

Разработка и исследование эффективности деаэратора перегретой воды

БРАВИКОВ А. М., инж.

Сибтехэнерго

В схемах подпитки теплосети все большее распространение получают вакуумные деаэраторы. Одним из достоинств вакуумных деаэраторов является то, что в них в качестве греющей среды используется деаэрированная перегретая (как правило, сетевая) вода, а пар в деаэратор не подается. Это позволяет уменьшить потери конденсата на ТЭС и вследствие этого повысить экономичность деаэрационной установки. Однако использование в деаэраторах в качестве греющей среды деаэрированной воды требует дополнительного расхода электроэнергии на подачу ее в деаэратор, а также и дополнительных насосов, подающих эту воду. В связи с изложенным предпочтительнее являются деаэрационные установки, в которых в качестве греющей среды используется недеаэрированная перегретая вода.

Такие деаэрационные установки применялись ранее [1], однако из-за неудовлетворительных дегазационных характеристик деаэраторов, применяемых в этих установках, они не получили широкого распространения.

Более перспективным по сравнению с приведенным ранее является деаэратор (рис. 1), разработанный на основе технических решений [2, 3], в котором в качестве греющей среды может использоваться деаэрированная и неде-

аэрированная перегретая вода. Опытные образцы таких деаэраторов находятся в промышленной эксплуатации на нескольких ТЭС, где в них используется в качестве греющей среды недеаэрированная перегретая вода [4].

Существенным новшеством в разработанном деаэраторе является деаэрационное устройство перегретой воды, состоящее из вертикального патрубка и расширяющихся сопл, выходящих из верхней части вертикального патрубка.

В настоящей статье приведены результаты экспериментального исследования деаэрационного устройства перегретой воды и составляющих его элементов — вертикального патрубка и расширяющегося сопла.

Исследования проводились в опытно-промышленном деаэраторе, включенном в систему Na-катионирования подпиточной воды теплосети.

Опытно-промышленный деаэратор состоит из двух деаэрационных колонок (рис. 2), соединенных между собой коробом. Колонка 2 представляет собой струйно-барботажный деаэратор, а колонка 1 — деаэратор перегретой воды. Основным элементом деаэратора перегретой воды является деаэрационное устройство, которое состоит из вертикального патрубка и кольцевого расширяющегося сопла, образованного двумя

дисками. Верхний торец патрубка заглушен, а в боковой стенке верхней части патрубка выполнены 12 отверстий прямоугольной формы. Суммарная площадь отверстий равняется $0,135 \text{ м}^2$, площадь обечайки, заключенной между дисками, $0,195 \text{ м}^2$, а площадь проходного сечения патрубка 4 м^2 .

Исследование эффективности деаэрационного устройства осуществлялось с помощью двух экспериментальных расширяющих сопел 3 и 4 и схемы экспериментального контроля (рис. 3). Сопла установлены на разных высотах на расстоянии 2200 мм одно от другого. Сопла выполнены одинаковой длины и конфузурности, а проходное сечение сопла 3 больше проходного сечения сопла 4 в 10 раз. Проходные сечения обоих сопел выполнены прямоугольной формы, а геометрические размеры входного отверстия сопла 3 равны размерам отверстия 8 (рис. 2). Сопла 3 и 4 снабжены сепараторами, предназначенными для отделения воды от пара.

Отбор воды на химический анализ из вертикального патрубка производился с помощью специальных водозаборников, в которых отобранная вода выдерживалась при постоянной температуре $0,6-1,0 \text{ мин}$. За это время из воды выделялись пузырьки газа радиусом более $0,02 \text{ мм}$, после чего вода поступала на химический анализ.

Содержание кислорода в воде до 200 мкг/дм^3 определялось колориметрическим методом, а свыше 200 мкг/дм^3 методом титрования [5]. Содержание свободной углекислоты определя-

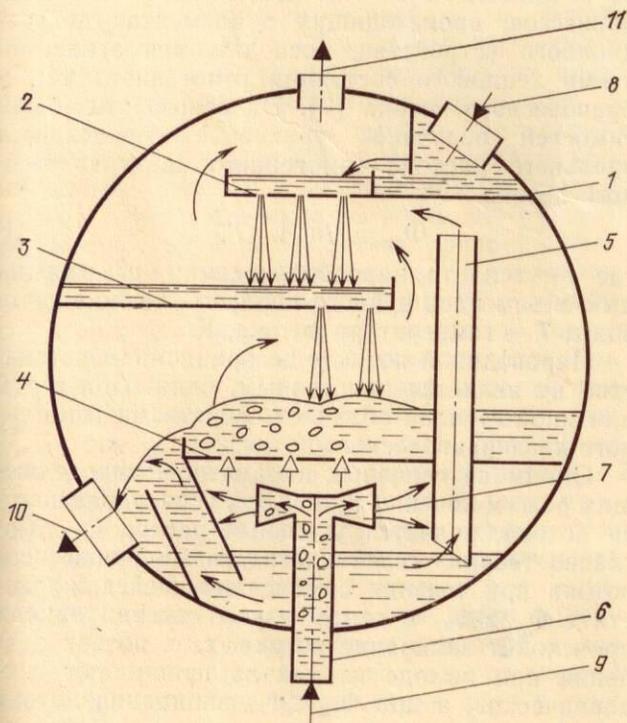


Рис. 1. Вакуумный деаэратор с деаэрационным устройством перегретой воды.

1 — корпус; 2, 3 — тарелка струйная; 4 — тарелка барботажная; 5 — пароперепускной клапан; 6 — патрубок вертикальный; 7 — расширяющееся сопло; 8 — подвод недеаэрированной «холодной» воды; 9 — подвод недеаэрированной перегретой воды; 10 — отвод деаэрированной воды; 11 — отвод неконденсирующихся газов.

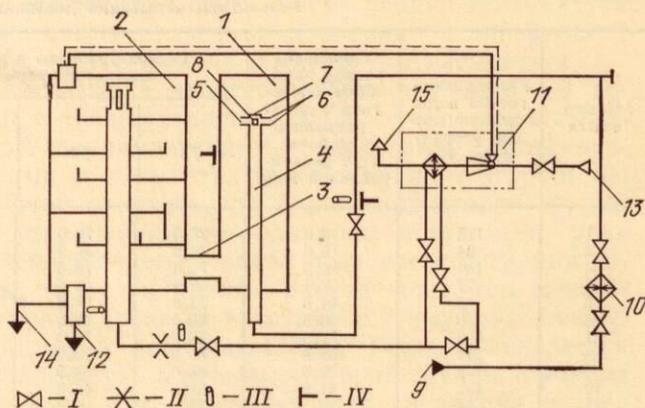


Рис. 2. Опытно-промышленный деаэратор и тепловая схема деаэратора.

1 — деаэрационная колонка перегретой воды; 2 — деаэрационная колонка «холодной» воды; 3 — короб; 4 — патрубок вертикальный; 5 — кольцевое расширяющееся сопло; 6 — диск; 7 — заглушка; 8 — отверстие; 9 — подвод исходной воды; 10 — подогреватель; 11 — эжектор паровой; 12 — отвод деаэрированной воды; 13 — подвод пара; 14 — отвор воды на химический анализ; 15 — отвод неконденсирующихся газов; 1 — задвижка; 11 — расходомерное устройство; 111 — термометр; 111 — манометр.

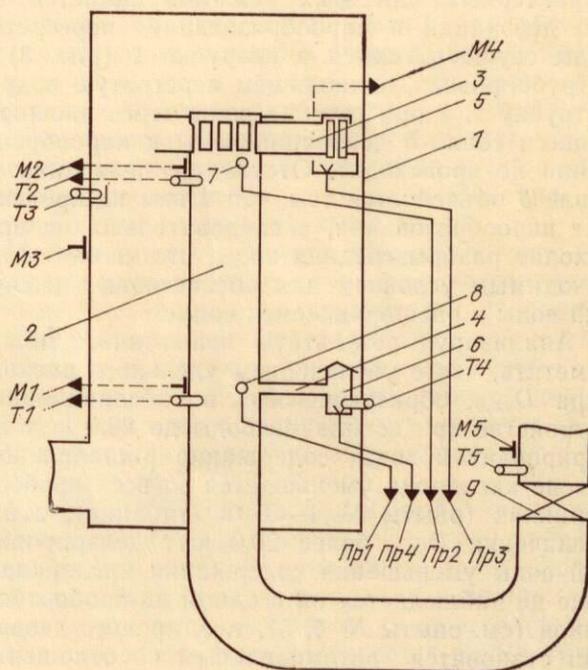


Рис. 3. Экспериментальная установка.

1 — корпус деаэрационной колонки; 2 — вертикальный патрубок; 3, 4 — сопло экспериментальное; 5, 6 — сепаратор; 7, 8 — водозаборник; 9 — задвижка. Условные обозначения: T — термометр; M — манометр; Пр — пробоотборник.

лось методом титрования щелочью до бикарбоната натрия [6].

Экспериментальное исследование эффективности деаэрационного устройства проводилось в диапазоне температур поступающей в деаэратор перегретой воды $51-83 \text{ }^\circ\text{C}$, а понижение температуры перегретой воды в деаэрационном устройстве (вследствие парообразования) составляло $5-25 \text{ }^\circ\text{C}$. Диапазон режимов определялся условиями работы ТЭЦ.

Анализ результатов испытаний показал, что все режимы работы деаэрационного устройства в зависимости от температуры и расхода перегретой воды можно разделить на две группы.

Результаты испытаний деаэрационного устройства перегретой воды

Номер опыта	Расход перегретой воды в деаэрационное устройство, т/ч	Удельный расход пара, образовавшегося в деаэрационном устройстве, кг/т деаэрированной воды	Температура воды и пароводяной смеси, измеренная термометрами, °С				Содержание кислорода в воде, отобранной пробоотборниками, мкг/дм ³			
			T1	T2	T3	T5	Пр1	Пр2	Пр3	Пр4
1	118	9,0	80,5	76,5	75,5	80,5	2400	240	240	640
2	84	15,0	79,5	73,5	73,5	82,0	760	60	60	—
3	104	20,5	74,0	70,5	70,5	82,0	50	30	20	50
4	77	32,0	67,0	64,0	64,0	82,0	70	20	20	25
5	65	44,5	58,0	52,0	51,0	83,0	50	30	20	30
6	236	33,5	80,5	71,5	62,0	80,5	2700	180	30	140
7	368	27,0	76,0	72,0	61,0	76,0	1500	260	30	175
8	244	32,8	80,5	72,0	62,5	82,5	320	80	15	30
9	199	32,8	66,0	60,5	48,0	66,0	1350	220	50	90
10	137	41,8	51,5	46,0	28,0	51,5	6000	1800	40	—
11	282	22,2	71,5	68,0	59,0	71,5	1500	240	80	240
12	320	9,0	80,0	78,0	75,0	80,0	1400	60	35	—
13	182	34,0	67,5	60,0	51,0	69,0	640	30	15	—
14	284	29,1	69,5	66,5	53,2	69,5	2000	400	20	—
15	391	19,2	70,0	68,7	59,2	70,0	2200	250	20	—
16	402	14,3	68,5	67,5	60,5	68,5	2200	400	200	—
17	172	8,0	77,3	73,8	72,8	77,3	1300	50	40	—

К первой группе относятся режимы с малыми расходами воды в деаэрационное устройство. Характерным для этих режимов является то, что деаэрация и парообразование перегретой воды осуществляются в патрубке 2 (рис. 3) и в трубопроводе, подводящем перегретую воду к патрубку 2, а при течении воды через расширяющееся сопло 3 деаэрации воды и парообразования не происходит. Отсутствие деаэрации в сопле 3 объясняется тем, что в нем не происходит парообразования, а следовательно, не происходит разбрызгивания воды, что является необходимым условием для обеспечения деаэрации воды в расширяющемся сопле.

Анализируя результаты испытаний, можно отметить, что с увеличением удельного расхода пара $D_{уд.п.}$ образовавшегося в деаэрационном устройстве при вскипании воды до 20,0 кг/т деаэрированной воды, содержание растворенного в воде кислорода уменьшается во всех пробоотборниках (опыты № 1—3 в таблице), а при увеличении $D_{уд.п.}$ более 20,0 кг/т деаэрированной воды уменьшения содержания кислорода в воде не наблюдается ни в одном из пробоотборников (см. опыты № 4, 5), т. е. процесс деаэрации становится автомодельным по отношению к $D_{уд.п.}$. В таких режимах содержание кислорода в деаэрируемой воде уменьшается лишь по мере подъема воды в патрубке 2 (рис. 3). На основании этого можем сделать вывод, что увеличение длины патрубка позволяет повысить эффективность деаэрационного устройства в режимах первой группы.

Увязывая процесс деаэрации с тепловыми и гидрогазодинамическими процессами, происходящими в деаэрационном устройстве при работе в диапазоне режимов первой группы, из результатов испытаний можно сделать вывод, что при малых $D_{уд.п.}$ парообразование и деаэрация воды происходят только в верхней части вертикального патрубка (опыт № 1). С увеличением $D_{уд.п.}$ зона парообразования углубляется, и фронт закипания смещается вниз (опыт № 2), т. е. в данном случае увеличивается поверхность взаимодействия воды с паром, а также турбулентность потока, что повышает интенсивность

выделения из воды растворенных газов. При дальнейшем увеличении $D_{уд.п.}$ зона парообразования, заняв весь вертикальный патрубок (высота патрубка 4000 мм), распространяется на вертикальный участок после задвижки (опыты № 3—5). На этом участке процесс деаэрации экспериментально не исследовался, однако на основе опытных данных можно утверждать, что при $D_{уд.п.}$ более 20,0 кг/т деаэрированной воды на этом участке процесс деаэрации также становится автомодельным.

Ко второй группе относятся режимы, в которых деаэрация и парообразование воды происходят и в патрубке 2, и в расширяющемся сопле 3 (опыты № 6—17). Для анализа тепловых процессов, происходящих в элементах деаэрационного устройства, воспользуемся зависимостями теплового состояния гомогенного квазиравновесного потока [7]. На основе этих зависимостей получено уравнение предельного удельного расхода гомогенного квазиравновесного потока

$$\Phi_{пр} = r/v'' \sqrt{cT}, \quad (1)$$

где r — теплота парообразования; v'' — удельный объем насыщенного пара; c — теплоемкость воды; T — температура потока, К.

Пароводяной поток в деаэрационном устройстве не является гомогенным, однако он в той или иной степени обладает свойствами гомогенного квазиравновесного потока.

Одним из основных параметров, определяющих режим течения в канале самоиспаряющегося потока, является удельный расход $\Phi_{уд.}$. Согласно теории гомогенного квазиравновесного потока при течении самоиспаряющейся жидкости с $\Phi_{уд.} > \Phi_{пр}$ в самом узком сечении канала происходит закипание потока, т. е. потери давления при выходе из канала превышают гидравлические, а при $\Phi_{уд.} < \Phi_{пр}$ закипания потока не происходит, и потери давления при выходе из самого узкого сечения канала равны гидравлическим. К таким режимам относятся режимы первой группы. Анализ результатов испытаний показал, что для исследуемого деаэрационного устройства диапазон режимов первой группы

может быть определен по зависимости (1) с точностью 15%.

Ко второй группе относятся режимы, в которых $\Phi_{уд} > \Phi_{пр}$. Однако следует отметить, что в самом узком сечении канала деаэрационного устройства при $\Phi_{уд} > \Phi_{пр}$ в отличие от гомогенного квазиравновесного потока происходит лишь частичное запирание, т. е. возмущения от изменяющегося противодавления, распространяющиеся навстречу потоку, при прохождении самого узкого сечения уменьшаются (затухают). На основе экспериментальных данных получена зависимость затухания возмущения

$$\Delta p_2 / \Delta p_1 \sim \Delta t_2 / \Delta t_1 = \Phi_{уд}^2 / \Phi_{пр.н} \Phi_{пр1}, \quad (2)$$

где Δp_2 — возмущение (изменение давления) на выходе из сопла, определенное по прибору $M3$; Δp_1 — изменение давления перед соплом, определенное по прибору $M2$, вызванное возмущением Δp_2 ; Δt_2 — изменение температуры насыщения на выходе из сопла, вызванное возмущением Δp_2 ; Δt_1 — изменение температуры смеси перед соплом (определенное по прибору $T2$), вызванное возмущением Δp_2 ; $\Phi_{уд}$ — удельный расход воды в самом узком сечении канала (в патрубке 2); $\Phi_{пр.н}$ — предельный удельный расход, определенный по температуре исходной воды, измеряемой термометром $T5$; $\Phi_{пр1}$ — предельный удельный расход, определенный по температуре смеси перед соплом, измеряемой термометром $T2$.

Данное уравнение решается методом последовательных приближений по $\Phi_{пр1}$.

Что касается квазиравновесности пароводяного потока, то следует отметить, что измерение температуры и давления самоиспаряющегося пароводяного потока в верхней части патрубка 2 приборами $M2$ и $T2$ показало, что в режимах первой группы средняя температура смеси равняется средней температуре насыщения, а в режимах второй группы средняя температура смеси становится меньше средней температуры насыщения, причем с увеличением удельного расхода перегретой воды разность между средней температурой насыщения и средней температурой смеси увеличивается. Так, с увеличением удельного расхода воды $\Phi_{уд}$ от $\Phi_{пр}$ до $4\Phi_{пр}$ при понижении температуры перегретой воды в деаэрационном устройстве вследствие парообразования на $9,0^\circ\text{C}$ разность между средней температурой смеси и средней температурой насыщения повышается от $0,0$ до $2,0^\circ\text{C}$, что объясняется ростом пульсации давления в патрубке 2 с увеличением расхода воды. Изменение пульсации давления определялось по пружинному вакуумметру, не предназначенному для измерения пульсации давления, в связи с чем точное значение пульсации давления не было определено. В результате пульсации давления в патрубке 2 синхронно с понижением и повышением давления происходит конденсация пара и испарение воды, а следовательно, остывание и нагрев ее. Из-за наличия неконденсирующихся газов в паре теплообмен при нагреве воды происходит менее интенсивно, чем при охлаждении, а следовательно, температурный напор между водой и паром при нагреве воды больше, чем при

охлаждении, в связи с чем средняя температура смеси при пульсации давления в патрубке 2 становится меньше температуры насыщения.

Увязывая процесс деаэрации перегретой воды в расширяющемся сопле с тепловыми и гидрогазодинамическими процессами, происходящими в элементах деаэрационного устройства, можем отметить, что в режимах второй группы с увеличением расхода воды возрастает роль расширяющегося сопла в процессе деаэрации воды, т. е. чем больше расход воды, тем меньше газов выделяется в патрубке 2 и соответственно больше в расширяющемся сопле. Объясняется это тем, что в режимах второй группы с ростом расхода воды увеличивается запирание потока в патрубке 2, т. е. уменьшается парообразование в патрубке 2 и увеличивается в расширяющемся сопле.

Полученные экспериментальные данные позволили определить, что пар, образующийся в расширяющемся сопле, обладает меньшей эффективностью, чем образующийся в патрубке 2, что видно из сравнения содержаний кислорода в воде после сопел 3 и 4. Пароводяные смеси, выходящие из этих сопел, имеют одинаковые паросодержания, однако в сопле 3 пара образуется меньше, чем в сопле 4, так как часть его, выходящая из сопла 3, образуется в патрубке 2 выше входного отверстия сопла 4. Превышение содержания кислорода в воде после сопла 4 над содержанием кислорода в воде после сопла 3 подтверждает сделанный выше вывод.

Из изложенного следует, что чем больше парообразование перед соплом, тем эффективнее работает деаэрационное устройство. Наименьшей эффективностью деаэрационное устройство обладает в режимах, в которых вода перед соплом не вскипает, а все парообразование происходит только в расширяющемся сопле. Это подтверждается результатами испытаний сопла 4 (опыты № 6, 7, 9, 11).

Для исследования эффективности деаэрационного устройства рассмотрим кинетику процесса деаэрации воды в термических деаэраторах. Из теории термической деаэрации известно, что удаление растворенных газов из воды в термических деаэраторах осуществляется двумя путями — путем дисперсного образования в объеме жидкости пузырьков газа и диффузии газов через свободную поверхность жидкости. Образование пузырьков в жидкости происходит при увеличении перенасыщенности жидкости газами, т. е. при снижении давления в жидкости или при ее нагреве.

В исследуемом деаэрационном устройстве пузырьки газа образуются в патрубке 2 до начала парообразования, а при парообразовании пузырьки газа в объеме жидкости не образуются, так как перенасыщенность жидкости газами уменьшается. Деаэрация воды при парообразовании происходит вследствие диффузии газа через свободную поверхность жидкости.

В работе [8] отмечено, что интенсивность выделения растворенного газа путем образования пузырьков зависит от температуры воды. Однако полученные экспериментальные данные показывают, что интенсивность выделения рас-

творенных газов из воды путем образования пузырьков зависит не только от температуры воды, но и от других факторов. Так, в опытах № 6 и 12 вода поступает в деаэратор с одинаковой температурой. Парообразование перед соплом 3 в опыте № 6 больше, чем в опыте № 12, а следовательно, выделение растворенных газов вследствие диффузии в опыте № 6 больше, чем в опыте № 12. Однако содержание кислорода перед соплом 3 в опыте № 12 меньше, чем в опыте № 6. Из изложенного следует, что в опыте № 12 из воды путем образования пузырьков выделилось больше кислорода, чем в опыте № 6, хотя температура воды, поступающей в деаэрационное устройство, в этих опытах одинаковая.

Для определения факторов, влияющих на интенсивность выделения кислорода из воды путем образования пузырьков, обратимся к теории зарождения кавитационных ядер в жидкости, поскольку газовые пузырьки, образующиеся в деаэрируемой воде, являются ядрами кавитации. Согласно этой теории кавитационная прочность воды зависит от многих факторов: наличия микроскопических механических примесей, их размеров и смачиваемости поверхности [9], присутствия растворенных веществ в жидкости [10], предварительной обработки воды давлением [11] и т. д. Наличие указанных факторов при испытаниях деаэрационного устройства не фиксировалось, однако на основе изложенного можно сделать вывод, что в опыте № 12 причиной более интенсивного выделения кислорода является меньшая кавитационная прочность воды, чем в опыте № 6, а следовательно, что эффективность работы деаэрационного устройства существенно зависит от кавитационной прочности воды, причем чем больше кавитационная прочность воды, тем больший удельный расход пара требуется генерировать в деаэрационном устройстве для обеспечения качественной деаэрации воды.

Испытания деаэрационного устройства проводились в два этапа с перерывом между этапами 2 года. Сначала проводились опыты № 1—11, а затем № 12—17. Анализ результатов испытаний показал, что кавитационная прочность воды в опытах первого этапа была значительно больше, чем в опытах второго этапа, а в течение каждого этапа кавитационная прочность изменялась незначительно.

Как отмечено ранее, с увеличением расхода воды в деаэрационное устройство уменьшается паросодержание и увеличивается пульсация давления в патрубке 2, при этом содержание кислорода в воде, выходящей из сопла 3, меняется мало (см. опыты № 13—15). Однако при достижении определенного расхода воды происходит значительное увеличение содержания кислорода в воде, выходящей из сопла 3 (опыт № 16). Кроме того, замечено, что в таком режиме значительно увеличивается пульсация давления в патрубке 2. Анализируя опыт № 16, можно отметить, что в данном опыте в патрубке 2 происходит парообразование, так как температура воды на входе в деаэратор, измерен-

ная термометром Т5, больше, чем перед соплом 3, однако под воздействием пульсации давления пар в патрубке 2 периодически синхронно с повышением давления полностью конденсируется, и в сопло 3 вода периодически поступает без паровой фазы. Как отмечалось ранее, при отсутствии парообразования перед соплом эффективность деаэрационного устройства ухудшается, что является одной из причин увеличения содержания кислорода в воде, выходящей из сопла 3. Кроме того, при увеличении пульсации давления увеличивается пульсация расхода воды в сопло 3, в результате чего нарушается стабильность тепловых и гидрогазодинамических процессов в этом сопле, что также является причиной ухудшения деаэрации воды в нем.

Принимая во внимание изложенное выше, по формуле (2) можно определить максимально допустимый удельный расход воды в деаэрационное устройство $\Phi_{м.д.}$, при котором не происходит полной конденсации пара в патрубке 2 и, следовательно, не происходит ухудшения деаэрации перегретой воды:

$$\Phi_{м.д.} = \sqrt{\frac{\Delta t_{2п} \Phi_{пр.н} \Phi_{пр1}}{\Delta t_{1м.д.}}}$$

где $\Delta t_{2п}$ — полное снижение температуры перегретой воды в деаэрационном устройстве (вследствие парообразования); $\Delta t_{1м.д.}$ — минимально допустимое снижение температуры перегретой воды в патрубке 2 (вследствие парообразования), при котором не происходит полной конденсации пара в патрубке 2. В исследованных режимах $\Delta t_{1м.д.}$ превышало 1,0 °С.

При этом следует отметить, что в режимах, в которых происходит полная конденсация пара в патрубках 2, зависимость (2) не соблюдается.

Что касается эффективности деаэрационного устройства по удалению свободной углекислоты, то в режимах испытаний содержание свободной углекислоты в воде, поступающей в деаэрационное устройство (в пробоотборнике Пр1), не превышало 1,0 мг/дм³, и она удалялась полностью. В начальный момент парообразования, т. е. в пробоотборнике Пр2, свободная углекислота отсутствовала во всех опытах.

Обобщая экспериментальные данные, а также используя опыт эксплуатации деаэраторов перегретой воды [4], можно сделать вывод, что разработанное деаэрационное устройство при деаэрации подпиточной воды тепловых сетей при любой кавитационной прочности воды обеспечивает содержание кислорода в деаэрационной воде не более 30 мкг/дм³ при температуре перегретой воды более 70 °С, удельном расходе пара, генерируемого в деаэраторе, более 30 кг/т деаэрированной воды и при $\Phi_{уд} \leq \Phi_{м.д.}$, что удовлетворяет нормам качества подпиточной воды тепловых сетей [12] и позволяет использовать его в вакуумных деаэраторах для деаэрации греющей воды.

Список литературы

1. Васильев И. В., Шорохов А. А. Исследование и опыт эксплуатации вакуумных деаэраторов в установках

горячего водоснабжения на ТЭЦ// Теплоэнергетика. 1967. № 2. С. 27—32.

2. А. с. 1255579 СССР. Деаэратор перегретой воды/ А. М. Бравиков// Открытия. Изобретения. 1986. № 33.

3. А. с. 1312311 СССР. Термический деаэратор/ А. М. Бравиков// Открытия. Изобретения. 1987. № 19.

4. Бравиков А. М., Федоров В. П., Романчук И. Ф. Вакуумные деаэраторы перегретой воды. Инф. листок № 292-84. Новосибирский МТЦНТИ, 1984.

5. ГОСТ 26449.3-85. Методы химического анализа соленых вод и дистиллята на содержание газов.

6. Инструкция по анализу воды и отложений в тепло-силовом хозяйстве. М.: Энергия, 1967.

7. Зысин В. А. Вскипающие адиабатные потоки. М.: Атомиздат, 1976.

8. Оликер И. И. Термическая дегазация воды с применением парового барботажа под вакуумом// Энергомашиностроение. 1963. № 8. С. 25—29.

9. Перник А. Д. Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1966.

10. Акуличев В. А. Гидратация ионов и кавитационная прочность воды// Акустический журнал. 1966. Т. 12, Вып. 2. С. 160—166.

11. Карелин В. Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. М.: Машиностроение, 1975.

12. Нормы качества подпиточной и сетевой воды тепловых сетей. М.: СПО Союзтехэнерго, 1984.

○ 13. № 8, 1988г. (о гонораре)