

УДК 621.311.22

Влияние парового барботажа в баке атмосферных деаэраторов на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов

Г.В. Ледуховский, С.Д. Горшенин, А.А. Коротков
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: lgv83@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Опубликованные результаты исследований эффективности декарбонизации воды термическими деаэраторами позволяют установить ориентировочные значения степени термического разложения гидрокарбонатов в различных режимах их работы. Однако эти значения не позволяют прогнозировать показатели работы деаэраторов с требуемой для практических целей точностью. Для деаэраторов с паровым барботажем в баке, в частности, экспериментальные значения кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов характеризуются существенным разбросом. В связи с этим необходимо уточнение этих характеристик для обеспечения требуемой точности математической модели.

Методы и материалы: Авторский метод обработки результатов испытаний деаэраторов основан на применении специализированного прикладного программного пакета для расчета течений жидкости. В качестве исходного материала используются результаты экспериментальных исследований процессов деаэрации воды.

Результаты: Предложен метод обработки результатов испытаний деаэраторов, позволяющий вычислять значения константы скорости реакции термического разложения гидрокарбонатов с учетом характеристик гидродинамической обстановки в деаэраторном баке. Показана возможность эффективного использования предложенного метода обработки результатов испытаний деаэраторов для аппаратов с паровым барботажем в баке. Выявлено, что степень влияния гидродинамической обстановки на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов зависит от удельного расхода пара на барботаже.

Выводы: Предложенный метод обработки результатов испытаний деаэраторов эффективно использован для аппаратов с паровым барботажем в баке. При получении новых экспериментальных данных предложенный подход позволит вычислять уточненные значения константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления с паровым барботажем в баке, что обеспечит повышение точности прогнозирования показателей эффективности удаления из воды в деаэраторах соединений угольной кислоты.

Ключевые слова: деаэрация, гидродинамическая задача, декарбонизация, константа скорости реакции, линия тока, гидрокарбонаты, щелочность воды.

Influence of steam bubbling in the tanks of atmospheric deaerators on the hydrocarbonate thermal decomposition kinetics

G.V. Leduhovsky, S.D. Gorshenin, A.A. Korotkov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: lgv83@yandex.ru

Abstract

Background: The published results of studies of water decarbonization effectiveness in thermal deaerators allow us to determine the approximate value of the hydrocarbonate thermal decomposition degree in various operation modes. However, these values cannot help us to predict the performance of a deaerator with a desired accuracy. There is a significant spread of the experimental values of the kinetic characteristics of the hydrocarbonate thermal decomposition in bubbling deaerators. Therefore, these characteristics should be specified to achieve the desired accuracy of the mathematical model.

Materials and methods: The authors' method of processing the deaerator test results is based on a specialized application software package designed for calculation of fluid flows. Water deaeration experimental studies are used as the initial material.

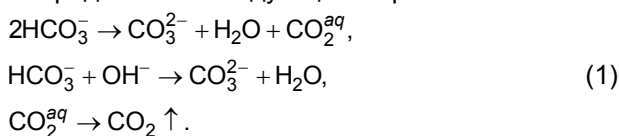
Results: We have suggested a method of deaerator test results processing enabling us to calculate the value of the reaction rate constant of the hydrocarbonate thermal decomposition taking account of the hydrodynamic conditions in the deaerating tank. The proposed method was proved to be effective in deaerator test results processing for steam bubbling apparatuses. It is shown that the degree of influence of hydrodynamic conditions on the hydrocarbonate thermal decomposition kinetics depends on the specific consumption of bubbling steam.

Conclusions: The proposed method of deaerator test results processing was effectively used for apparatuses with steam bubbling in the tank. When new experimental data is obtained, the suggested approach will allow a more accurate calculation of values of the hydrocarbonate thermal decomposition rate constant in atmospheric deaerators with steam bubbling in the tank, which will improve the accuracy of forecasting the efficiency indicators of removing carbonic acid compounds from deaerator water.

Key words: deaeration, hydrodynamic problem, decarbonization, reaction rate constant, flow line, hydrocarbonates, water alkalinity.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.3.005-012

Рассматривается необратимый процесс термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления. При деаэрации Na-катионированной воды как наиболее часто встречающегося случая механизм процесса представлен следующим образом:



Здесь индекс «aq» указывает на растворенную форму диоксида углерода.

Рассматриваемый процесс включает следующие стадии: химическое превращение, молекулярную диффузию диоксида углерода и его дисперсное выделение в виде газовых пузырей.

Эффективность удаления из воды в деаэраторе химически связанных форм диоксида углерода в процессах (1) принято оценивать по значению степени разложения гидрокарбонатов σ , которая может быть рассчитана по значению щелочности общей $\text{Щ}_{\text{общ}}$ и по фенолфталеину $\text{Щ}_{\text{ффт}}$ деаэрированной воды: $\sigma = 2 \text{Щ}_{\text{ффт}} / \text{Щ}_{\text{общ}}$ [1].

Значение σ зависит от времени пребывания воды в деаэраторном баке T , наличия в этом баке затопленного барботажного устройства и его типа. Чем больше время пребывания, тем больше σ . При наличии затопленного барботажного устройства значение σ больше, чем при его отсутствии. Связь между указанными параметрами при этом считается линейной [2]: 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 [2]. Однако опыт эксплуатации и экспериментальные данные [1, 3], особенно по деаэраторам без барботажа, отличаются от этих значений, причем наблюдается существенный разброс экспериментальных данных по σ . В связи с этим в целях повышения точности математической модели необходимо выяснить причины наблюдаемых отклонений.

В предшествующих исследованиях [3], объектами которых являлись деаэраторы без парового барботажа в деаэраторном баке, нами статистически доказана зависимость скорости второй и третьей стадий процесса (1) от гидродинамической обстановки в системе, т.е. от параметров режима течения воды в деаэраторном баке. Результирующий процесс при этом моделировался кинетическим уравнением реакции вида

$$dC / d\tau = -KC^n, \quad (2)$$

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

Первоначально выдвинутая гипотеза о влиянии гидродинамических условий в деаэраторном баке на скорость результирующего процесса доказана с применением прикладного про-

граммного комплекса FlowVision¹, предназначенного для численного моделирования течений жидкости, а также результатами проведенных нами экспериментальных исследований [4, 5]. Ниже предложен метод обработки результатов испытаний деаэраторов, позволяющий вычислять значения константы скорости реакции термического разложения гидрокарбонатов в уравнении (2) с учетом характеристик гидродинамической обстановки в деаэраторном баке:

1. С помощью средств CAD-комплексов трехмерного проектирования создается геометрическая модель бака для проведения численных экспериментов в программном комплексе FlowVision.

2. Для условий каждого опыта натурных испытаний в программном комплексе FlowVision выполняется расчет гидродинамических характеристик потока воды в деаэраторном баке (в частности, определяется распределение скоростей воды в баке). Подробная характеристика модели и условий расчета изложена в [3].

3. После получения решения входной поток воды деаэраторного бака в компьютерной модели условно разбивается на m линий тока (в ходе специальных расчетных исследований выбрано значение $m = 1000$ [3]). Для каждой из линий тока определяется время τ_i , затрачиваемое соответствующим элементарным объемом воды на прохождение деаэраторного бака.

4. Значение константы скорости K в уравнении (2) определяется исходя из того, что это значение должно быть одинаковым для всех линий тока, поскольку температура воды в баке близка к температуре насыщения. В этом случае справедливы следующие соотношения:

$$C_i^{n-1} = C_0 \exp(-K_{n=1}\tau_i); \quad (3)$$

$$C_i^{n-2} = [(C_0)^{-1} + K_{n=2}\tau_i]^{-1}; \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_i, \quad (5)$$

где C_i – концентрация гидрокарбонатов в i -м объеме воды на выходе бака, мгк-экв/дм³; индексы $n = 1$ и $n = 2$ указывают на первый или второй порядок реакции соответственно; C_0 – концентрация гидрокарбонатов в воде на входе в бак, мгк-экв/дм³; K – константа скорости реакции, 1/с ($n = 1$) или кг/(мгк-экв·с) ($n = 2$); τ_i – время пребывания в баке i -го объема воды, с; C – расчетное значение концентрации гидрокарбонатов в воде в выходном сечении бака, мгк-экв/дм³.

Значение K для условий каждого опыта определяется подбором по условию совпадения расчетного и экспериментального значений C .

Полученные таким образом уточненные значения K для условий каждого опыта, прове-

¹ Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: учеб. пособие / Т.В. Кондратин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова и др. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.

денного на деаэраторах без парового барботажа в баке, сопоставлены со значениями K , полученными из уравнений, аналогичных (3) и (4), при замене τ_i временем полного вытеснения (определяемым как отношение объема воды в баке к объемному расходу воды через бак).

Использование предложенного метода уточнения кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов позволило достичь следующих результатов [3]:

- уменьшить погрешность экспериментального определения констант скорости реакции в среднем с 50,0 до 20,1 %, т. е. до минимально возможного значения, обусловленного метрологическими характеристиками нормативных методов измерения щелочности воды;

- выявить и статистически доказать смену порядка реакции рассматриваемого процесса при общей щелочности деаэрируемой воды около 2,3 мг-экв/кг;

- создать методику прогнозирования показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторах без парового барботажа, точность которой в 3,7 раза больше, чем точность существующих моделей.

Ниже рассматриваются результаты решения аналогичной задачи для деаэраторов с паровым барботажем в баке.

Экспериментальные данные, полученные нами ранее² [4, 5] по деаэраторам с паровым барботажем в баке, позволили рассчитать значения константы скорости реакции K в уравнении (2) при использовании времени полного вытеснения вместо τ_i в выражениях (3) и (4). Результаты расчета (рис. 1), как и ранее для деаэраторов без барботажа в баке [3], характеризуются существенным разбросом значений относительно среднего. Анализ полученных данных (рис. 1) показывает, что при порядке реакции $n = 1$ разброс значений K относительно среднего составляет 22,3 %, а при $n = 2$ – 16,5 % (расчет через несмещенные оценки дисперсии относительно среднего). При имеющейся совокупности экспериментальных данных эти результаты оказываются статистически неразличимыми, т.е. нельзя однозначно считать верной одну из гипотез о протекании процесса как реакции первого или второго порядка.

В настоящее время мы не располагаем экспериментальными данными по деаэраторам с барботажем в баке в более широком диапазоне изменения общей щелочности, чем отражен на рис. 1; опубликованные данные других авторов для рассматриваемых условий нам также не известны. Поэтому установить возможную смену механизма процесса при переходе к большим или меньшим значениям щелочности, как это

сделано ранее для деаэраторов без барботажа в баке [3], не представляется возможным. Получение дополнительных экспериментальных данных при других значениях общей щелочности деаэрируемой воды является одним из направлений дальнейших исследований. В то же время, в соответствии с результатами исследований И.Е. Орлова и В.А. Пермякова³ [6], рассматриваемый процесс с наибольшей вероятностью протекает как реакция второго порядка.

Рассмотрим особенности применения предложенного ранее метода обработки результатов испытаний деаэраторов с использованием программного комплекса FlowVision для деаэраторных баков с паровым барботажем.

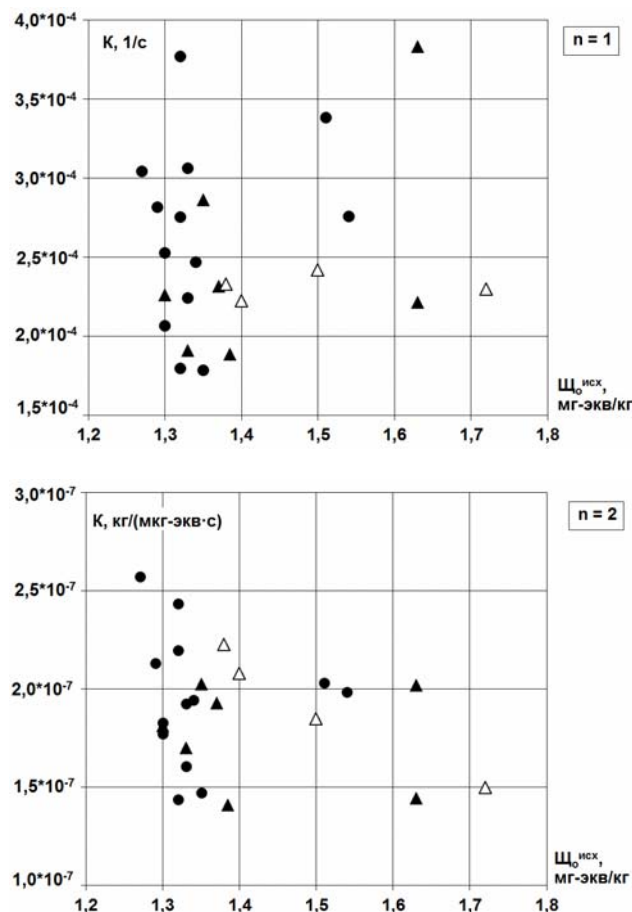


Рис. 1. Экспериментальные значения константы скорости результирующего процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах в зависимости от щелочности общей исходной воды при наличии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака: n – порядок реакции; K – константа скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов, 1/с ($n = 1$) или кг/(мкг-экв·с) ($n = 2$); $\text{Щ}_0^{\text{исх}}$ – щелочность общая воды перед деаэратором, мг-экв/кг; точки – экспериментальные данные для деаэраторов разных моделей: ● – ДА-300М; ▲ – ДСА-300 (два струйных отсека в деаэрационной колонке); △ – ДСА-300 (один струйный отсек в деаэрационной колонке)

² Коротков А.А. Повышение эффективности декарбонизации воды термическими деаэраторами атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2013. – 161 с.

³ Пермяков В.А. Исследование эффективности применения парового барботажа в термических деаэраторах электростанций: дис. ... канд. техн. наук : 0305. – М., 1954. – 209 с.

Моделирование течения воды в деаэрационном баке (баки и барботажные устройства всех деаэраторов, по которым имеются экспериментальные данные, идентичны) при наличии парового барботажа проводилось с использованием упрощенной геометрической модели, разработанной на предыдущем этапе исследований [3]. Для моделирования барботажа на дне бака предусмотрена щель, длина которой соответствует длине затопленного барботажного коллектора прототипа, а ширина определена исходя из условия равенства площади её проходного сечения по пару суммарной площади проходного сечения отверстий реального барботажного коллектора (рис. 2).

Необходимость упрощенного представления барботажного коллектора в виде щели обусловлена существенным уменьшением общего

количества ячеек расчетной сетки, требуемых для разрешения геометрической модели, что позволило в итоге увеличить скорость решения задачи. При этом даже с учетом принятых упрощений введение барботажа потребовало на порядок увеличить количество ячеек расчетной сетки для разрешения больших градиентов скоростей в окрестности щели: общее число расчетных ячеек в условиях опытов с барботажом составляло около 500 000 (против 50 000 для опытов без барботажа [3]).

В качестве типа граничного условия для барботажной щели выбран «Вход / Выход», имеющий параметр «Нормальная массовая скорость». Прочие граничные условия приняты аналогичными модели деаэрационного бака без парового барботажа [3].

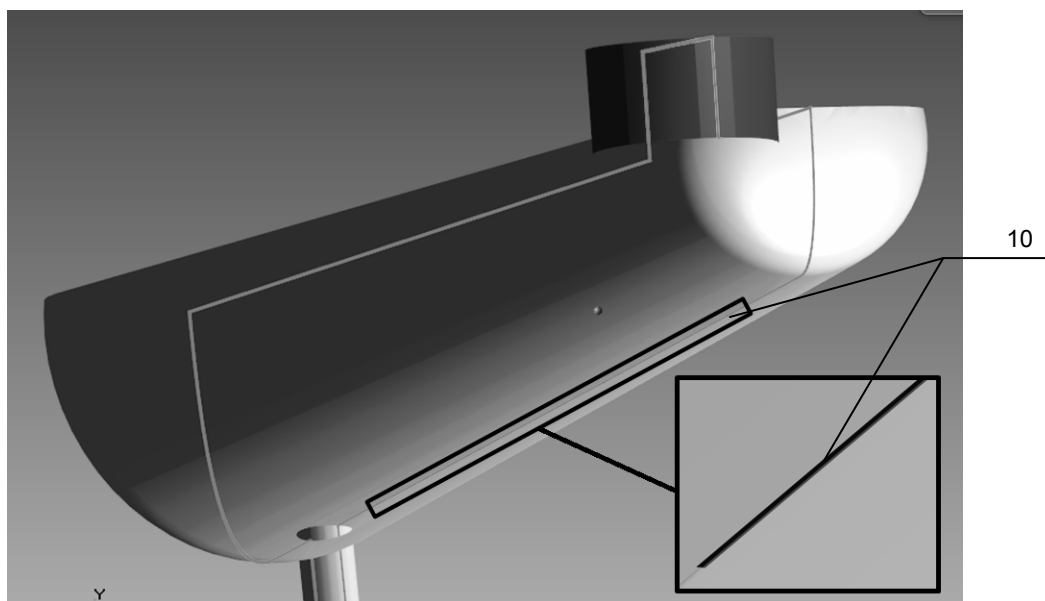
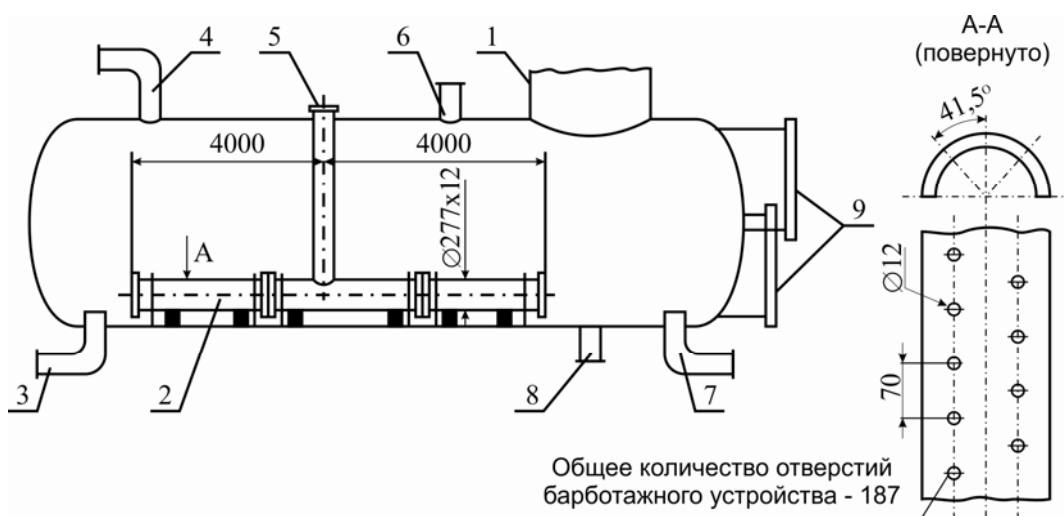


Рис. 2. Конструктивная схема (вверху) и геометрическая модель (внизу) деаэрационного бака с барботажным коллектором: 1 – деаэрационная колонка; 2 – перфорированный барботажный коллектор; 3 – трубопровод отвода деаэрированной воды; 4 и 5 – трубопроводы ввода основного и барботажного пара соответственно; 6 и 7 – трубопроводы подключения деаэратора к паровой и водяной уравнительным линиям; 8 – трубопровод дренажный; 9 – уровнемерные стекла; 10 – щель, моделирующая барботажный коллектор

В ходе предварительных расчетов установлено, что число Маха на выходе из барботажной щели при эксплуатационных значениях удельного расхода пара на барботаж не превышает 0,3, что позволяет при моделировании представить барботажный пар как несжимаемую жидкость. Учитывая, что температура в водяном объеме деаэрационного бака в регулировочном диапазоне нагрузок деаэраатора мало отличается от температуры насыщения при давлении в надводном пространстве бака, конденсацией пара можно пренебречь и использовать однофазную модель перемешивания двух несжимаемых жидкостей.

Физическая модель задана следующими параметрами:

- вещества: вода (агрегатное состояние – жидкость); пар (агрегатное состояние – жидкость);

- фаза непрерывная;

- физические процессы: движение – ньютоновская жидкость, турбулентность – стандартная $k-\varepsilon$ модель, массоперенос.

Сходимость расчета оценивалась по величинам невязок давления среды во входном сечении бака и барботажной щели и скорости в выходном сечении модели.

Методика обработки результатов численных экспериментов аналогична методике, используемой на предшествующем этапе исследований. Выполнялись операции по пунктам 3 и 4 приведенной выше последовательности.

Расчеты по различным опытам показали, что отклонение уточненных значений константы скорости реакции K от значений до уточнения (рис. 1) существенно зависит от удельного расхода пара на барботаж d_6 и варьируется от 20–30 % при малых значениях d_6 до 3–5 % при больших значениях d_6 . В ходе анализа причин появления такой связи выявлено, что она обусловлена влиянием d_6 на интенсивность перемешивания воды в деаэрационном баке. Для примера на рис. 3 приведены результаты расчета τ_i по каждой из m линий тока для одной и той же гидравлической нагрузки деаэраатора типа ДСА-300 (180 т/ч по деаэрированной воде) при значениях $d_6 = 0$ и $d_6 = 25$ кг/т д.в. (килограмм пара на тонну деаэрированной воды). В обоих случаях уровень воды в баке принят $H = 1800$ мм. Точки на рис. 3 соответствуют числу линий тока N , имеющих время пребывания воды в баке в пределах отклонений на величину шага $\Delta\tau$ от абсциссы точки. Значение $\Delta\tau$ определялось как разница между максимальным и минимальным значениями τ_i , деленная на $(m - 1)$.

Анализ полученных данных (рис. 3) доказывает существенное влияние удельного расхода пара на барботаж на вид распределения числа линий тока по времени пребывания воды в баке. При отсутствии барботажа это распределение деформировано в сторону уменьшения времени пребывания. Включение в работу бар-

ботажного устройства приводит к тому, что рассматриваемое распределение визуально становится более симметричным.

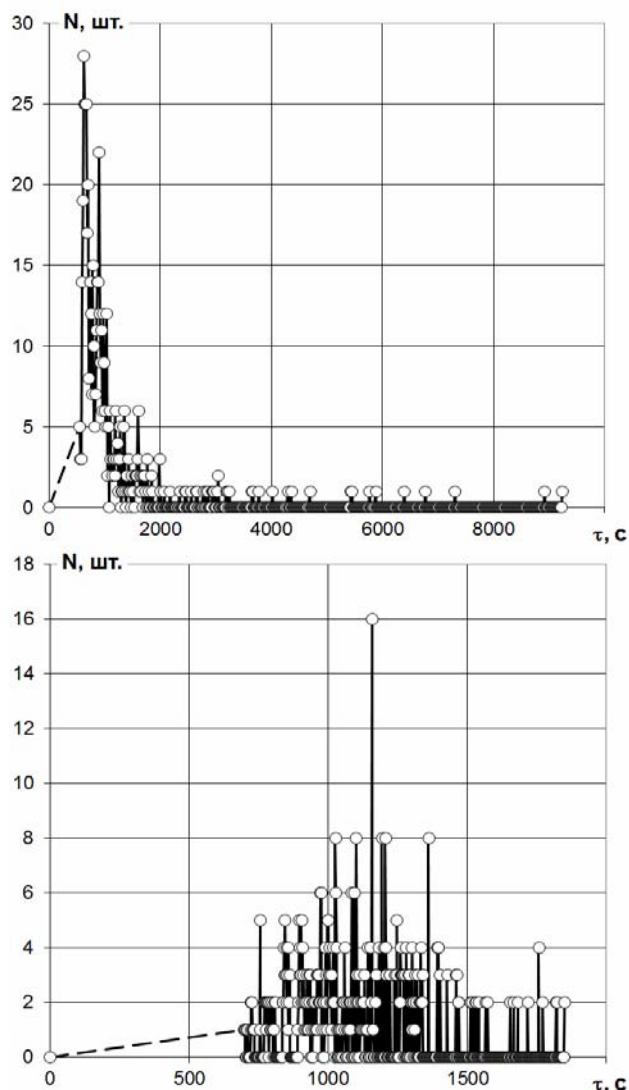


Рис. 3. Распределение числа линий тока N , шт., по времени пребывания воды в баке τ , с, при удельном расходе пара на барботаж: $d_6 = 0$ (вверху) и $d_6 = 25$ кг/т д.в. (внизу)

Для количественной оценки выявленного эффекта проведены специальные численные исследования. В ходе них в дополнение к двум расчетным опытам, результаты которых приведены на рис. 3, выполнено еще три опыта при значениях $d_6 = 3$; 7,5 и 15 кг/т д.в. при тех же условиях. Поскольку ранее [3] выявлено, что разница между значениями константы скорости реакции K , вычисленной по времени вытеснения воды из бака и по рассматриваемой авторской методике, обусловлена асимметрией распределения числа линий тока по времени пребывания воды в баке, возникла необходимость расчета параметров распределения, характеризующих эту асимметрию. В качестве таковых целесообразно использовать коэффициент асимметрии, а также значения математического ожидания и

медианы статистического распределения в сопоставлении между собой.

Для того чтобы использовать инструменты теории вероятности и математической статистики, необходимо предварительно по полученным результатам численных экспериментов рассчитать статистические функции плотности распределения случайной величины – времени пребывания в деаэрационном баке для отдельных элементарных объемов воды. При построении статистических функций плотности распределения основной проблемой является выбор количества интервалов. В рамках настоящей работы при количестве опытных значений $m = 1000$ определены рекомендуемые значения количества интервалов z по разным источникам: $z = 11$ по формуле Стёрджеса [7]; $z = 15$ по формуле Брукса и Каррузера [7]; $z = 32$ по рекомендациям [8]; $z = 17$ по рекомендациям ВНИИМ им. Д.И. Менделеева [9]. Для дальнейших расчетов принято значение $z = 19$ (разбивка равномерная). Полученные при этом статистические функции плотности распределения приведены на рис. 4.

В таблице приведены сводные данные по параметрам полученных распределений [7]. Анализ результатов показывает, что при увеличении удельного расхода пара на барботаж распределение приближается к симметричному, в результате уменьшается отклонение медианы распределения от математического ожидания, что и обуславливает уменьшение разницы между уточненными и не уточненными значениями константы скорости реакции K . При этом следует отметить, что при значениях $d_6 = 15$ кг/т д.в. распределение близко к симметричному, а увеличение d_6 до 25 кг/т д.в. не приводит к существенному изменению параметров распределения.

Параметры статистических функций плотности распределения времени пребывания элементарных объемов воды в баке при различных значениях удельного расхода пара на барботаж

Параметр	Значение для распределения при удельном расходе пара на барботаж, кг/т д.в.				
	0	3	7,5	15	25
Медиана Me , с	858	1007	1034	1054	1082
Математическое ожидание Mo , с	1105	1105	1105	1105	1105
Отклонение Me от Mo , %	22,4	8,9	6,5	4,7	2,1
Коэффициент асимметрии, ед.	1,37	1,14	0,88	-0,04	-0,12

Полученные результаты косвенно подтверждают выводы, сделанные нами ранее по результатам анализа экспериментальных данных⁴: при

⁴ Ледуховский Г.В. Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2008. – 226 с.; Коротков А.А. Повышение эффективности декарбонизации воды термическими деаэраторами атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2013. – 161 с.

указанных значениях удельного расхода пара на барботаж (для рассматриваемой конструкции барботажного устройства) обеспечивается наилучшее перемешивание воды в деаэрационном баке и складываются условия для максимального развития площади поверхности контакта фаз и уменьшения диффузионного сопротивления процессам газообмена. Такие выводы были сделаны как в отношении растворенного кислорода, так и в отношении диоксида углерода.

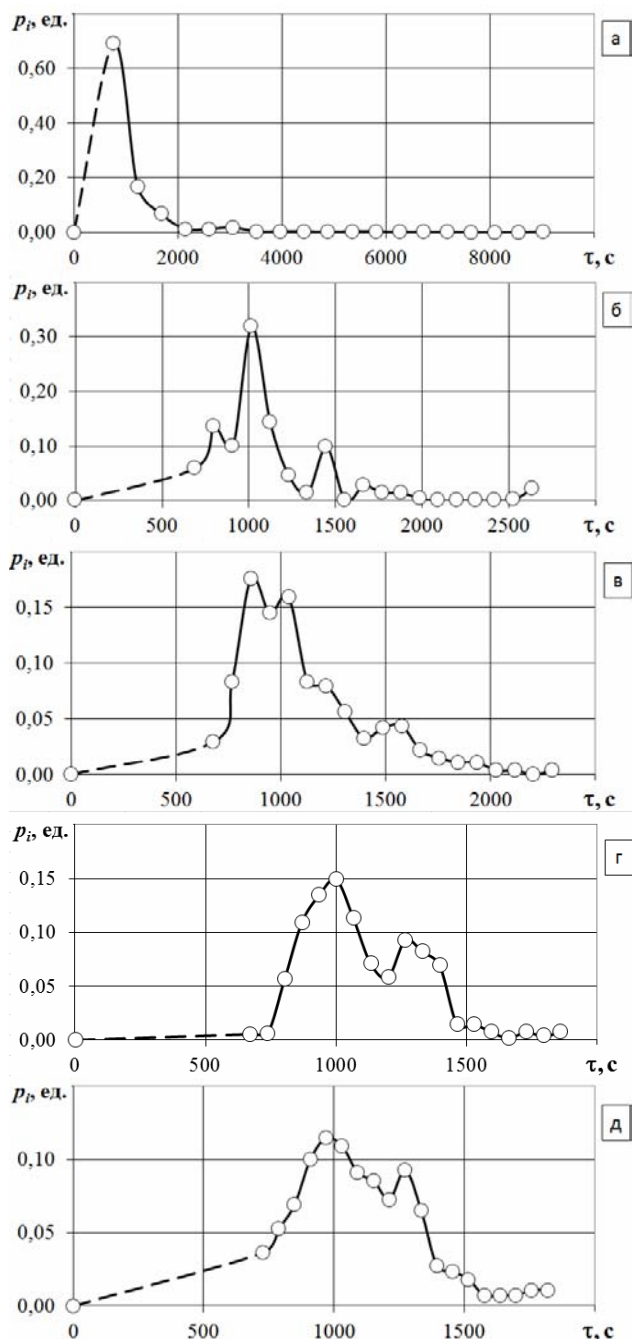


Рис. 4. Статистические функции плотности распределения времени пребывания элементарных объемов воды в деаэрационном баке при значениях удельного расхода пара на барботаж, кг/т д.в.: а – $d_6 = 0$; б – $d_6 = 3$; в – $d_6 = 7,5$; г – $d_6 = 15$; д – $d_6 = 25$

Таким образом, проведенные расчетные исследования позволили установить, что уточнение экспериментальных значений константы скорости реакции K по рассматриваемой авторской методике имеет смысл при значениях удельного расхода пара на барботаж менее 15 кг/т д.в. С учетом этого выполнена повторная обработка экспериментальных данных, приведенных на рис. 1; данные для опытов при значениях удельного расхода пара на барботаж 15 кг/т д.в. и более оставлены без изменений (фактически уточнение выполнено лишь для восьми опытов по деаэратору ДА-300м). Результаты расчетов приведены на рис. 5.

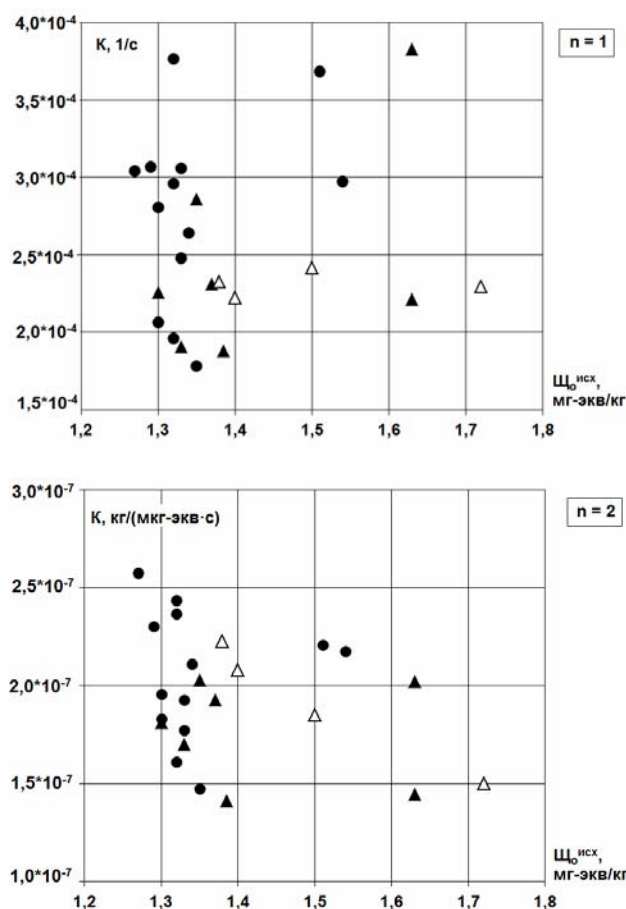


Рис. 5. Результаты уточнения значений константы скорости результирующего процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах с паровым барботажом в деаэраторном баке: обозначения те же, что на рис. 1

Для уточненных данных при порядке реакции $n = 1$ разброс значений K относительно среднего составляет 22,7 %, а при $n = 2$ – 16,6 %. Эти данные статистически не отличимы от результатов, приведенных на рис. 1, т. е. до уточнения. Отметим, что указанные величины отклонений вполне соответствуют погрешности косвенного определения константы скорости реакции, полученной в результате измерения параметров теплоносителей, которая оценена нами ранее [3] и составляет около 20 %. Иными словами, можно полагать, что наблюдаемые раз-

бросы значений констант скорости реакции (рис. 1, 5) обусловлены метрологическими характеристиками методов и средств измерения.

Таким образом, предложенный ранее метод обработки результатов испытаний деаэраторов без парового барботажа с применением специализированного прикладного программного пакета для расчета течений жидкости распространяется на деаэраторы с барботажом в баке. В результате выяснено, что степень влияния гидродинамической обстановки в деаэраторе на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов зависит от удельного расхода пара на барботаж. Для деаэраторов с барботажным устройством в виде горизонтального перфорированного коллектора определен диапазон значений удельного расхода пара на барботаж (от 0 до 15 кг/т д.в.), в котором из-за особенностей гидродинамических характеристик потока воды в баке целесообразно использовать предложенный метод обработки результатов испытаний. При значениях удельного расхода пара на барботаж, превышающих 15 кг/т д.в., константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов, рассчитываемые как для реактора идеального вытеснения, оказываются статистически не отличимы от уточненных значений, полученных с учетом реальных параметров течения воды по предложенной методике.

При получении дополнительных экспериментальных данных предложенная методика позволяет уточнить значения константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления с паровым барботажом в баке, что обеспечит повышение точности прогнозирования показателей эффективности удаления из воды в деаэраторах соединений угольной кислоты.

Список литературы

1. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы / Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003. – 560 с.
2. **Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В.** Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.
3. **Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Коротков А.А.** Уточнение механизма процесса и константного обеспечения модели термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в баке // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 3. – С. 9–15.
4. **Особенности** декарбонизации воды термическими струйно-барботажными деаэраторами атмосферного давления / Е.В. Барочкин, А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов и др. // Теплоэнергетика. – 2012. – № 7. – С. 40–44.
5. **Коротков А.А.** Декарбонизация воды атмосферными деаэраторами // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 8–11.
6. **Оликер И.И., Пермяков В.А., Бранч Н.М.** Работа термического деаэратора атмосферного давления с барботажным устройством ЦКТИ // Теплоэнергетика. – 1965. – № 9. – С. 16–22.
7. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 1: пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
8. **Heinhold I., Gaede K.W.** Ingenieur statistic. – München; Wien, Springer Verlag, 1964. – 352 p.
9. **Бурдун Г.Д., Марков Б.Н.** Основы метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 120 с.

References

1. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ul'yanovsk, 2003. 560 p.
2. Kostrikin, Yu.M., Meshcherskiy, N.A., Korovina, O.V. *Vodopodgotovka i vodnyy rezhim energoob'ektov nizkogo i srednego davleniya* [Water treatment and water regime of low and medium pressure power units]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 254 p.
3. Ledukhovskiy, G.V., Gorshenin, S.D., Korotkov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 3, pp. 9–15.
4. Barochkin, E.V., Moshkarin, A.V., Vinogradov, V.N., Ledukhovskiy, G.V., Korotkov, A.A. *Teploenergetika*, 2012, no. 7, pp. 40–44.
5. Korotkov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 8–11.
6. Oliker, I.I., Permyakov, V.A., Branch, N.M. *Teploenergetika*, 1965, no. 9, pp. 16–22.
7. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regressionnyy anaiz: v 2 kn., kn. 1* [Applied Regression Analysis: in 2 books, book 1]. Moscow, Finansy i statistika, 1986. 366 p.
8. Heinholt, I., Gaede, K.W. *Ingenieur statistic*. München; Wien, Springer Verlag, 1964. 352 p.
9. Burdun, G.D., Markov, B.N. *Osnovy metrologii* [Fundamentals of metrology], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1985. 120 p.

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Горшенин Сергей Дмитриевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
соискатель, ассистент кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Коротков Александр Александрович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru