

Проблемы термической деаэрации воды для систем теплоснабжения

Д.т.н. В.И.Шарапов, профессор, зав. кафедрой ТГВ, Ульяновский государственный технический университет

Статья подготовлена по материалам доклада на заседании Научно-технического совета ПАО «ЕЭС России» (секция теплофикации). Выводы доклада приняты в качестве решения НТС ПАО «ЕЭС России», являющегося нормативным отраслевым документом.

Введение

Термическая деаэрация воды является и, должно быть, еще долгое время будет одним из основных средств обеспечения надежности систем теплоснабжения и их теплоисточников.

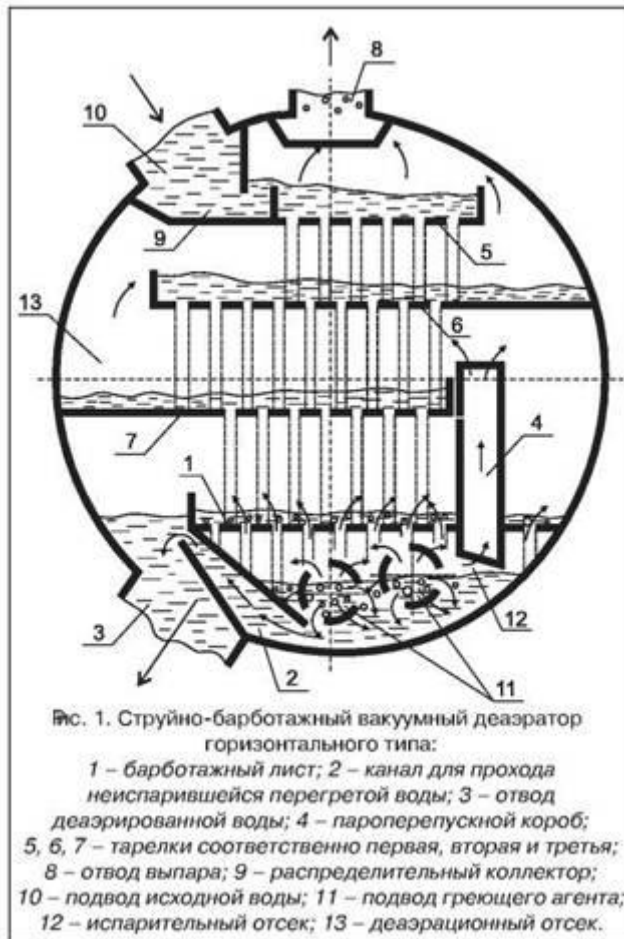
На крупных теплоисточниках - ТЭЦ и котельных большой тепловой мощности для подпитки тепловой сети обычно используют струйно-барботажные вакуумные деаэраторы горизонтального типа производительностью 400 и 800 м³/ч конструкции ЦКТИ (рис. 1).

Мне пришлось заниматься их освоением с самого начала, на нашей ТЭЦ был установлен первый серийный образец деаэратора ДВ-400. Освоение их было долгим и трудным. Однако весьма привлекали их неоспоримые преимущества, прежде всего, - возможность работы при пониженных параметрах теплоносителей, что существенно повышало энергетическую эффективность теплофикации, особенно на ТЭЦ с открытыми системами теплоснабжения. Кроме того, огромным преимуществом для ТЭЦ было использование в качестве греющего агента в деаэраторах не пара, а перегретой сетевой воды [1].

В освоении этих аппаратов приняли активное участие специалисты Союзтехэнерго-ОРГРЭС и многих электростанций. Результаты работ нашей НИЛ «Теплоэнергетические системы и установки» по освоению самых распространенных на ТЭЦ и крупных котельных вакуумных деаэраторов обобщены в работах [1-3].

Основными результатами этих работ стали:

- получение в результате промышленного экспериментального исследования многофакторных математических моделей основных типов вакуумных деаэраторов;
- разработка схем теплофикационных установок с вакуумными деаэраторами, обеспечивающих нормативное качество деаэрации и высокую энергетическую эффективность их применения на ТЭЦ;
- формулировка условий применения вакуумных деаэраторов в теплоэнергетических установках (под этими условиями понимаются температурные режимы деаэрации, выбор газоотводящих аппаратов, обеспечение вакуумной плотности установки и гравитационного режима работы сливных трубопроводов, предотвращение вторичного насыщения деаэрированной воды газами);
- разработка технологий, дополняющих противокоррозионную обработку подпиточной воды теплосети с применением вакуумной деаэрации;
- разработка принципиально новых технологий регулирования деаэрационных установок, обеспечивающих заданное качество деаэрации воды.



Многофакторные математические модели вакуумных деаэраторов

Многофакторные математические модели вакуумных деаэраторов представляют собой уравнения регрессии - зависимости показателей качества деаэрации (остаточного содержания кислорода Y_1 в мкг/дм³ и диоксида углерода Y_2 в мг/дм³) от основных управляемых режимных факторов (расхода $G_{ХОВ}$, температуры $t_{ХОВ}$, щелочности ЦХОВ исходной химически очищенной воды, а также от расхода $G_{га}$ и температуры $t_{га}$ греющего агента - перегретой воды) и их взаимодействий. Для деаэратора ДВ-800 эти уравнения имеют вид:

$$Y_1 = 32 + 12X_1 - 8X_3 + 4X_2X_3 + 9X_2X_4 + 5X_1X_2X_3 + 4X_1X_2X_4 + 2X_1X_3X_4; \quad (1)$$

$$Y_2 = 8,18 - 0,13X_1 + 0,13X_3 + 0,05X_4 + 0,22X_5 - 0,05X_1X_4 - 0,04X_2X_4 + 0,07X_3X_4 + 0,05X_1X_3X_5. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены значения режимных параметров, при которых получены уравнения (1) и (2).

теплофикационных турбоустановок

Таблица 1. Значения регулируемых факторов при определении целевых функций.

Показатель для построения уровней регрессии	Регулируемый фактор				
	$G_{ХОВ}$, т/ч	$G_{га}$, т/ч	$t_{ХОВ}$, °C	$t_{га}$, °C	$\Psi_{ХОВ}$, мг-экв/дм ³
Базовое значение, X_{i0}	600	250	48	100	0,55
Интервал варьирования, λ_i	200	150	18	25	0,30
Обозначение в нормированном виде	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5

Одна из наиболее экономичных схем теплофикационных турбоустановок приведена на рис. 2.



Особенностями этой схемы являются использование для подогрева теплоносителей перед вакуумными деаэраторами низкопотенциального пара. Подогрев исходной воды осуществляется отработавшим паром турбины во встроенном пучке конденсатора, а подогрев греющего агента - в нижнем и верхнем сетевом подогревателях, причем в теплый период года, когда температура сетевой воды в подающей магистрали должна быть ниже температуры греющего агента, сетевая вода подается в теплосеть через байпас верхнего сетевого подогревателя, который остается в работе только для подогрева греющей среды вакуумного деаэратора [4]. Эта схема, в частности, около 20 лет успешно используется в теплофикационных турбоустановках Т-250-240 Южной ТЭЦ «Ленэнерго» (ныне ОАО «ТГК-1»).

К сожалению, на многих ТЭЦ до настоящего времени используются схемы с подогревом потоков подпиточной воды паром высокопотенциальных производственных отборов турбин, что делает применение вакуумных деаэраторов на этих станциях менее экономичным, чем использование атмосферных аппаратов.

Обеспечение эффективной деаэрации

В целом многолетнее освоение струйно-барботажных деаэраторов ДВ-400 и ДВ-800 позволило обеспечить на большинстве теплоэнергетических установок с высокой культурой эксплуатации эффективную и экономичную деаэрацию подпиточной воды тепловой сети. Так, в водогрейной котельной Panevezio ПО «Литовэнерго» с котлами ПТВМ-50, КВГМ-100 и деаэраторами ДВ-400М, работающей на открытую систему теплоснабжения, в результате внедрения комплекса разработок, выполненных нами совместно с д.т.н. А.Ф. Богачевым (ВТИ), удалось реализовать режим подпитки тепловой сети, характеризующийся показателями, представленными в табл. 2.

Внедрение комплекса разработок позволило полностью исключить повреждения поверхностей нагрева котлов, возникающие из-за коррозии и накипных отложений. Обработка индикаторов коррозии, установленных в подающих и обратных сетевых трубопроводах тепловых сетей, показала, что характеристика коррозионного процесса соответствует или близка к уровню «практически отсутствует» [1, 2].

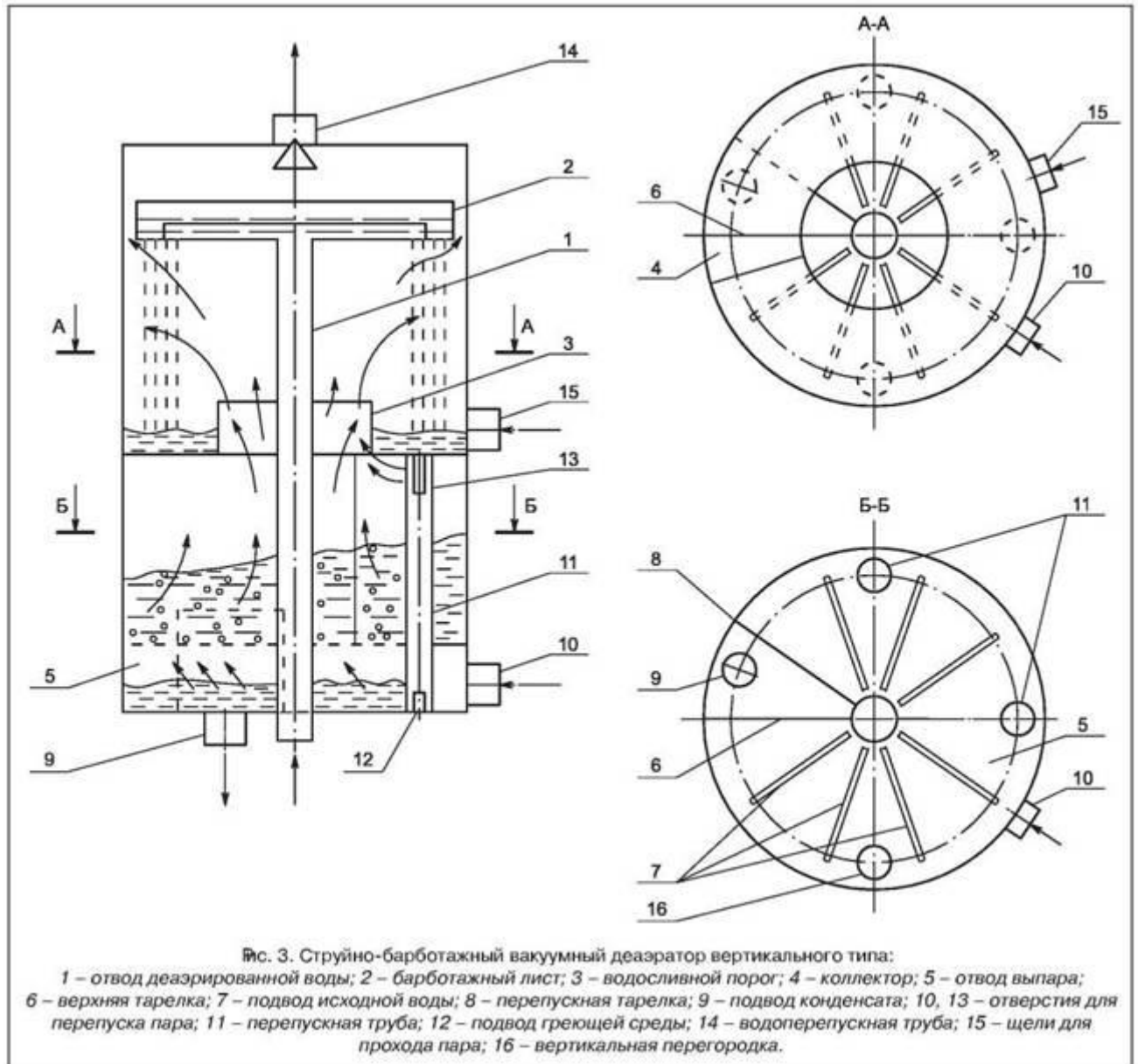
Таблица 2. Показатели режима подпитки тепловой сети на котельной Panevezio ПО «Литовэнерго».

Показатели подпиточной воды	Значения
Общая жесткость, мг-экв/дм ³	не более 0,1
Щелочность подпиточной воды, мг-экв/дм ³	0,3-0,5
Среднее содержание SiO ₂ , мг-экв/дм ³	16,7
Температура воды перед Н-фильтрами, декарбонизацией и вакуумной деаэрацией, °С	38-40
Температура греющего агента для вакуумной деаэрации, °С	100-135
Подогрев воды в деаэраторе, °С	12-20
Содержание CO ₂ в декарбонизированной воде, мг/дм ³	2-3

Среднее значение pH подпиточной воды	8,75
Содержание кислорода в подпиточной воде, мг/дм ³	5-15
Скорость внутренней коррозии сетевых трубопроводов, мм/год	0,005-0,025

На крупных котельных часто используются струйно-барботажные вакуумные деаэраторы вертикального типа производительностью от 5 до 300 м³/ч (рис. 3).

Эти деаэраторы выпускаются серийно, достаточно освоены в эксплуатации. Рекомендации по технологическим режимам их эксплуатации и схемам включения опубликованы в работах [1-3]. В котельных с достаточной квалификацией персонала, где эти рекомендации соблюдаются, обеспечивается нормативная деаэрация воды.



Отметим, что реальная возможность получить выигрыш в энергетической эффективности за счет более сложной вакуумной деаэрации существует только на ТЭЦ и этот выигрыш пропорционален расходу обрабатываемой воды.

В теплоэнергетических установках, работающих на закрытые системы теплоснабжения с малыми расходами подпиточной воды, при наличии источников пара целесообразно применять серийно выпускаемые атмосферные деаэраторы с барботажным листом, установленным в нижней части струйной деаэрационной колонки. Одним из лучших атмосферных аппаратов является деаэратор ДА-25 конструкции ЦКТИ (рис. 4).

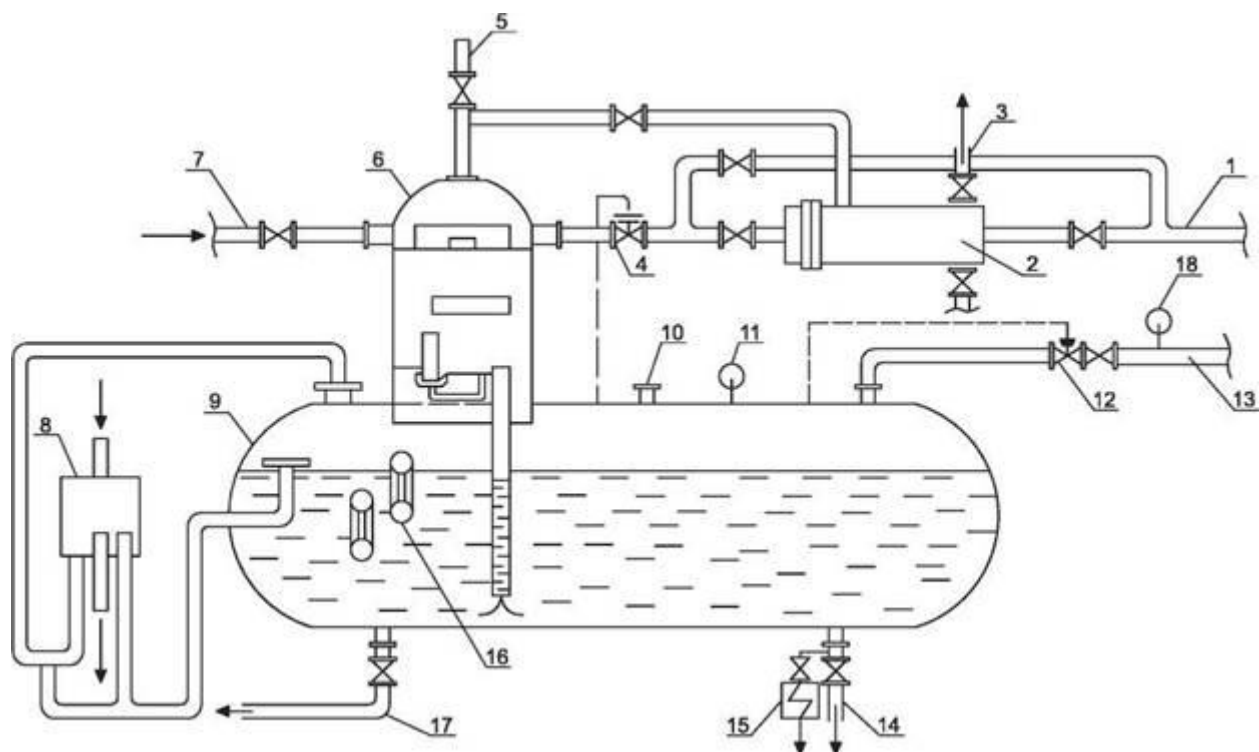


Рис. 4. Схема деаэрационной установки атмосферного давления

(применительно к деаэрации питательной воды котельной):

1 - подвод химически очищенной воды; 2 - охладитель выпара; 3, 5 - выхлоп в атмосферу; 4 - клапан регулировки уровня;

6 - деаэрационная колонка; 7 - подвод основного конденсата; 8 - предохранительные устройства; 9 - деаэрационный

бак; 10 - подвод горячих конденсатов; 11 - манометр; 12 - клапан регулировки давления; 13 - подвод греющего пара;

14 - отвод деаэрированной воды; 15 - охладитель пробы; 16 - указатель уровня; 17 - дренаж; 18 - мановакуумметр.

О возможностях таких деаэраторов говорят результаты их экспериментального исследования [5] (табл. 3).

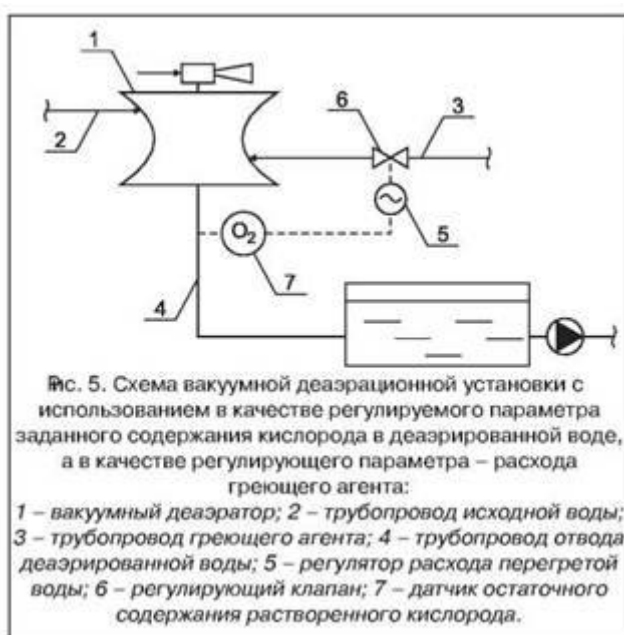
Таблица 3. Содержание растворенного кислорода в воде после атмосферного струйно-барботажного деаэраатора.

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

Из табл. 3 следует, что даже при снижении удельных расходов выпара в 10-20 раз против установленных стандартом [6] величин обеспечивается весьма глубокое удаление кислорода (ниже 10 мкг/дм³).

Важнейшими условиями для обеспечения эффективной деаэрации, помимо организации технологически необходимых температурных режимов деаэрации и схем включения деаэрааторов на ТЭЦ и котельных, являются оснащение деаэрационных установок современными приборами контроля качества деаэрированной воды, прежде всего, - кислородомерами [5], и применение современных технологий управления процессом деаэрации [2, 7].

Схема регулирования деаэраатора, в которой реализована одна из таких технологий, показана на рис. 5.



Сущность новых технологий заключается в регулировании режимных параметров по величине заданной остаточной концентрации растворенного кислорода или по величине pH деаэрированной воды. В вакуумных

деаэраторах регулирующим параметром может быть, например, расход греющего агента, а в атмосферных деаэраторах - расход пара. Главным достоинством этих технологий управления является надежное обеспечение нормативного качества деаэрации при максимально возможной энергетической эффективности реализуемых тепломассообменных процессов. Разработка серии новых технологий управления процессами термической деаэрации была отмечена медалью Российской Академии наук и золотой медалью Всемирного салона изобретений в Брюсселе.

Окончание

Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время существует достаточно эффективная и хорошо освоенная деаэрационная техника для различных условий эксплуатации теплоэнергетических установок.

«Новейшие» конструкции деаэраторов. Печальный опыт

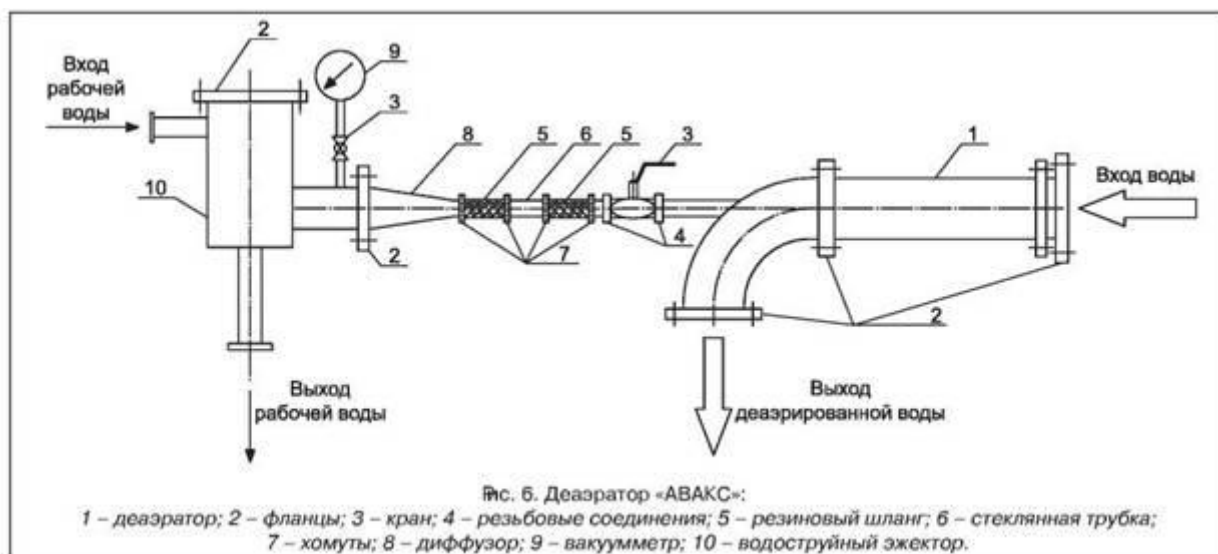
Однако на многих ТЭЦ и котельных имеются большие трудности с организацией эффективной противокоррозионной обработки воды. Иногда это связано с ограниченностью технических возможностей предприятия, чаще - с недостаточной компетентностью обслуживающего персонала. В поисках выхода руководство теплоснабжающих предприятий часто доверяется малоизвестным людям, обещающим чудесное избавление от всех технических проблем.

Одной из причин этого является пассивная позиция заводов-изготовителей серийно выпускаемых аппаратов, прежде всего, - ОАО «Саратовский завод энергетического машиностроения». Руководство этих заводов считает, что рынки сбыта продукции закреплены за ними навечно, и не уделяет должного внимания совершенствованию и техническому сопровождению своей продукции. Эксплуатационники, не имея необходимых заводских документов по эксплуатации деаэраторов, не справляются с наладкой этих аппаратов и обращаются к авторам рекламных статей, обещающих, что при покупке их «малогабаритного, недорогого и простого в эксплуатации» изделия деаэрация воды наладится сама собой.

Прежде всего, рекламируются различные распылительные деаэраторы, которые обычно для экзотики именуются вихревыми, кавитационными и т.п.: аппараты Б.А. Зимина, В.С. Галустова, «КВАРКи», «АВАКСы». Обзор этих аппаратов и их эффективности сделан в работе [8] и в предшествующей дискуссии на страницах журнала «Энергосбережение и водоподготовка» в 2006 г. Главные недостатки этих деаэраторов: необходимость существенного предварительного подогрева исходной воды и, как следствие, - дорогих подогревателей из коррозионно-стойких материалов; большие энергетические затраты на создание избыточного давления перед деаэраторами, а иногда дополнительно - на рециркуляционный подогрев исходной воды; и, самое главное, - крайне низкое качество деаэрации (последнее не относится только к деаэраторам Б.А. Зимина, потому что Б.А. Зимин лично доводит до приемлемого уровня качество деаэрации на своих аппаратах, не оценивая, правда, во что это обходится теплоэнергетическому предприятию). Намеренно не включил в перечисление пресловутые «Фисоники-Фисенко» [8], назначение которых никому, в том числе и их автору, неизвестно, к деаэраторам же они определенно не имеют отношения.

Наибольший резонанс благодаря беспрецедентной рекламной кампании и последующему полному провалу при промышленной проверке получили, по выражению О.В.Жаднова [9], «печально известные изделия под названием «АВАКС».

Автору совместно с к.т.н. М.Е.Орловым представилась возможность участвовать в монтаже «АВАКСа», провести испытания и наблюдать его эксплуатацию в котельной одного из ульяновских заводов. Остановимся несколько подробнее на результатах этой работы.



На рис. 6 представлена реальная схема «АВАКСа».

При подготовке к монтажу мы рекомендовали сотрудникам котельной установить «АВАКС» на высоте 10м над уровнем воды в баке-аккумуляторе в соответствии со здравым смыслом (для обеспечения свободного слива деаэрированной воды из-под вакуума) и с РТМ [9] - нормативным материалом, с которым разработчики данного малогабаритного деаэрата явны незнакомы.

Полагаю, что выполнение именно этой рекомендации позволило в наиболее удачных опытах получить остаточное содержание кислорода в деаэрированной воде 520 мкг/дм³ - во много раз ниже, чем у авторов, опубликовавших результаты опытной и промышленной проверки «АВАКСа» [8, 11, 12]. Подчеркну, что удаления 93% растворенного в исходной воде кислорода удалось добиться без рециркуляции деаэрированной воды, при однократном пропуске воды через «АВАКС» - думаем, что для авторов данной разработки это лучший из известных им результатов. Из работ [11, 12] следует, что при испытаниях «АВАКСа» на заводском стенде за один пропуск удавалось удалить лишь 15% от начального содержания кислорода.

С другой стороны, эти «удачные» результаты весьма далеки от нормативных - они более чем в 10 раз превышают их. Неловко уж упоминать о заявленной эффективности удаления кислорода в «АВАКСе», указанной в информационном письме включившегося в рекламную кампанию начальника Управления технического надзора Ростехнадзора В.С. Котельникова (20 мкг/дм³) [13].

Первоначально нами планировалось проведение на установке с «АВАКСом» серьезного многофакторного экспериментального исследования для получения аналитических зависимостей качества деаэрации от расхода, температуры обрабатываемой воды и других эксплуатационных факторов.

Однако при предварительных испытаниях «АВАКСа» выяснилось, что главным определяющим фактором являются не параметры процесса деаэрации, а структура водопаровоздушной смеси, отводимой из аппарата. Структуру этой смеси можно видеть в стеклянной трубке 6 (рис. 6) - это могут быть потоки паровоздушной (газовой) смеси, водопаровоздушной смеси различной конфигурации, или просто воды. При неизменном положении крана 3 структура смеси меняется в зависимости от давления, расхода и температуры деаэрируемой воды. При малейшем изменении температурного и гидравлического режима работы аппарата структуру смеси необходимо настраивать с помощью крана 3 «по наитию», как получится.

Достаточно обескураживающим моментом было установление того факта, что между положением крана 3, структурой отводимой смеси, а также перепадом разрежения в деаэраторе 1 и на входе в водоструйный эжектор 10, не существует четкой связи. Из этого следует, что в настоящее время наладка «АВАКСа» - процесс скорее знахарский, чем научно-технический (научное знание - это то, что может быть перепроверено и воспроизведено любым другим специалистом). Рядом с таким деаэратором должен постоянно сидеть оператор весьма приличной квалификации, держащий за ручку крана 3 (рис. 6). Этим, кстати, объясняется то, что «АВАКС» может работать только в режиме рециркуляции и только с постоянным расходом воды через аппарат [11, 12]. Но, как следует из статьи [9], и это не гарантирует сколько-нибудь эффективной деаэрации.

Очевидно, что при таком положении дел проводить многофакторное экспериментальное исследование «АВАКСа» просто не имело смысла.

Именно поэтому выше отмечено, что достигнутое остаточное содержание кислорода 520 мкг/дм³ получено лишь в самых удачных опытах, отчасти случайно. В обычной эксплуатации «АВАКСа» остаточное содержание кислорода в баке-аккумуляторе составляет 645-2000 мкг/дм³ - лучше, чем у других, но совершенно недостаточно для обеспечения нормативного качества подпитки теплотрассы.

Несмотря на в целом не очень оптимистичные для «АВАКСа» результаты испытаний, они дают возможность сделать выводы о причинах неудач его разработчиков.

Во-первых, это полное непонимание разработчиками требований по деаэрации воды в «гражданской» сфере - для тепловой сети, котлов и т.п.

Во-вторых, - абсолютное незнание истории развития деаэрационной техники и данных об эффективности давно выпускаемых обычных, серийно выпускаемых деаэраторов - именно поэтому эффективность «АВАКСа» в десятки раз ниже этих аппаратов.

В-третьих, - незнание нормативной документации по деаэрационной технике. В этой документации изложены отработанные в течение десятилетий на практике требования к деаэраторам, в том числе - вакуумным. Для специалистов эти требования давно стали аксиоматическими. Так, в РТМ [10] прописаны простые и понятные всякому специалисту вещи:

«П. 10.4.2. При проектировании вакуумных деаэрационных установок следует стремиться исключать из схем предвключенные подогреватели недеаэрированной воды. При наличии таких подогревателей вода в них не должна нагреваться больше, чем до 50 ОС». Для «АВАКСов» необходим подогрев воды до 60-80 ОС - это делает подогреватели недеаэрированной воды весьма уязвимым местом деаэрационной установки.

«П. 10.4.4. Для надежного слива деаэрированной воды в аккумуляторные (промежуточные) баки атмосферного давления самотеком вакуумные деаэраторы должны размещаться на отметке, превышающей уровень воды в баке не менее чем на 10 м». Рекламное обещание удовлетворительной работы вакуумного деаэратора «АВАКС» с разностью отметок между деаэратором и баком в 1 м выглядит просто абсурдным, - а ему поверили почти все покупатели этих аппаратов.

«П. 10.4.6. Вся схема вакуумной деаэрационной установки должна проектироваться таким образом, чтобы максимально исключалась возможность присосов атмосферного воздуха в систему. В связи с этим следует свести к минимуму количество запорно-регулирующей арматуры под вакуумом». Посмотрите на рис. 6 - под разрежением находится не только кран 3, но и большое количество соединений трубопроводов на фланцах и хомутах. Обеспечить постоянную герметичность вакуумной системы установки в таких условиях практически невозможно.

Еще об одном важном обстоятельстве. В статье [11] отмечается, что «прародители» «АВАКСа» используются в судовых энергоустановках, где не могут быть применены классические термические деаэраторы. Кинешемские разработчики «АВАКСа» не учли, однако, или скрыли, а, может, просто не знали, что в этих военных судовых энергоустановках на аппараты, подобные «АВАКСам», возлагается лишь первичное, грубое удаление кислорода, а окончательное его удаление производится химическим путем, например, вэлектронноионообменныхфильтрах [14]. Подобные технологии дообескислороживания воды в системах теплоснабжения мы предлагали почти два десятка лет назад [15].

Таким образом, опыт освоения «АВАКСов» доказал их абсолютную непригодность для применения в теплоисточниках систем теплоснабжения.

Выводы и рекомендации

По результатам анализа проблемы деаэрации воды для систем теплоснабжения можно сделать следующие выводы и рекомендации.

1. В настоящее время серийно выпускается достаточно широкий типоразмерный ряд термических деаэраторов, обеспечивающих нормативную эффективность деаэрации подпиточной воды теплосети и хорошо освоенных в эксплуатации.

На ТЭЦ в схемах подпитки тепловой сети рекомендуется установка струйно-барботажных вакуумных деаэраторов ДВ-400 и ДВ-800. Эти же деаэраторы рекомендуется применять в котельных установках открытых систем теплоснабжения с большим расходом подпиточной воды.

В котельных установках с небольшим расходом подпиточной воды и наличием источников пара деаэрацию подпиточной воды целесообразно осуществлять в атмосферных струйно-барботажных деаэраторах конструкции НПО ЦКТИ с барботажной ступенью, расположенной в нижней части деаэрационной колонки.

В котельных установках без источников пара рекомендуется применение вакуумных струйно-барботажных деаэраторов вертикального типа производительностью 5-100 м³/ч с водоструйными эжекторами или вакуум-насосами. При расходе подпиточной воды свыше 100 м³/ч целесообразна установка более эффективных деаэраторов ДВ-400.

Все деаэрационные установки для тепловой сети должны проектироваться с 30-50%-ым запасом по производительности.

2. Основными причинами неудовлетворительной деаэрации подпиточной воды на теплоисточниках систем теплоснабжения являются невыдерживание температурных режимов деаэрации, несовершенство схем включения деаэраторов на ТЭЦ и котельных, а в вакуумных деаэрационных установках, кроме того, - негерметичность вакуумных систем установок и недостаточная эффективность работы газоотводящих аппаратов.

3. Ведущему производителю деаэраторов -ОАО «Саратовский завод энергетического машиностроения» рекомендуется усилить работу по техническому сопровождению выпускаемых деаэраторов. К поставляемым деаэраторам необходимо прилагать разработанную с участием компетентных специалистов подробную инструкцию, в которой должны содержаться сведения о технологически необходимых температурных режимах деаэрации, схемах включения деаэраторов на различных теплоэнергетических объектах, рекомендации по эксплуатации деаэраторов и других элементов деаэрационной установки.

4. Эксплуатационным организациям рекомендуется критически оценивать рекламные предложения по «новейшим» конструкциям деаэраторов. Технологии деаэрации воды базируются на давно известных физических законах, поэтому ожидать чудес в разработке сверхэффективных деаэраторов не следует. Как правило, необходимо применять хорошо освоенные серийные аппараты и создавать технологически необходимые схемные и режимные условия их эксплуатации.

Литература

1. Шарапов В. И. Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов. М.: Энергоатомиздат. 1996. 176 с.
2. Шарапов В. И., Цюра Д. В. Термические деаэраторы. Ульяновск: УлГТУ. 2004. 560 с.
3. Справочно-информационные материалы по применению вакуумных деаэраторов для обработки подпиточной воды систем централизованного теплоснабжения. М.: СПО ОРГРЭС. 1997. 20 с.
4. Патент № 1366656 (СССР), Тепловая электрическая станция / В. И. Шарапов // Открытия. Изобретения. 1988. № 2.
5. Шарапов В. И. О применении кислородомеров при исследовании и эксплуатации теплоэнергетического оборудования // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. № 5. С. 3-7.
6. ГОСТ 16860-88*. Термические деаэраторы. М.: Изд-во стандартов. 1989.
7. Шарапов В. И., Цюра Д. В. О регулировании термических деаэраторов // Электрические станции. 2000. № 7. С. 21-24.
8. Шарапов В. И. Деаэрация воды в теплогенерирующих установках малой мощности // Новости теплоснабжения. 2007. № 5. С. 16-22.
9. Жаднов О. В. Опыт оптимальной организации водно-химического режима отопительных котельных малой и средней мощности // Новости теплоснабжения. 2007. № 5. С. 23-30.
10. Расчет и проектирование термических деаэраторов. РТМ 108.030.21-78. Л.: НПО ЦКТИ. 1979. 132 с.
11. Шатова И. А., Барочкин Е. В., Ледуховский Г. В. Выбор схемы включения прямоточных деаэрационных устройств // Материалы IV Российской научно-практической конференции «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования». Иваново: ИГЭУ. 2005. С. 63-65.
12. Шатова И. А., Барочкин Е. В., Ледуховский Г. В. Оценка влияния октадециламина на деаэрацию химочищенной воды // Материалы IV Российской научно-практической конференции «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования». Иваново: ИГЭУ. 2005. С. 66-69.
13. Деаэраторы «АВАКС» // АВОК. 2004. № 6 (статья и приложенный к журналу компакт-диск).
14. Кожевников А. В. Электроионообменники. Л.: Химия. 1972. 172 с.
15. Шарапов В. И., Озерова С. Л. Совершенствование физико-химических методов противокоррозионной обработки подпиточной воды систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 1989. № 6. С. 34-37.