

УДК 621.311.22

Декарбонизация воды атмосферными деаэраторами

А.А. Коротков, ст. преп.

Представлены экспериментальные данные и результаты расчетных исследований статики и кинетики декарбонизации воды деаэрационных колонках и деаэрационных баках атмосферных деаэраторов.

Ключевые слова: термический деаэратор, струйный отсек, барботажное устройство, декарбонизация воды.

Water Decarbonization with Atmospheric Deaerator

A.A. Korotkov, Senior Teacher

The author presents the experimental data and calculated the research results of water decarbonization kinetics and statics in deaeration chambers and deaeration tanks of atmospheric deaerators.

Key words: thermal deaerator, spray section, bubbler, water decarbonization.

Струйно-барботажные деаэратеры атмосферного давления широко используются в качестве деаэратеров добавочной воды тепловых электрических станций (ТЭС), питательной воды котлов низкого и среднего давлений, подпиточной воды тепловых сетей. Эффективность работы деаэратеров по удалению из воды коррозионно активных газов оказывает существенное влияние на надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и котельных и трубопроводов тепловых сетей и определяется значениями конструктивных и режимных параметров. Число сочетаний значений этих параметров велико, поэтому на практике технологически оптимальный режим работы деаэратора устанавливается только в ходе натурных испытаний, что сопряжено с материальными и трудовыми издержками. В связи с этим актуальна разработка математических моделей, обеспечивающих расчет показателей режима работы деаэратора с требуемой точностью. Использование таких моделей не только позволяет сократить расходы на испытания действующих установок, но и повышает обоснованность проектных решений при создании новых объектов.

Опубликованные работы по термической деаэрации воды [1, 2] содержат математические модели, обеспечивающие расчет процессов теплообмена и десорбции растворенного кислорода в струйных и барботажных деаэрационных элементах. Систематизированные данные, позволяющие прогнозировать работу деаэратора по удалению из воды диоксида углерода, отсутствуют. Однако эффективность декарбонизации воды оказывает существенное влияние на скорость процессов коррозии металла, особенно при наличии в воде растворенного кислорода, а также на интенсивность накипеобразования в трубопроводах и оборудовании, если деаэрации подвергается плохо умягченная или неумягченная вода.

В условиях эксплуатации эффективность декарбонизации воды в деаэраторе оценивается по значению водородного показателя pH_{25}

деаэрированной воды, который наряду с остаточной концентрацией растворенного кислорода является нормируемым показателем. Практика наладки атмосферных деаэратеров показывает, что эффективной работы деаэратора по удалению из воды растворенного кислорода режимными мероприятиями добиться проще, чем технологически приемлемых значений pH_{25} деаэрированной воды. Это может быть обусловлено большей, по сравнению с кислородом, степенью гидратации молекулярного диоксида углерода водой и наличием химических взаимодействий диоксида углерода с примесями воды. Можно считать, что при обеспечении нормативных значений pH_{25} деаэрированной воды содержание в ней растворенного кислорода также удовлетворяет норме. Таким образом, при моделировании процессов термической деаэрации воды проблеме декарбонизации следует уделять особое внимание.

Задача работы состоит в выявлении качественного и количественного влияния конструктивных и режимных параметров деаэратора на эффективность удаления из воды диоксида углерода. Для этого проведены экспериментальные исследования, объектами которых являлись деаэратеры ДА-300м и ДСА-300, работающие на Na-катионированной воде. Разработанная система теплотехнического и химического контроля предусматривала отбор проб воды из внутренних струйных и барботажных элементов деаэраторов; метрологическое обеспечение исследований составляли преимущественно образцовые средства измерения. Полученные экспериментальные данные (69 опытов) позволили разработать критериальные уравнения, обеспечивающие расчет процессов нагрева воды и десорбции из неё растворенного кислорода в струйных отсеках деаэраторов при струйно-капельном гидродинамическом режиме их работы [3], а также идентифицировать аналогичные математические модели непровальных барботажных листов.

Остановимся на характеристиках процессов массообмена по диоксиду углерода. Анализ изменения массовой концентрации свободного диоксида углерода в воде по элементам деаэрационных колонок в условиях опытов (рис. 1) показывает, что верхние струйные отсеки работают преимущественно как абсорберы, а содержание свободного диоксида углерода в воде за деаэрационной колонкой мало отличается от его содержания в исходной воде. Имеются опубликованные результаты испытаний атмосферных деаэрационных колонок [1, 2], содержащие аналогичные данные. В качестве объяснения подобных результатов выдвинута гипотеза о наличии механического захвата диоксида углерода из паровой фазы сильно турбулизированным потоком воды, поскольку, по нашему мнению, равновесная массовая концентрация растворенного диоксида углерода в воде, как и в случае кислорода, существенно меньше фактической массовой концентрации в любой части колонки.



Рис. 1. Изменение массовой концентрации свободного диоксида углерода в воде по элементам деаэрационных колонок деаэраторов ДА-300М (а) и ДСА-300 (б) в условиях опытов (C_{CO_2} – массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде, мкг/кг): 1 и 5 – вода перед деаэратором; 2 и 6 – вода после верхнего струйного отсека; 3 и 7 – вода после нижнего струйного отсека; 4 – вода после несправильного барботажного листа деаэрационной колонки

Такое объяснение представляется неполным: если причина заключается только в наличии дисперсного поглощения диоксида углерода водой, то аналогичный эффект должен

наблюдаться и по кислороду, что не отмечается. Это может быть обусловлено лишь отличием статических условий обратимых процессов абсорбции и десорбции газов.

Статические условия характеризуются соотношением равновесного и фактического содержания газа в воде. Проведенные экспериментальные исследования деаэраторов ДСА-300 и ДА-300М позволили рассчитать равновесные массовые концентрации кислорода и диоксида углерода в воде в различных точках деаэраторов (рис. 2). При этом фактические массовые концентрации газов в паровой фазе по деаэрационным элементам определены по уравнениям материальных балансов воды, пара и газов. В качестве закона фазового равновесия использован закон Генри.

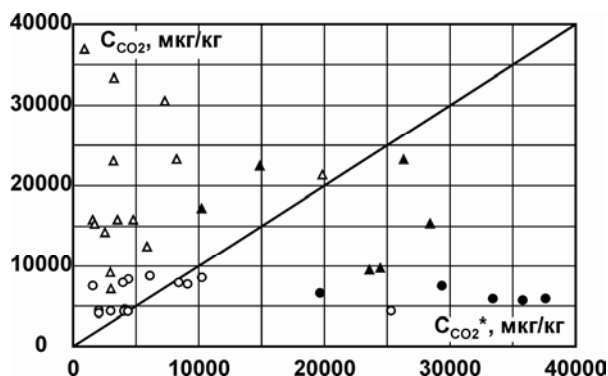
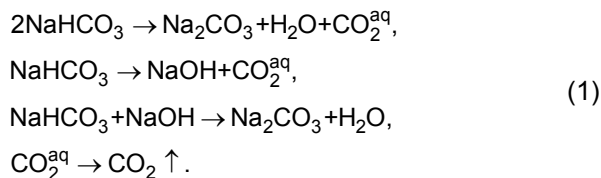


Рис. 2. Результаты анализа статических условий абсорбции-десорбции свободного диоксида углерода в верхних струйных отсеках деаэраторов ДСА-300 и ДА-300М ($C_{CO_2}^*$ – равновесная массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде, мкг/кг): сплошная линия – равновесные условия; ● – ДСА-300, верхняя часть отсека; ▲ – ДСА-300, нижняя часть отсека; ○ – ДА-300М, верхняя часть отсека; △ – ДА-300М, нижняя часть отсека

Полученные данные позволяют заключить, что равновесная массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде относительно мало отличается от его фактической массовой концентрации (для сравнения, аналогичные концентрации растворенного кислорода отличаются друг от друга в сто и более раз). Можно ожидать также, что содержащийся в паре диоксид углерода, будучи в сравнении с кислородом менее растворимым в воде газом, должен концентрироваться вблизи границы раздела фаз, что еще больше отклоняет систему от равновесия в зону абсорбции. Таким образом, можно заключить, что система «кислород – вода» в условиях работы верхних струйных отсеков деаэраторов всегда далека от равновесия и находится в зоне десорбции. Статические условия для системы «диоксид углерода – вода», напротив, близки к равновесным с возможностью перехода из зоны десорбции в зону абсорбции. При наличии относительно малой по величине разности равновесной и фактической концентраций (движущей силы процесса деаэрации) не следует ожидать интенсивного газообмена по растворенному

свободному диоксиду углерода, не говоря уже о его химически связанных формах. То есть при работе атмосферного деаэратора практически вся нагрузка по удалению свободного и, особенно, химически связанного диоксида углерода приходится на деаэраторный бак.

При деаэрации Na-катионированной воды можно предполагать следующий механизм необратимого процесса термического разложения гидрокарбонатов:



Свободный диоксид углерода, образующийся в результате процессов термического разложения гидрокарбонатов, первое время присутствует в воде в растворенной форме, а после пересыщения раствора начинается его дисперсное выделение в виде газовых пузырей.

Предполагая механизм (1), кинетическое уравнение необратимого химического процесса термического разложения гидрокарбонатов можно записать в виде

$$\frac{dC}{d\tau} = -KC^2, \quad (2)$$

где C – массовая концентрация гидрокарбонатов в воде; K – константа скорости реакции.

Эффективность удаления из воды в деаэраторе химически связанных форм диоксида углерода принято оценивать по значению степени разложения гидрокарбонатов σ , которая может быть рассчитана по значениям щелочности общей $\text{Щ}_{\text{общ}}^{\text{ДВ}}$ и по фенолфталеину $\text{Щ}_{\text{фп}}^{\text{ДВ}}$ деаэрированной воды:

$$\sigma = \frac{2\text{Щ}_{\text{фп}}^{\text{ДВ}}}{\text{Щ}_{\text{общ}}^{\text{ДВ}}}. \quad (3)$$

Значение σ для рассматриваемых деаэраторов зависит от времени пребывания воды в деаэраторном баке T , наличия в этом баке затопленного барботажного устройства и его типа. Чем больше время T , тем больше σ . При наличии затопленного барботажного устройства значение σ больше, чем при его отсутствии. Связь между указанными параметрами при этом линейная. При $T = 1$ ч можно ожидать $\sigma = 0,6$ для деаэраторов с затопленным барботажным устройством в водяном объеме деаэраторного бака и $\sigma = 0,4$ для деаэраторов без барботажа в деаэраторном баке [4].

Опубликованные данные [4] для деаэраторов с барботажом в водяном объеме деаэраторного бака подтверждаются результатами экспериментов (рис. 3). Данные по деаэраторам без барботажа отличаются от ранее

опубликованных, причем наблюдается существенный разброс экспериментальных значений σ .

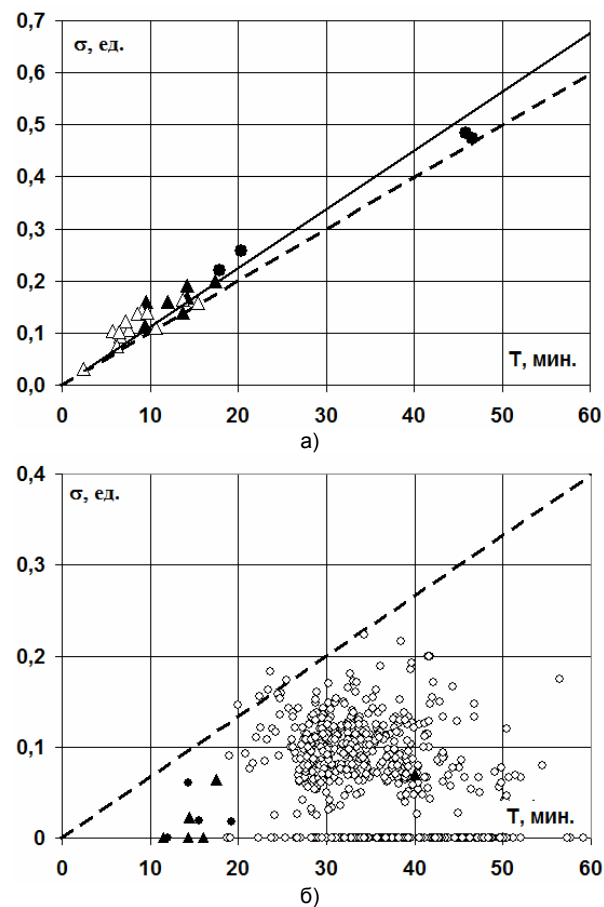


Рис. 3. Экспериментальные значения степени разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах различных конструкций в зависимости от времени пребывания воды в деаэраторе при наличии (а) и отсутствии (б) парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака: сплошная линия – аппроксимация опытных данных; пунктирные линии – опубликованные данные [4]; Δ – ДА-300м; \blacktriangle – ДСА-300 (два струйных отсека в деаэрационной колонке); \bullet – ДСА-300 (один струйный отсек в деаэрационной колонке); \circ – ДА-50

Полученные экспериментальные и расчетные данные (рис. 1–3) доказывают, что выходные по пару струйные отсеки атмосферных деаэраторов могут работать в условиях физической абсорбции свободного диоксида углерода водой, что наряду с наличием дисперсного поглощения газов потоком воды обуславливает нестабильность содержания диоксида углерода в воде за струйными отсеками, а при отсутствии нижестоящей барботажной ступени с приемлемым располагаемым временем пребывания воды в ней – и за деаэратором. Таким образом, использование барьерного парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака позволяет существенно повысить эффективность удаления свободного и, особенно, химически связанного диоксида углерода.

По полученным экспериментальным данным с помощью уравнения (2) рассчитаны значения константы K скорости процесса терми-

ческого разложения гидрокарбонатов (рис. 4). В расчетах учтено как поступление свободного и химически связанного диоксида углерода в деаэрактор, так и его отвод с выпаром и деаэрированной водой. Разброс полученных значений K может быть обусловлен не только метрологическими характеристиками методов количественного химического анализа и измерения влияющих на расходы воды и пара тепло-технических параметров, но и неточностью принятой ранее гипотезы о механизме (1) процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэракторе.

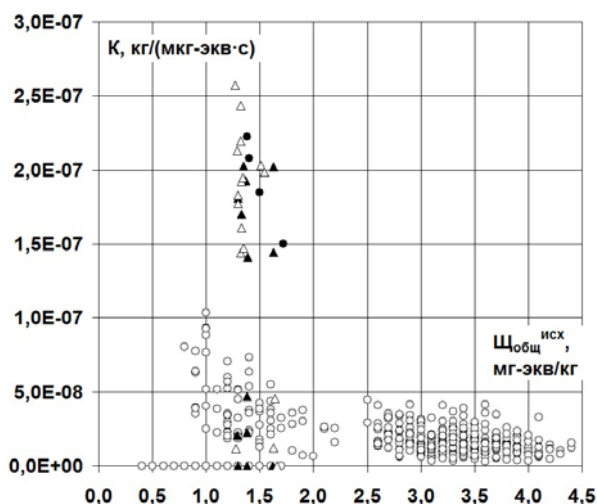


Рис. 4. Экспериментальные значения константы скорости результирующего химического процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах различных конструкций в зависимости от щелочности общей исходной воды ($\text{Щ}_{\text{общ}}^{\text{исх}}$ – щелочность общая воды перед деаэрактором, мг-экв/кг): группа точек при $K > 1,25$ кг/(мг-экв·с) – при наличии парового барботажа в водяном объеме деаэракторного бака; точки при $K < 1,25$ кг/(мг-экв·с) – при отсутствии; прочие обозначения те же, что на рис. 3

Уточнение механизма термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах является предметом дополнительного исследования, которое целесообразно вести методами химической термодинамики с организацией соответствующего лабораторного эксперимента. При этом кроме вероятных реакций взаимодействия диоксида углерода с примесями воды следует учитывать гидратацию молекулярного диоксида углерода и диссоциацию образовавшейся угольной кислоты.

Полученные кинетические характеристики процессов термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах при наличии и отсутствии парового барботажа в водяном объеме

деаэракторного бака обеспечивают возможность прогнозирования показателей эффективности удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода.

Учитывая результаты анализа статических условий абсорбции-десорбции свободного диоксида углерода в деаэрационных колонках и существенную зависимость кинетических характеристик процессов удаления химически связанного диоксида углерода в деаэракторном баке от наличия парового барботажа, особое практическое значение приобретает изучение режимных характеристик затопленных барботажных устройств деаэракторных баков. Представленные выше данные по деаэраторам с паровым барботажем в деаэракторном баке относятся к аппаратам с барботажным устройством в виде одиночного перфорированного коллектора на дне бака длиной около 8 м с расположенными в два ряда отверстиями диаметром 12 мм общим числом 185 шт.

Экспериментальные данные позволяют заключить, что минимально необходимое значение удельного расхода пара на барботаж при использовании такого устройства по условиям обескислороживания и декарбонизации воды составляет соответственно 15 и 20 кг/т; при меньших значениях удельного расхода пара на барботаж эффективность деаэрации резко снижается, а увеличение удельного расхода пара на барботаж сверх указанных значений не приводит к заметному повышению эффективности. Важно также, что при значениях удельного расхода пара на барботаж 20 кг/т и более на эффективность деаэрации воды в баке практически не оказывают влияния прочие теплогидравлические параметры работы деаэрактора, за исключением времени пребывания воды в деаэракторе.

Список литературы

1. Оликер И.И., Пермяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971. – 185 с.
2. Шарапов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы / Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003. – 560 с.
3. Экспериментальные исследования и моделирование технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды / А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский и др. // Теплоэнергетика. – 2010. – № 8. – С. 21–25.
4. Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.

Коротков Александр Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, e-mail: admin@tes.ispu.ru