Деаэратор перегретой воды / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина, Н. В. Борисова. // Б. И. № 6, 2013.
8. Шарапов В. И. Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов. М.: Энергоатомиздат, 1996. 176 с.
9. Кудинов А. А., Зиганшина С. К. Энергосбережение в теплотехнологиях и теплотехнологиях. М.: Машиностроение, 2011. 374 с.
10. Зимин Б. А. Нужно ли запрещать работу вакуумных деаэраторов? // Энергетик, 2009, № 12. С. 15–16.