

УДК 621.311.22

Уточнение механизма процесса и константного обеспечения модели термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в баке

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: Опубликованные экспериментальные данные с наибольшей вероятностью указывают на протекание процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления как реакции второго порядка. Фиксируемый при этом существенный разброс значений константы скорости реакции уменьшает точность прогнозирования показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторе и предположительно обусловлен влиянием гидродинамической обстановки в деаэраторном баке при различных режимах работы установки на скорость диффузионной стадии процесса.

Методы и материалы: Для уточнения механизма процесса и константного обеспечения модели термического разложения гидрокарбонатов использована процедура обработки результатов испытаний деаэраторов с применением специализированного прикладного программного пакета, позволяющая вычислять значения константы скорости реакции с учетом характеристик гидродинамической обстановки в деаэраторном баке. Значимость полученных результатов доказывается статистическими методами.

Результаты: Предложен новый способ обработки результатов испытаний деаэраторов с использованием специализированного прикладного программного пакета, позволяющий учитывать различное время пребывания разных элементарных объемов воды в баке при расчете значений константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов.

Выводы: Предложенный подход позволяет уточнить значения константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления без парового барботажа в деаэраторном баке, что дает основания выдвинуть и статистически доказать гипотезу о смене механизма процесса при переходе к малым значениям общей щелочности деаэрируемой воды.

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

Clarification of the process mechanism and the constant support of the thermal decomposition model of hydrocarbons in atmospheric deaerators without steam bubbling in the tank

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 experimental data indicate with a high probability that the process of thermal decomposition of hydrocarbons in atmospheric pressure deaerators is a second-order reaction. The experimentally registered significant spread of reaction rate constant values decreases the accuracy of predicting performance indicators of water decarbonization in deaerators and is presumably caused by the influence of the hydrodynamic conditions in the deaerating tank in various operation modes on the rate of the process diffusion stage.

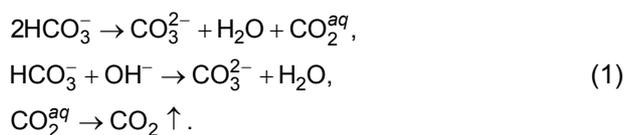
Materials and methods: To clarify the process mechanism and get constant support of the model of thermal decomposition of hydrocarbons, we used a procedure of test results processing based on a specialized application software package that allowed us to calculate the values of the reaction rate constant taking into account the hydrodynamic conditions in the deaerating tank. The importance of the results is proved by statistical methods.

Results: The authors propose a new method of processing deaerator test results using a specialized application software package that allows you to take into account, how long different elementary volumes of water remain in the tank, when calculating the rate constant values of thermal decomposition of hydrocarbons.

Conclusions: The proposed approach has made it possible to specify the rate constant value of thermal decomposition of hydrocarbons in atmospheric pressure deaerators without steam bubbling in the deaerating tank, which made it reasonable to advance and statistically prove the hypothesis of changing process mechanism during the transition to small values of total alkalinity of deaerated water.

Key words: deaeration, hydrodynamic problem, decarbonization, reaction rate constant.

Механизм необратимого процесса термического разложения гидрокарбонатов при деаэрации Na-катионированной воды может быть представлен следующим образом:



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

Таким образом, результирующий процесс включает последовательно протекающие стадии химического превращения, молекулярной диффузии и дисперсного выделения газа, причем вторая и третья стадии являются зависимыми от гидродинамической обстановки в системе. Учитывая, что температура в водяном объеме деаэрационного бака в регулировочном диапазоне нагрузок деаэраатора 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

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

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

В соответствии с результатами исследований И.Е. Орлова и В.А. Пермякова [1, 2], рассматриваемый процесс с наибольшей вероятностью протекает как реакция второго порядка.

Ранее нами выполнено обобщение опубликованных данных и результатов дополнительных экспериментальных исследований по значениям константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэрааторах атмосферного давления [3–5]. На рис. 1 представлены результаты анализа для деаэрааторов без парового барботажа в баке. Разброс полученных значений K может быть обусловлен как метрологическими характеристиками методов количественного химического анализа и измерения теплотехнических параметров, так и неполнотой принятой ранее гипотезы (1) о механизме процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэрааторе или влиянием измененной 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 деаэраатора, т.е. значение K учитывает и гидродинамическую обста-

новку 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 же случае требуемое для расчетов после интегрирования уравнения (2) время пребывания воды в деаэрааторном баке определялось как время полного вытеснения, т.е. путем деления объема воды в баке на объемный расход воды через бак в условиях каждого из опытов.

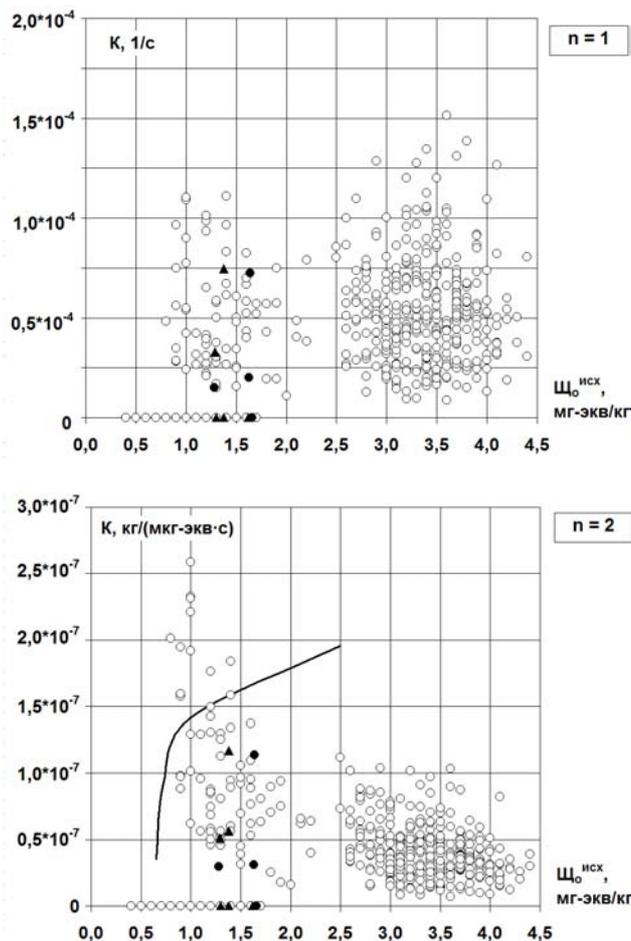


Рис. 1. Экспериментальные значения константы скорости результирующего процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэрааторах в зависимости от щелочности общей исходной воды при отсутствии парового барботажа в водяном объеме деаэрааторного бака: n – порядок реакции; K – константа 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 деаэраатором, мг-экв/кг; линией показаны данные В.А. Пермякова [1]; точки – экспериментальные данные для деаэрааторов разных моделей: ● – ДА-300м; ▲ – ДСА-300; ○ – ДА-50

Анализ полученных данных (рис. 1) показывает, что при порядке реакции $n = 1$ разброс значений K относительно среднего заметно больше для значений $\text{Щ}_0^{\text{исх}} > 2$ мг-экв/дм³. Однако при меньших значениях щелочности это утверждение неочевидно. Имеющиеся данные подтверждают гипотезу И.Е. Орлова и В.А. Пермякова [1, 2] о протекании процесса термического разложения гидрокарбонатов как реакции второго порядка при $\text{Щ}_0^{\text{исх}} > 2$ мг-экв/дм³. При мень-

шей щелочности можно ожидать изменение механизма процесса. Для того чтобы сделать окончательный вывод, необходимо использовать статистические методы анализа гипотез.

С учетом изложенных выше результатов предшествующих исследований сформулированы задачи настоящего этапа работы:

1) выполнение повторной обработки результатов экспериментальных исследований с учетом разного времени пребывания различных элементарных объемов воды в деаэрационном баке в целях уточнения значений константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в опытах;

2) проведение статистического анализа значимости выполненного уточнения константного обеспечения модели;

3) 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 FlowVision (версия 3.08.03) [6]. Программный комплекс FlowVision 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. Средства FlowVision позволяют моделировать сложные течения, сопровождаемые закруткой и отрывом потока, движением свободных или контактных поверхностей, ударными волнами, сопряженным теплообменом, и т.п.

Для проведения численных экспериментов по каждому из рассматриваемых деаэраторов разработана упрощенная геометрическая модель деаэрационного бака. Рассмотрим пример для деаэратора ДСА-300 (рис. 2). Поскольку на данном этапе исследований моделировалось однофазное течение несжимаемой жидкости, поверхность раздела фаз в геометрической модели деаэрационного бака учтена идеальной стенкой (условие проскальзывания).

Физическая модель задана следующими параметрами:

- вещество – вода, агрегатное состояние – жидкость;
- фаза – непрерывная;
- физические процессы: движение – ньютоновская жидкость, турбулентность – стандартная $k-\varepsilon$ модель.

Выбор граничных условий осуществлялся в соответствии с реальными режимными параметрами работы деаэраторов, имевшими место в условиях проведенных экспериментальных исследований [3–5]. Граничные условия, принятые в расчетной модели деаэрационного бака, приведены в табл. 1.

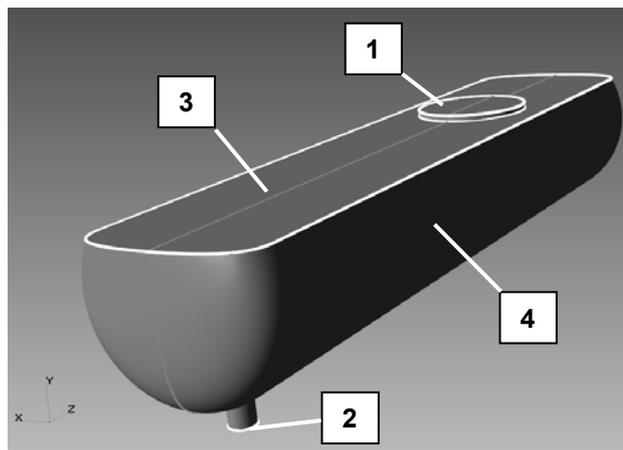


Рис. 2. Упрощенная геометрическая модель бака деаэратора ДСА-300: 1 – входное сечение (граничное условие «Вход»); 2 – выходное сечение (граничное условие «Выход»); 3 – стенка, моделирующая свободную поверхность (граничное условие «Стенка 1»); 4 – стенка деаэрационного бака (граничное условие «Стенка 2»)

Таблица 1. Принятые граничные условия

Наименование граничного условия в соответствии с рис. 2	Тип граничного условия	Параметр	Значение
Вход	Вход / Выход	Нормальная массовая скорость	В соответствии с результатами экспериментальных исследований
Выход	Вход / Выход	Статическое давление	
Стенка 1	Стенка	–	Проскальзывание
Стенка 2	Стенка	–	Прилипание

Расчетная сетка FlowVision – декартова, локально адаптивная. Начальная сетка задана равномерной, с размером ячеек $20 \times 20 \times 60$. С учетом функции подсеточного разрешения геометрии итоговое число расчетных ячеек составляло для условий разных опытов от 42134 до 60986.

Сходимость расчета оценивалась по величине невязок давления среды во входном сечении и скорости в выходном сечении модели.

В результате расчета определялось, в частности, распределение скоростей воды в деаэрационном баке. В качестве средств визуализации результатов расчета выбран 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. Используемая версия FlowVision позволяет выгружать значение переменных «Максимальное время» и «Максимальный путь» по всему слою «Линии тока» (семейство линий) и не позволяет одновременно выгружать указанные параметры по отдельно взятой линии. Учитывая это обстоятельство, обработка результатов расчета проводилась следующим образом.

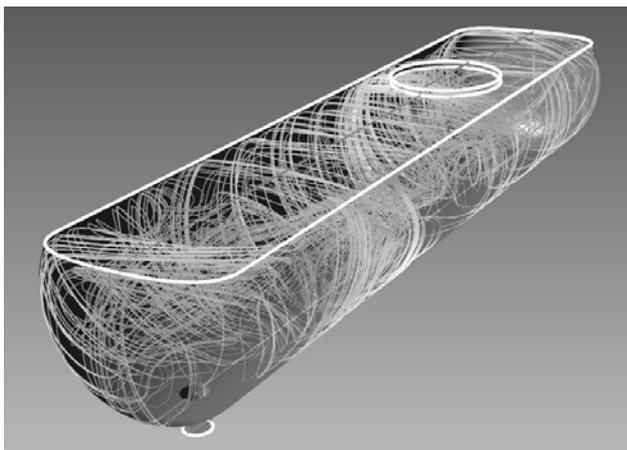


Рис. 3. Пример семейства линий тока в баке деаэратора

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 тока, выгружалось значение переменной «Максимальное время». Таким образом, при условиях каждого опыта получены значения времени пребывания τ_i каждого из m выделенных объемов воды в деаэраторном баке.

Принятое для дальнейших расчетов значение $m = 1000$ выбиралось по результатам специальных исследований, в ходе которых выявлено, что при $m = 500$ результаты расчета константы скорости реакции отличаются от ее значения при $m = 1000$ более чем на 4 %; в то же время увеличение числа разбиений до $m = 1500$ приводило к отклонению значения константы скорости реакции менее чем на 0,2 %.

Собственно уточненное значение константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов определялось исходя из того, что это значение 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/дм³, в i -м объеме воды составит:

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

$$C_i^{n=2} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + K_{n=2}\tau_i}, \quad (4)$$

где индексы $n = 1$ и $n = 2$ относятся соответственно к первому или второму порядку реакции; C_0 – начальная концентрация гидрокарбонатов в воде на входе в деаэраторный бак, мкг-экв/дм³; K – константа скорости реакции, 1/с ($n = 1$) или кг/(мкг-экв·с) ($n = 2$); τ_i – время пребывания в баке i -го объема воды, с.

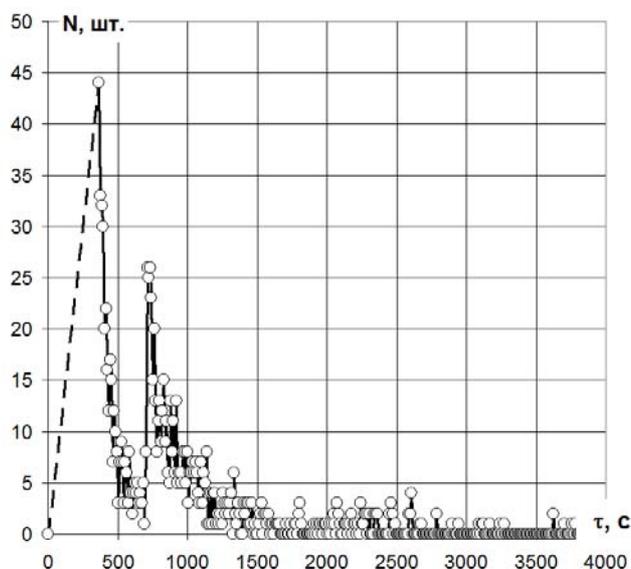
Расчетное значение концентрации гидрокарбонатов в воде в выходном сечении бака C , мкг-экв/дм³, определяется по выражению

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

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 (3)–(5) путем подбора по условию совпадения расчетных и экспериментальных значений концентрации гидрокарбонатов C в воде в выходном сечении бака при условиях каждого опыта.

Для примера рассмотрим результаты расчета τ_i для одного из опытов (деаэратор ДСА-300, уровень воды в баке $H = 2199$ мм, расход воды через бак $G = 64,95$ кг/с, начальная концентрация гидрокарбонатов в воде $C_0 = 1330$ мкг-экв/дм³, конечная концентрация гидрокарбонатов в воде $C_0 = 985$ мкг-экв/дм³). На рис. 4 показано распределение числа линий тока (суммарно $m = 1000$ линий тока) по времени пребывания воды в баке (точки соответствуют числу линий тока N , имеющих время пребывания воды в баке в пределах отклонений ± 5 секунд от абсциссы точки).

Рис. 4. Распределение числа линий тока N , шт., по времени пребывания воды в баке τ_i , с (диапазон по времени сокращен для наглядности, максимальное время пребывания 10230 с)

Анализ данных, представленных на рис. 4, позволяет заключить следующее. Распределение числа линий тока по времени пребывания воды в баке деформировано в сторону уменьшения времени. Соответственно время пребывания воды в баке, рассчитываемое как время полного вытеснения путем деления объема воды в баке на объемный расход воды через бак, не соответствует времени, отвечающему медиане полученного распределения. Это и обуславливает отклонение значений константы скорости реакции, вычисляемой

двумя рассматриваемыми способами. В данном примере эти значения составили:

1) при $n = 1$ (реакция первого порядка) $K = 1,53 \cdot 10^{-4}$ 1/с при расчете через время вытеснения и $K = 2,33 \cdot 10^{-4}$ 1/с при расчете по (3)–(5) (отклонение значений 52,3 %);

2) при $n = 2$ (реакция второго порядка) $K = 0,77 \cdot 10^{-7}$ кг/(мкг-экв*с) при расчете через время вытеснения и $K = 1,23 \cdot 10^{-7}$ кг/(мкг-экв*с) при расчете по (3)–(5) (отклонение значений 59,7 %).

На рис. 4 виден также еще один эффект, приводящий в ряде режимов работы к существенному отклонению рассматриваемого распределения от симметричного, – наличие двух выраженных максимумов. Второй (правый) максимум обусловлен образованием застойной зоны в водяном объеме деаэрационного бака со стороны установки деаэрационной колонки, противоположной торцу бака, из которого осуществляется слив деаэрированной воды. Представляется целесообразным проведение отдельных исследований по выявлению влияния координаты установки деаэрационной колонки по длине бака на эффективность рассматриваемого процесса.

Вернемся к результатам рассматриваемого этапа работы. Обобщение результатов уточнения значений константы скорости реакции по всем опытам выполнено на рис. 5. Данные В.А. Пермякова, представленные на рис. 1, в данном случае исключены, поскольку для их уточнения описанным методом недостаточно исходной информации. Кроме того, исключены нулевые значения констант скорости реакции: они получены при отсутствии щелочности по фенолфталеину деаэрированной воды, что вносит неопределенность в результаты расчета.

Результаты статистического сопоставления данных [7], представленных на рис. 1 и 4, а также проверки гипотезы о наличии смены порядка реакции химической стадии процесса представлены в табл. 2. Уровень значимости для всех случаев, рассматриваемых в табл. 2, принят равным 0,05.

Отметим, что 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, поскольку очевидно, что они ошибочны.

Погрешность определения значений констант скорости реакции при условиях опытов может быть оценена как погрешность косвенных измерений. Для расчета используются результаты измерения щелочности по фенолфталеину и дважды щелочности общей деаэрируемой воды. Нормируемая относительная погрешность определения щелочности общей при среднем в опытах ее значении составляет 3–7 %, щелочности по фенолфталеину – 9–18 %¹. Примем макси-

мальные 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 деаэрационном баке (1,6 %). Тогда погрешность косвенного определения константы скорости реакции, обусловленная погрешностью методов измерения теплотехнических и химических параметров в опытах, составит²

$$1,1\sqrt{7^2 + 7^2 + 18^2 + 18^2 + 1,6^2} = 23 \%$$

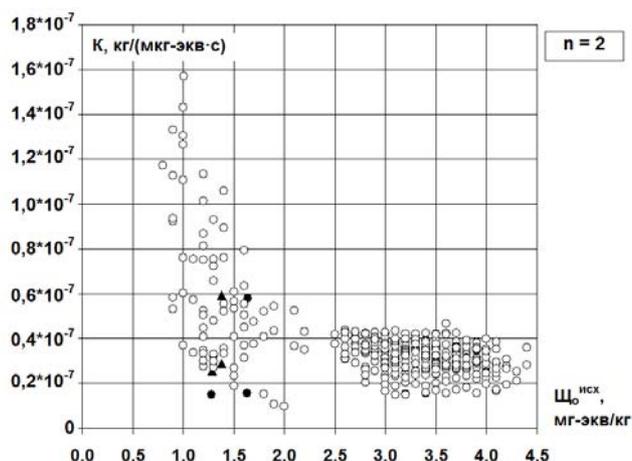
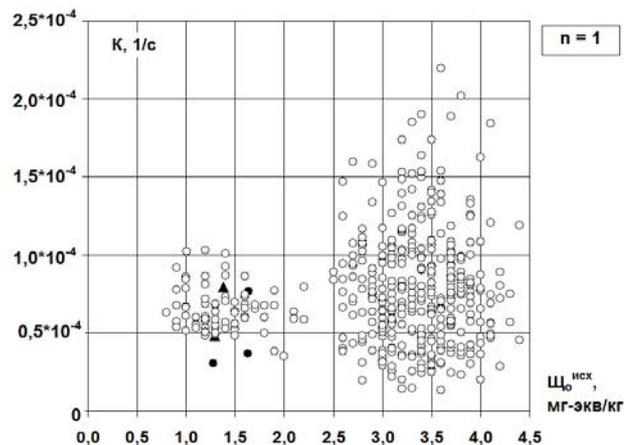


Рис. 5. Результаты уточнения значений константы скорости результирующего процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в деаэрационном баке: обозначения те же, что на рис. 1

Согласно данным табл. 2, погрешность определения констант скорости реакции, определенная статистическими методами по имеющейся совокупности экспериментальных данных после уточнения, составила: $0,14/0,65 \cdot 10^2 = 21,5 \%$ для константы скорости реакции первого порядка

¹ РД 34.37.523.7-88. Воды производственные тепловых электростанций. Метод определения щелочности: Ввод. в действие с 01.10.1989. – 6 с.

² МИ 2083-90. Измерения косвенные. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей: Ввод. в действие с 01.01.1992. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 11 с.

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. 1 и 4 при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 < 2,3$ мг-экв/кг	Нет. Дисперсии относительно среднего для указанных совокупностей данных составляют $6,9 \cdot 10^{-10}$ (1/с) ² по рис. 1 и $2,2 \cdot 10^{-10}$ (1/с) ² по рис. 4. 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 значение $K = (0,65 \pm 0,14) \cdot 10^{-4}$ 1/с
2. Равноточны ли совокупности значений константы скорости реакции K , кг/(мкг-экв-с) (реакция второго порядка) на рис. 1 и 4 при общей щелочности деаэрируемой воды $\text{Щ}_0 > 2,3$ мг-экв/кг	Нет. Дисперсии относительно среднего для указанных совокупностей данных составляют $5,9 \cdot 10^{-17}$ (кг/(мкг-экв-с)) ² по рис. 1 и $4,1 \cdot 10^{-10}$ (кг/(мкг-экв-с)) ² по рис. 4. 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 значение $K = (0,32 \pm 0,06) \cdot 10^{-7}$ кг/(мкг-экв-с)
3. Равноточны ли совокупности значений констант скорости реакции K первого, 1/с, и второго, кг/(мкг-экв-с), порядка 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, второго, кг/(мкг-экв-с), порядка на рис. 4 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

и $0,06/0,32 \cdot 10^2 = 18,8$ % для константы скорости реакции второго порядка. Эти значения соответствуют погрешности косвенного определения константы скорости реакции (23 %). Отметим, что до уточнения предложенным методом (данные на рис. 1) 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. 4 разбросы значений констант скорости реакции в рекомендованных диапазонах их применения (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.

Сводные данные по экспериментальным и рекомендуемым значениям констант скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов с указанием диапазонов наиболее вероятного протекания процесса как реакции первого и второго порядка представлены на рис. 6.

В заключение сформулируем задачи, которые необходимо решить для обеспечения возможности максимально точного (насколько позволяют метрологические характеристики методов измерения, главным образом, химических параметров потоков теплоносителей) прогнозирования показателей эффективности работы деаэраторов по удалению химически связанных форм угольной кислоты:

1. Реализация предложенного метода уточнения опытных значений констант скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов применительно к деаэраторам с паровым барботажем в водяном объеме деаэраторного бака.

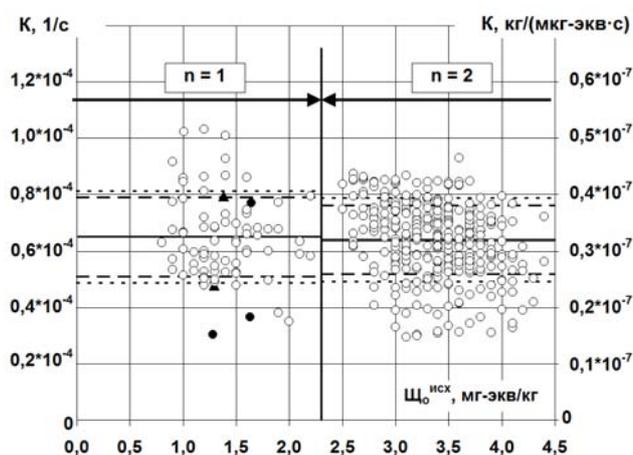


Рис. 6. Сводные данные по экспериментальным и рекомендуемым значениям констант скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в деаэраторном баке: сплошные горизонтальные линии – рекомендованные значения; штриховые линии – границы доверительного интервала погрешности определения рекомендованных значений константы скорости реакции (доверительная вероятность 0,95); пунктирные линии – границы доверительного интервала погрешности определения константы скорости реакции, обусловленные метрологическими характеристиками методов измерения химических и теплотехнических параметров потоков теплоносителей (доверительная вероятность 0,95); прочие обозначения те же, что на рис. 1

2. Установление зависимостей параметров распределения времени пребывания элемен-

тарных объемов воды в деаэрационном баке с паровым барботажем и без него от режимных параметров для обеспечения возможности решения обратной задачи – прогнозирования степени термического разложения гидрокарбонатов с использованием уточненных значений констант скорости реакции.

3. Проведение расчетных исследований по определению зависимостей показателей эффективности термического разложения гидрокарбонатов от координаты установки деаэрационной колонки по длине бака, обусловленных образованием застойных зон в водяном объеме.

Список литературы

1. **Пермяков В.А.** Исследование эффективности применения парового барботажа в термических деаэраторах электростанций: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1954. – 209 с.
2. **Оликер И.И., Пермяков В.А., Бранч Н.М.** Работа термического деаэратора атмосферного давления с барботажным устройством ЦКТИ // Теплоэнергетика. – 1965. – № 9. – С. 16–22.
3. **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.
4. **Коротков А.А.** Декарбонизация воды атмосферными деаэраторами // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 8–11.
5. **Коротков А.А.** Повышение эффективности декарбонизации воды термическими деаэраторами атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2013. – 161 с.

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (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,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (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, старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

6. **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.

7. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. В 2 кн. Кн. 1. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

References

1. **Permyakov, V.A.** *Issledovanie effektivnosti primeniya parovogo barbotazha v termicheskikh deaeratorakh elektrostantsiy.* Diss. kand. tekhn. nauk [Study of application efficiency of steam bubbling in thermal deaerators at power plants. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1954. 209 p.
2. **Oliker, I.I., Permyakov, V.A., Branch, N.M.** *Teploenergetika*, 1965, no. 9, pp. 16–22.
3. **Barochkin, E.V., Moshkarin, A.V., Vinogradov, V.N., Ledukhovskiy, G.V., Korotkov, A.A.** *Teploenergetika*, 2012, no. 7, pp. 40–44.
4. **Korotkov, A.A.** *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 8–11.
5. **Korotkov, A.A.** *Povyshenie effektivnosti dekarbonizatsii vody termicheskimi deaeratorami atmosfornogo davleniya.* Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of thermal water decarbonization in atmospheric pressure deaerators. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2013. 161 p.
6. **Kondratin, T.V., Tkachenko, B.K., Berезnikova, M.V., Evdokimov, A.V., Zuev, A.P.** *Primenenie paketov prikladnykh programm pri izuchenii kursov mekhaniki zhidkosti i gaza* [Application of software packages in fluid mechanics courses]. Moscow, MFTI, 2005. 104 p.
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.