

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Прогнозирование показателей эффективности декарбонизации воды термическими деаэраторами атмосферного давления без парового барботажа в деаэраторном баке

© 2015 г. Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Виноградов В.Н., Барочкин Е.В., Коротков А.А.

Ивановский государственный энергетический университет¹

e-mail: lgv83@yandex.ru

Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований декарбонизации воды в деаэраторах атмосферного давления без парового барботажа в деаэраторном баке, в ходе которых уточнены значения константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов, доказана гипотеза о смене механизма процесса при переходе к малым значениям общей щелочности деаэрируемой воды. По результатам исследований предложена методика прогнозирования показателей эффективности декарбонизации воды деаэраторами, характеризуемая максимально возможной точностью, обусловленной метрологическими характеристиками нормативных методов измерения щелочности.

Ключевые слова: деаэрация, декарбонизация, гидродинамическая задача, константа скорости реакции, математическое моделирование.

DOI: 10.1134/S0040363615070061

Термические струйно-барботажные деаэраторы атмосферного давления применяются при подготовке добавочной воды на тепловых электрических станциях и для деаэрации питательной воды котлов низкого и среднего давления и подпиточной воды тепловых сетей. Эффективность деаэраторов при удалении из воды коррозионно-активных газов оказывает влияние на надежность эксплуатации теплоэнергетического оборудования и тепловых сетей. При этом теоретические данные [1, 2] и опыт эксплуатации указывают на то, что эффективность деаэратора по удалению из воды угольной кислоты является часто определяющей: скорость кислородной коррозии металла существенно увеличивается при наличии в воде свободного диоксида углерода. Он образуется в процессах термического разложения гидрокарбонатов и гидролиза карбонатов при дальнейшем (после деаэратора) нагреве воды, например, в паровых котлах и участвует в коррозионных процессах. Поэтому наряду с эффективностью удаления из воды свободного диоксида углерода значимой является эффективность работы деаэратора по удалению химически связанных форм угольной кислоты.

Большинство опубликованных результатов исследований деаэрации воды и математических моделей, разработанных на их основе, обеспечивают расчет характеристик теплообмена и десорбции растворенного кислорода, но не позволяют с требуемой точностью прогнозировать ра-

боту деаэратора по удалению диоксида углерода. В опубликованных данных имеются противоречия, касающиеся, в частности, обеспечения моделей константами. Это существенно ограничивает возможность моделирования процессов деаэрации и не позволяет без выполнения натуральных испытаний проводить наладку режима эксплуатации и, тем более, совершенствование конструкций деаэрационного оборудования.

На практике эффективность декарбонизации воды в деаэраторах характеризуется отдельно для свободного и химически связанного диоксида углерода. В первом случае используется концентрация свободного диоксида углерода в деаэрированной воде. Эффективность удаления химически связанных форм угольной кислоты принято оценивать по степени разложения гидрокарбонатов σ , которая может быть рассчитана по значениям щелочности общей $\text{Щ}_0^{\text{д}}$ и по фенолфталеину $\text{Щ}_{\text{ф}}^{\text{д}}$ деаэрированной воды

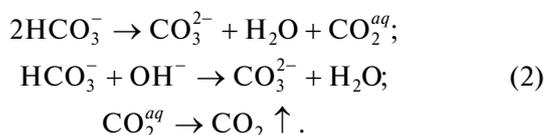
$$\sigma = 2\text{Щ}_{\text{ф}}^{\text{д}} / \text{Щ}_0^{\text{д}}. \quad (1)$$

В предшествующих исследованиях [3] выявлена низкая эффективность деаэрационных колонок, в том числе оборудованных непривальными барботажными листами, по удалению свободного диоксида углерода. Было показано, что это обусловлено близостью фактических статических условий для системы диоксид углерода–вода к термодинамически равновесным условиям с возможностью перехода из зоны десорбции в зону абсорбции в условиях работы верхних струйных от-

¹ 153003, Россия, г. Иваново, Рабфаковская ул., д. 34. ИГЭУ.

секов. Таким образом, при работе атмосферных деаэраторов основная нагрузка по удалению свободного и особенно химически связанного диоксида углерода приходится на деаэрационный бак.

Обобщение опубликованных значений σ для деаэраторов атмосферного давления ДА-50, ДА-300м и ДСА-300 без парового барботажа в деаэрационном баке показано на рис. 1. Представление σ в зависимости от времени пребывания воды в деаэраторе является традиционным [1, 2, 4, 5]. Ясно, что эти данные не могут быть напрямую использованы при прогнозировании эффективности работы деаэраторов по удалению соединений угольной кислоты, поскольку характеризуются существенным разбросом значений. Очевидно, существуют прочие факторы, влияющие на эффективность удаления из воды связанного диоксида углерода. Для их установления рассмотрим механизм необратимого процесса термического разложения гидрокарбонатов при деаэрации Натрационированной воды как наиболее часто встречающегося случая:



Для определенности будем рассматривать процесс в деаэрационном баке, полагая при этом, что вода на входе в ступень благодаря работе деаэрационной колонки представляет собой ненасыщенный диоксид углерода, образующийся в результате термического разложения гидрокарбонатов, первое время присутствует в воде в растворенной форме (индекс "aq"), а после пересыщения раствора начинается его дисперсное выделение в виде газовых пузырей. Результирующий процесс включает в себя последовательно протекающие стадии химического превращения, молекулярной диффузии и дисперсного выделения газа, причем вторая и третья стадии зависят от гидродинамической обстановки в системе. С учетом того что температура в водяном объеме деаэрационного бака в регулировочном диапазоне нагрузок деаэратора мало отличается от температуры насыщения при давлении в надводном пространстве бака, скорость первой стадии – процесса генерации молекулярного диоксида углерода – должна определяться только порядком химической реакции.

В общем случае можно предполагать протекание химического процесса по реакции первого или второго порядка. Кинетическое уравнение запишется в виде

$$\frac{dC}{d\tau} = -KC^n, \quad (3)$$

где C – массовая концентрация гидрокарбонатов в воде; K – константа скорости реакции; τ – время; n – порядок реакции, равный 1 или 2.

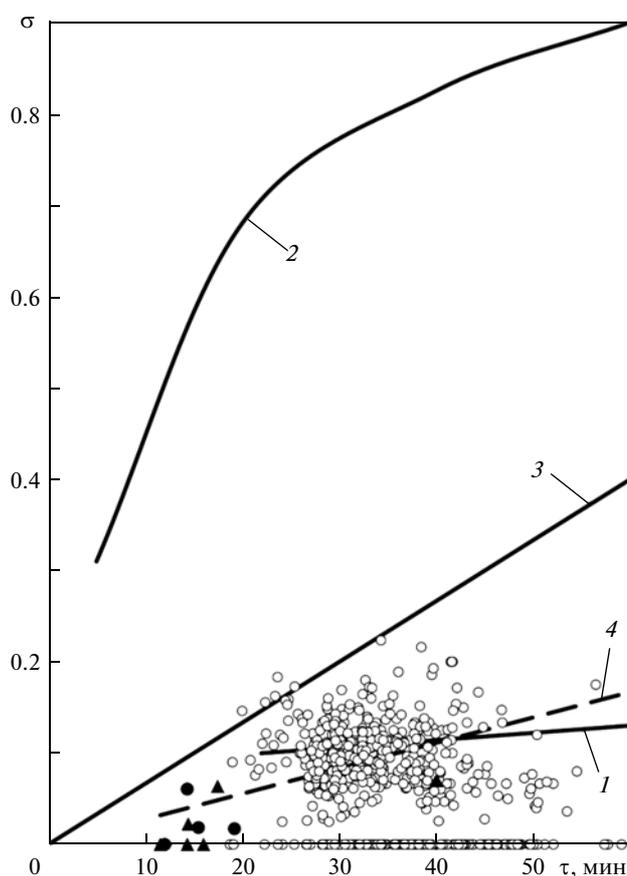


Рис. 1. Зависимость степени термического разложения гидрокарбонатов от времени пребывания воды τ в деаэраторах.

Точки – экспериментальные данные авторов [3] для деаэраторов разных моделей (● – ДА-300м; ▲ – ДСА-300; ○ – ДА-50); 1 – данные ЦКТИ [1]; 2 – данные Тильманса в изложении И.К. Гришука (лабораторные условия) [5]; 3 – данные М.С. Шкроба, Ю.М. Кострикина [4, 6]; 4 – аппроксимация опытных данных авторов [3] (метод наименьших квадратов без учета нулевых значений σ)

В соответствии с результатами исследований [7, 8] рассматриваемый процесс с наибольшей вероятностью протекает как реакция второго порядка.

Обобщение опубликованных данных и результатов дополнительных экспериментальных исследований по значениям константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления [7–9] выполнено нами ранее [3]. Для дальнейших рассуждений на рис. 2 приведем результаты анализа для деаэраторов без парового барботажа в баке.

Разброс полученных значений K может быть обусловлен метрологическими характеристиками методов количественного химического анализа и измерения теплотехнических параметров, неполнотой принятой ранее гипотезы (2) о механизме термического разложения гидрокарбонатов в де-

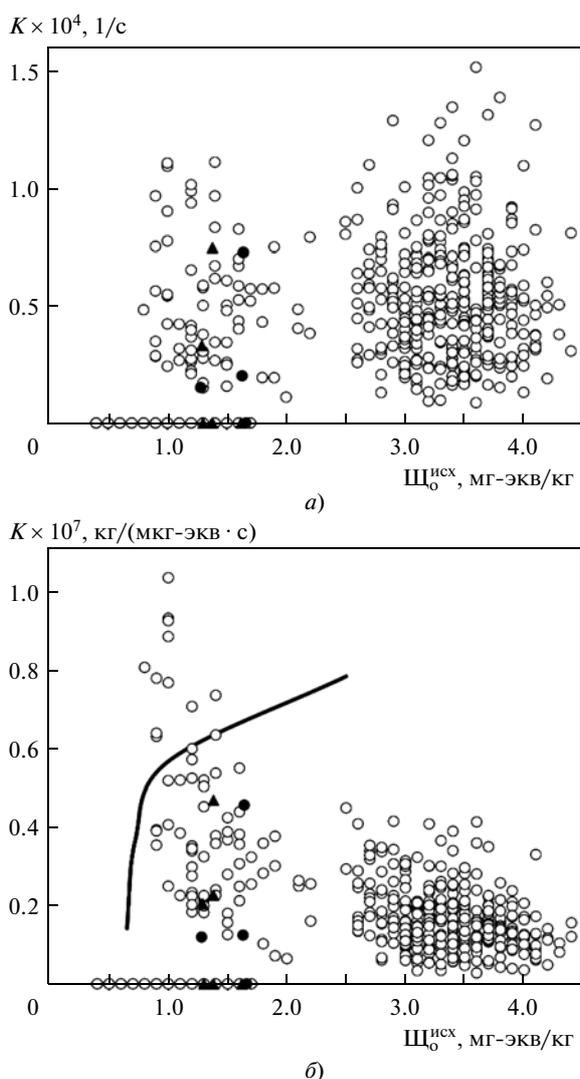


Рис. 2. Зависимость константы скорости термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах от общей щелочности исходной воды при отсутствии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака при $n = 1$ (а) и $n = 2$ (б).

Линия – данные В.А. Пермякова [7]; точки – экспериментальные данные [3] для деаэраторов разных моделей: ● – ДА-300м; ▲ – ДСА-300; ○ – ДА-50

аэраторе или влиянием изменений гидродинамической обстановки в баке. Последнее требует пояснений.

Значения константы скорости реакции K , вычисленные по экспериментальным данным, являются не кинетической характеристикой собственно химического процесса, а кинетической характеристикой процесса, протекающего в конкретных условиях работы деаэратора, т.е. значение K учитывает и гидродинамическую обстановку в системе. Это влияние выражается в том, что время пребывания в баке разных элементарных объемов воды различно, следовательно, располагаемое время реакции для них также различается.

В рассматриваемом случае требуется для расчетов после интегрирования уравнения (3) время пребывания воды в деаэраторном баке определялось как время полного вытеснения путем деления объема воды в баке на объемный расход воды через бак в условиях каждого из опытов.

Данные рис. 2 показывают, что при порядке реакции $n = 1$ разброс значений K относительно среднего заметно больше при $\text{Щ}_0^{\text{исх}} > 2.3$ мг-экв/кг. Однако при меньших значениях щелочности это утверждение неочевидно. Имеющиеся данные подтверждают гипотезу [7, 8] о термическом разложении гидрокарбонатов как реакции второго порядка при $\text{Щ}_0^{\text{исх}} > 2.3$ мг-экв/кг. При меньшей щелочности можно ожидать изменения механизма процесса. Для того чтобы сделать окончательный вывод в этом отношении, необходимо использовать статистические методы анализа гипотез.

В соответствии с изложенными выше результатами предшествующих исследований были сформулированы задачи настоящей работы:

обработка результатов экспериментальных исследований с учетом разного времени пребывания различных элементарных объемов воды в деаэраторном баке в целях уточнения значений константы скорости термического разложения гидрокарбонатов;

проведение статистического анализа значимости уточнения константного обеспечения модели;

выполнение статистической проверки гипотезы о смене механизма процесса (порядка реакции его химической стадии) при уменьшении общей щелочности деаэрируемой воды.

Для решения первой из поставленных задач использован прикладной программный комплекс (ПК) FlowVision (версия 3.08.03) [10], который предназначен для численного моделирования трехмерных ламинарных и турбулентных, стационарных и нестационарных течений жидкости и газа методом конечных объемов с использованием высокоточных разностных схем и соответствующих математических моделей, описывающих физические процессы.

Для проведения численных экспериментов по каждому из рассматриваемых деаэраторов разработана упрощенная геометрическая модель деаэраторного бака. Пример такой модели для деаэратора ДСА-300 показан на рис. 3. Поскольку на данном этапе исследований моделировалось однофазное течение несжимаемой жидкости, поверхность раздела фаз в геометрической модели деаэраторного бака учтена идеальной стенкой (условие проскальзывания).

Физическая модель задана следующими параметрами: вещество – вода, агрегатное состояние – жидкость, фаза – непрерывная, параметры движения – ньютоновская жидкость, турбулентность – стандартная k – ε -модель.

Выбор граничных условий осуществлялся в соответствии с реальными режимными параметрами работы деаэраторов при экспериментальных исследованиях [3, 9]. Граничные условия, принятые в расчетной модели деаэрационного бака, приведены в табл. 1.

Расчетная сетка ПК FlowVision – декартова, локально адаптивная. Начальная сетка задана равномерной размером 20 × 20 × 60 ячеек. С учетом функции подсеточного разрешения геометрии итоговое число ячеек составляло при расчетах для условий разных опытов от 42 134 до 60986. Сходимость расчета оценивалась по невязкам давления среды во входном сечении и скорости в выходном сечении модели.

При расчете определялось, в частности, распределение скоростей воды в деаэрационном баке. В качестве средств визуализации результатов расчета использовался слой “Линии тока”. Пример семейства линий тока для переменной “Скорость”, источником которых является входное сечение, приведен на рис. 3.

Для решения поставленной задачи по уточнению значений константы скорости реакции необходимо определить время, затрачиваемое элементарными объемами жидкости на прохождение каждой линии тока. Программный комплекс FlowVision позволяет выгружать значения переменных “Максимальное время” и “Максимальный путь” по всему слою “Линии тока” (семейство линий) и не позволяет одновременно выгружать указанные параметры по отдельной взятой линии тока. С учетом этого обстоятельства обработка результатов расчета проводилась следующим образом.

Входное сечение разбивалось на m участков. В середину каждого участка помещался объект “Сфера”, который назначался источником единственной линии тока. По слою “Линии тока”, содержащему только одну линию, выгружалось значение переменной “Максимальное время”. Таким образом, при условиях каждого опыта были получены значения времени пребывания τ_i каждого из m выделенных объемов воды в деаэрационном баке.

Принятое для дальнейших расчетов значение $m = 1000$ выбиралось по результатам специальных исследований, в ходе которых было выявлено, что при $m = 500$ результаты расчета константы скоро-

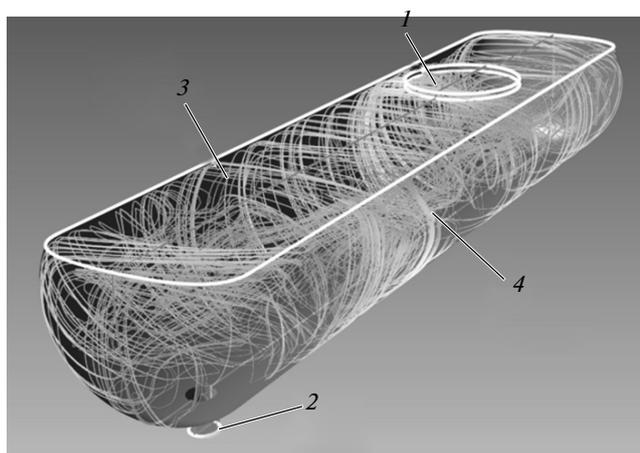


Рис. 3. Упрощенная геометрическая модель бака деаэратора ДСА-300 и пример семейства линий тока. 1 – входное сечение (граничное условие “Вход”); 2 – выходное сечение (граничное условие “Выход”); 3 – стенка, моделирующая свободную поверхность (граничное условие “Стенка 1”); 4 – стенка деаэрационного бака (граничное условие “Стенка 2”)

сти реакции отличаются более чем на 4% от результатов при $m = 1000$. В то же время увеличение числа разбиений до $m = 1500$ приводило к отклонению значения константы скорости реакции менее чем на 0.2%.

Уточненное значение константы скорости термического разложения гидрокарбонатов определялось исходя из того, что оно должно быть одинаковым для всех линий тока, поскольку температура воды в баке одинакова во всех точках. В этом случае конечная концентрация гидрокарбоната C_i , мкг-экв/кг, в i -м объеме воды составит:

$$\text{при } n = 1 \quad C_i = C_0 \exp(-K_{n=1}\tau_i), \quad (4)$$

$$\text{при } n = 2 \quad C_i = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + K_{n=2}\tau_i}, \quad (5)$$

где C_0 – начальная концентрация гидрокарбонатов в воде на входе в деаэрационный бак, мкг-экв/кг; $K_{n=1}$, $K_{n=2}$ – константы скорости реакции, имеющие единицу измерения 1/с при $n = 1$ и кг/(мкг-экв · с) при $n = 2$; τ_i – время пребывания в баке i -го объема воды, с.

Таблица 1. Принятые граничные условия

Граничное условие в соответствии с рис. 3	Тип граничного условия	Параметр	Задаваемые условия
Вход	Вход /Выход	Нормальная массовая скорость	В соответствии с результатами экспериментальных исследований
Выход	Вход /Выход	Статическое давление	То же
Стенка 1	Стенка	–	Проскальзывание
Стенка 2	Стенка	–	Прилипание

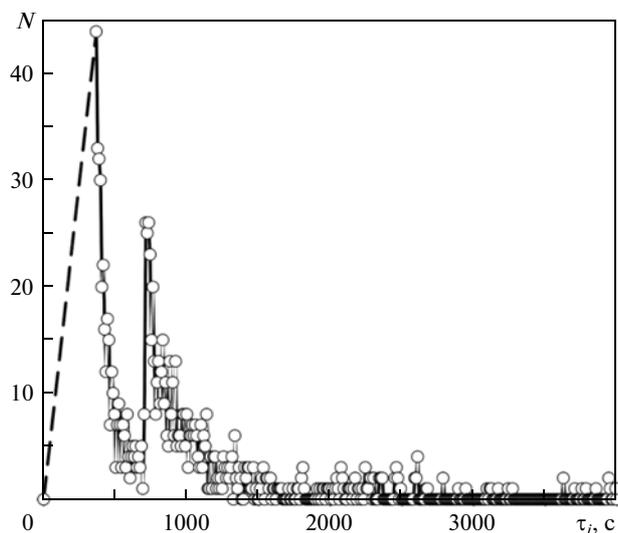


Рис. 4. Распределение числа линий тока по времени пребывания воды в баке

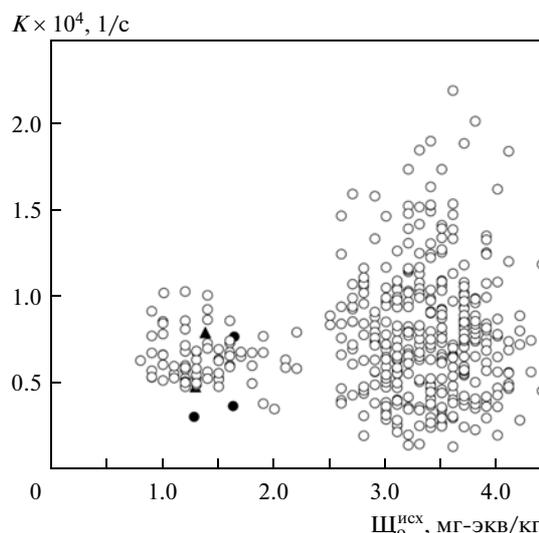
Расчетное значение концентрации гидрокарбонатов в воде в выходном сечении бака C , мкг-экв/кг, определяется по выражению

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_i, \quad (6)$$

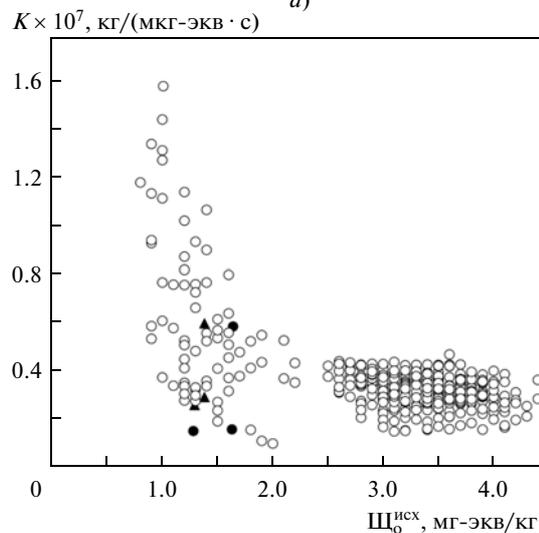
поскольку каждый i -й объем воды содержит равные количества жидкости. Суммарный расход воды через бак G , кг/с, разделен на m струек равного расхода $g = G/m$, кг/с. Уточненные значения константы скорости реакции при $n = 1$ и $n = 2$ определялись с использованием выражений (4)–(6) путем подбора по условию совпадения расчетных и экспериментальных значений C .

Для примера рассмотрим результаты расчета τ_i для одного из опытов на деаэраторе ДСА-300 при уровне воды в баке $H = 2199$ мм, $G = 64.95$ кг/с, $C_0 = 1330$ мкг-экв/кг, $C = 985$ мкг-экв/кг. На рис. 4 показано распределение числа линий тока N по времени пребывания воды в баке. При этом диапазон по времени сокращен для наглядности, максимальное время пребывания составляет 10230 с, характер распределения в диапазоне от 3500 до 10230 с аналогичен характеру распределения в диапазоне от 3000 до 3500 с.

Анализ данных, представленных на рис. 4, позволяет сделать следующий вывод. Распределение числа линий тока по времени пребывания воды в баке деформировано в сторону уменьшения. Второй (правый) максимум обусловлен образованием застойной зоны в водяном объеме деаэрационного бака со стороны деаэрационной колонки, расположенной противоположно торцу бака, из которого осуществляется слив деаэрированной воды. Соответственно время пребывания воды в баке, рассчитываемое как время полного вытеснения



а)



б)

Рис. 5. Результаты уточнения значений константы скорости результирующего процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в деаэрационном баке при $n = 1$ (а), $n = 2$ (б).

Обозначения см. рис. 2

путем деления объема воды в баке на объемный расход воды через бак, не соответствует времени, отвечающему медиане полученного распределения. Это обуславливает отклонение значений константы скорости реакции, вычисляемой двумя рассматриваемыми способами. В данном примере эти значения составили: при $n = 1$ $K = 1.53 \times 10^{-4}$ 1/с при расчете по времени вытеснения, $K = 2.33 \times 10^{-4}$ 1/с при расчете по (4)–(6), отклонение значений 52.3%; при $n = 2$ $K = 0.77 \times 10^{-7}$ кг/(мкг-экв · с) при расчете по времени вытеснения, $K = 1.23 \times 10^{-7}$ кг/(мкг-экв · с) при расчете по (4)–(6), отклонение значений 59.7%.

Таблица 2. Статистический анализ полученных результатов

Вопрос	Ответ и его обоснование	Вывод
1. Равноточны ли совокупности значений константы скорости реакции K , 1/с (реакция первого порядка), на рис. 2 и 5 при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 < 2.3$ мг-экв/кг?	Нет. Дисперсии относительно среднего для указанных совокупностей данных составляют 6.9×10^{-10} (1/с) ² по рис. 1 и 2.2×10^{-10} (1/с) ² по рис. 5. Критерий Фишера равен 3.41, что больше критического значения критерия Фишера, равного 1.47	Уточненные значения константы скорости реакции K , 1/с (реакция первого порядка), при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 < 2.3$ мг-экв/кг характеризуются большей воспроизводимостью, чем значения до уточнения. Рекомендуется использовать в расчетах $K = (0.65 \pm 0.14) \times 10^{-4}$ 1/с
2. Равноточны ли совокупности значений константы скорости реакции K , кг/(мкг-экв · с) (реакция второго порядка), на рис. 2 и 5 при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 > 2.3$ мг-экв/кг?	Нет. Дисперсии относительно среднего для указанных совокупностей данных составляют 5.9×10^{-17} кг/(мкг-экв · с) ² по рис. 1 и 4.1×10^{-10} кг/(мкг-экв · с) ² по рис. 5. Критерий Фишера равен 1.43, что больше критического значения критерия Фишера, равного 1.19	Уточненные значения константы скорости реакции K , кг/(мкг-экв · с) (реакция второго порядка), при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 > 2.3$ мг-экв/кг характеризуются большей воспроизводимостью, чем значения до уточнения. Рекомендуется использовать в расчетах $K = (0.32 \pm 0.06) \times 10^{-7}$, кг/(мкг-экв · с)
3. Равноточны ли совокупности значений констант скорости реакции K первого, 1/с, и второго, кг/(мкг-экв · с), порядков на рис. 1 (до уточнения) при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 < 2.3$ мг-экв/кг?	Да. Дисперсии в относительных единицах для указанных совокупностей данных составляют 0.276 для реакции первого порядка и 0.327 для реакции второго порядка. Критерий Фишера равен 1.18, что меньше критического значения критерия Фишера, равного 1.47	Нет оснований предполагать смену порядка реакции химической стадии процесса термического разложения гидрокарбонатов при общей щелочности деаэрируемой воды около $\text{Щ}_0 = 2.3$ мг-экв/кг
4. Равноточны ли совокупности уточненных значений констант скорости реакции K первого, 1/с, и второго, кг/(мкг-экв · с), порядков на рис. 5 при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 < 2.3$ мг-экв/кг?	Нет. Дисперсии в относительных единицах для указанных совокупностей данных составляют 0.048 для реакции первого порядка и 0.298 для реакции второго порядка. Критерий Фишера равен 6.23, что больше критического значения критерия Фишера, равного 1.47	Гипотезу о смене порядка реакции химической стадии процесса термического разложения гидрокарбонатов при общей щелочности деаэрируемой воды около $\text{Щ}_0 = 2.3$ мг-экв/кг следует считать статистически доказанной

Обобщение результатов уточнения значений константы скорости реакции по всем опытам выполнено на рис. 5. Данные В.А. Пермякова, представленные на рис. 2, в данном случае исключены, поскольку для их уточнения описанным методом недостаточно исходной информации. Исключены также нулевые значения констант скорости реакции, так как они получены при отсутствии щелочности по фенолфталеину деаэрированной воды, что вносит неопределенность в результаты.

Результаты статистического сопоставления данных [11], представленных на рис. 2 и 5, а также проверки гипотезы о наличии смены порядка реакции химической стадии процесса приведены в табл. 2. Уровень значимости для всех случаев, рассматриваемых в табл. 2, принят равным 0.05. Гипотезы о протекании процесса как реакции первого порядка при большой общей щелочности воды и как реакции второго порядка при малой

общей щелочности воды в табл. 2 не рассматриваются: очевидно, что они ошибочны.

Погрешность определения значений констант скорости реакции может быть оценена как погрешность косвенных измерений. Для расчета используются результаты измерения щелочности по фенолфталеину и дважды общей щелочности деаэрируемой воды. Нормируемая относительная погрешность определения общей щелочности составляет 3–7%, щелочности по фенолфталеину – 9–18% [12]. Примем максимальные из указанных значений 7 и 18% соответственно для щелочности общей и по фенолфталеину. Учтем также погрешности измерения расхода деаэрируемой воды (1.8%), уровня воды в деаэрирующем баке (1.6%). Тогда погрешность косвенного определения константы скорости реакции, обусловленная погрешностью методов измерения параметров в опытах, составит 23% [13].

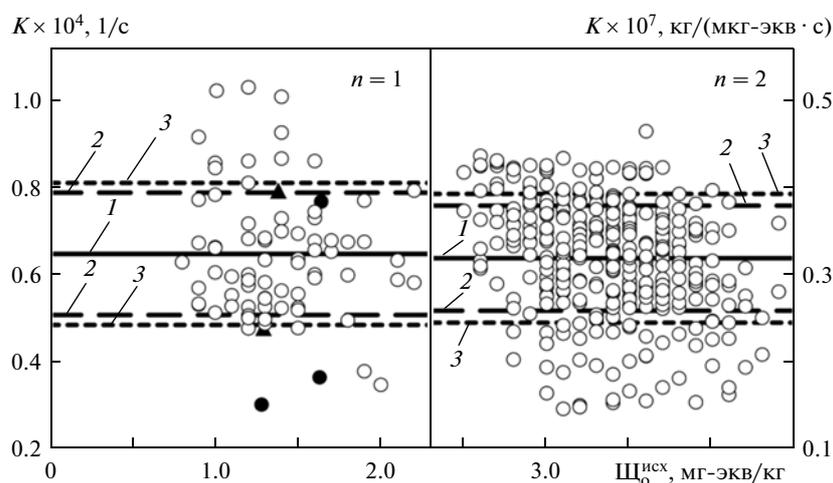


Рис. 6. Зависимость экспериментальных и рекомендуемых значений констант скорости реакции термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в деаэраторном баке от общей щелочности в исходной воде.

1 – рекомендуемые значения; границы доверительного интервала погрешности определения константы скорости реакции при доверительной вероятности 0.95: рекомендуемых значений, обусловленных метрологическими характеристиками методов измерения химических (2) и теплотехнических (3) параметров потоков теплоносителей. Остальные обозначения см. рис. 2

Согласно данным табл. 2, погрешность определения констант скорости реакции, определенная статистическими методами по имеющейся совокупности экспериментальных данных после уточнения, составила $0.14/0.65 \times 10^2 = 21.5\%$ для константы скорости реакции первого порядка и $0.06/0.32 \times 10^2 = 18.8\%$ для константы скорости реакции второго порядка. Эти значения соответствуют погрешности косвенного определения константы скорости реакции (23%). Отметим, что до уточнения предложенным методом (см. рис. 2) погрешность составляла 53 и 47% соответственно для констант скорости реакции первого и второго порядка, что существенно отличается от погрешности, обусловленной метрологическими характеристиками используемых методов измерения теплотехнических и химических параметров.

Таким образом, можно полагать, что наблюдаемые на рис. 5 разбросы значений констант скорости реакции в рекомендованных диапазонах их применения (см. табл. 2) обусловлены погрешностью методов измерения теплотехнических и химических параметров теплоносителей. Дальнейшее уточнение этих данных возможно только при использовании более точных методов измерения, главным образом, щелочности деаэрируемой воды. Поскольку при оперативном контроле используются методы измерения щелочности, соответствующие [12], такое дополнительное уточнение не имеет практического смысла.

Сводные данные по экспериментальным и рекомендуемым значениям констант скорости реакции термического разложения гидрокарбона-

тов с указанием диапазонов наиболее вероятного протекания процесса как реакции первого и второго порядков представлены на рис. 6.

Используя полученные значения констант скорости реакции, нетрудно определить значения степени термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе заданной конструкции и щелочности по фенолфталеину деаэрированной воды с помощью общего алгоритма:

$$K_{n=1,2} = f(\text{Щ}_0^{\text{исх}}); C_0 \approx \text{Щ}_0^{\text{исх}}; \tau = f(G_d; H);$$

$$C = \begin{cases} C_0 \exp(-K_{n=1}\tau), & \text{Щ}_0^{\text{исх}} < 2.3 \text{ мг-экв/кг}; \\ (1/C_0 + K_{n=2}\tau)^{-1}, & \text{Щ}_0^{\text{исх}} \geq 2.3 \text{ мг-экв/кг}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma = 1 - C/C_0; \text{Щ}_0^{\text{д}} = (G_{\text{исх}} \text{Щ}_0^{\text{исх}} + G_{\text{п}} \text{Щ}_0^{\text{п}}) / G_{\text{д}} \approx$$

$$\approx G_{\text{исх}} \text{Щ}_0^{\text{исх}} / G_{\text{д}}; \text{Щ}_{\text{фф}}^{\text{д}} = \sigma \text{Щ}_0^{\text{д}} / 2,$$

где τ – время пребывания воды в деаэраторном баке, определяемое как медиана распределения, аналогичного показанному на рис. 4 (определяется для заданных значений режимных параметров); G_d , $G_{\text{исх}}$ и $G_{\text{п}}$ – расходы деаэрированной, исходной воды и пара; $\text{Щ}_0^{\text{п}}$ – общая щелочность греющего пара деаэратора.

Результаты использования модели (7) при условиях проведенных нами опытов [3, 9], экспериментальные данные по которым приведены на рис. 1, показаны на рис. 7 (данные при нулевых экспериментальных значениях σ исключены для наглядности). Среднеквадратичное отклонение

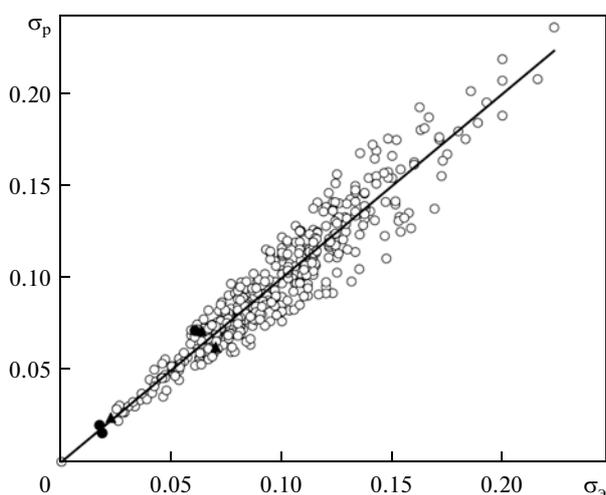


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений степени термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в баке.

Линия — совпадение расчетных и экспериментальных данных, остальные обозначения см. рис. 2

расчетных значений σ_p от экспериментальных σ_3 по рис. 7 составляет 12.9%. Для сравнения, этот показатель для линейной зависимости σ от времени пребывания воды в деаэраторе, график которой изображен линией 4 на рис. 1, составляет 48.5%.

Выводы

1. Учет различного времени пребывания в деаэраторе разных элементарных объемов воды позволил уменьшить погрешность экспериментального определения констант скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в среднем с 50.0 до 20.1%, т.е. до минимально возможного значения, обусловленного метрологическими характеристиками нормативных методов измерения щелочности воды. При таком уточнении оказалось возможным выявить и статистически доказать смену порядка реакции химической стадии рассматриваемого процесса при общей щелочности деаэрируемой воды около 2.3 мг-экв/кг.

2. По результатам исследований создана методика прогнозирования показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторах, точность

которой в 3.7 раза больше, чем точность существующих моделей.

Список литературы

1. **Оликер И.И., Пермяков В.А.** Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. Л.: Энергия, 1971.
2. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы. Ульяновск: Ульян. гос. техн. ун-т, 2003.
3. **Особенности** декарбонизации воды термически-струйно-барботажными деаэраторами атмосферного давления / Е.В. Барочкин, А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков // Теплоэнергетика. 2012. № 7. С. 40–44.
4. **Шкроб М.С., Прохоров Ф.Г.** Водоподготовка и водный режим паротурбинных электростанций. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961.
5. **Гришук И.К.** Об условиях отсутствия в питательной воде свободной углекислоты // Электрические станции. 1954. № 5. С. 25–31.
6. **Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В.** Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. **Пермяков В.А.** Исследование эффективности применения парового барботажа в термических деаэраторах электростанций: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1954.
8. **Оликер И.И., Пермяков В.А., Бранч Н.М.** Работа термического деаэратора атмосферного давления с барботажным устройством ЦКТИ // Теплоэнергетика. 1965. № 9. С. 16–22.
9. **Коротков А.А.** Повышение эффективности декарбонизации воды термическими деаэраторами атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2013.
10. **Применение** пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: учеб. пособие / Т.В. Кондратин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова, А.В. Евдокимов, А.П. Зуев. М.: МФТИ, 2005.
11. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 1: Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1986.
12. **РД 34.37.523.7-88.** Воды производственные тепловых электростанций. Метод определения щелочности. М.: Минэнерго СССР, 1988.
13. **МИ 2083-90.** Измерения косвенные. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. М.: Изд-во стандартов, 1991.