

УДК 621.321

Исследование эффективности деаэрации воды в баках атмосферных деаэраторов, оборудованных барботажным коллектором

Барочкин Е.В., д-р техн. наук, Ледуховский Г.В., Виноградов В.Н., кандидаты техн. наук,
Коротков А.А., Ненаездников А.Ю., инженеры

Приведены результаты исследований эффективности обескислороживания и декарбонизации воды в деаэраторных баках атмосферных деаэраторов, оборудованных одиночным барботажным перфорированным коллектором.

Ключевые слова: термический деаэратор, десорбция кислорода, десорбция диоксида углерода, моделирование процессов деаэрации, струйный отсек, барботажное устройство.

The research of water deaeration efficiency in cisterns of atmospheric deaerators, equipped with barbotage manifold

Barochkin E.V., doctor of science, Leduhovsky G.V., Vinogradov V.N., candidates of science,
Korotkov A.A., Nenaezdnikov A.J., engineers

Results of researches of water deaeration and decarbonization efficiency in cisterns of atmospheric deaerators, equipped with single barbotage punched manifold are shown.

Keywords: steam deaerator, oxygen desorption, carbon dioxide desorption, deaeration process simulation, jet compartment, bubbler.

Существенный вклад в суммарный эффект деаэрации воды в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления вносит работа барботажного устройства деаэраторного бака. Заводские конструкции современных деаэраторов типа «ДА» и «ДА-м» (рис. 1) [1] не предусматривают оборудования деаэраторных баков какими-либо барботажными устройствами. Причина этого заключается в том, что деаэрационные колонки таких деаэраторов, имеющие один или два струйных отсека, а также одно или два барботажных устройства, обеспечивают получение воды нормативного химического качества.

Однако в условиях эксплуатации подача пара в одно из барботажных устройств деаэрационной колонки – затопленный барботажный коллектор (рис. 1, позиция 7) – обычно не организована. Подключение этого устройства требует монтажа дополнительных паропроводов на площадке обслуживания деаэратора, что увеличивает площадь последней. Кроме того, указанный паропровод должен быть оборудован регулятором давления, поскольку избыточная подача пара на барботаж может привести к нарушению гидравлического режима работы барботажного листа (рис. 1, позиция 8) и вентиляции надводного пространства деаэраторного бака. В результате эффективность деаэрации может даже ухудшиться.

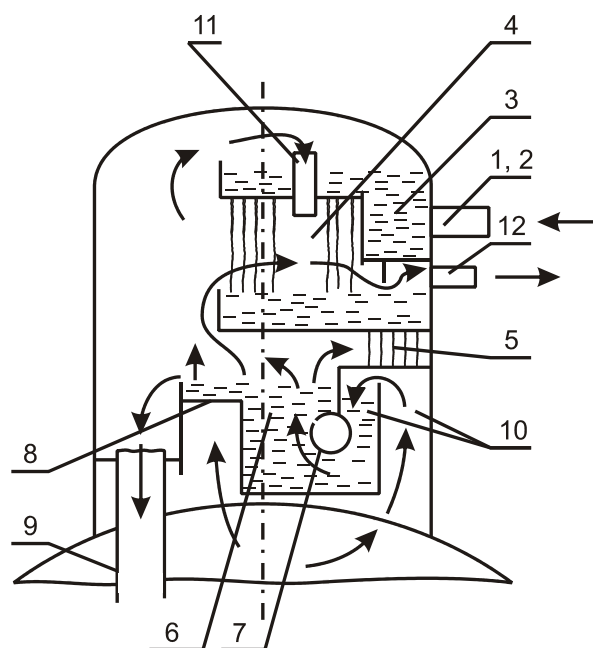


Рис. 1. Конструктивная схема деаэрационной колонки ДА-300м: 1 и 2 – штуцеры подвода исходной воды; 3 – смешительный колодец; 4 – верхний струйный отсек; 5 – нижний струйный отсек; 6 – барботажный колодец; 7 – барботажный коллектор деаэрационной колонки; 8 – непривальный барботажный лист; 9 – опускные трубы; 10 – гидрозатвор барботажного колодца; 11 – пароперепускные трубы верхней тарелки; 12 – штуцер отвода пара

Деаэрационные колонки типа «ДА» и «ДА-м», в которых задействованы не все предусмотренные барботажные устройства, а также деаэрационные колонки устаревшей конструкции (типа «ДСА») не позволяют получить

воду требуемого химического качества, особенно по содержанию свободной углекислоты [2]. В таких условиях значительная дегазационная нагрузка передается на деаэрационный бак. Известно [2–4], что деаэрационные баки, не оборудованные барботажными устройствами, обеспечивают удаление из воды лишь относительно малых количеств кислорода и диоксида углерода. Применение барботажа в водяном объеме бака при правильной его организации позволяет обеспечить надежное удаление из воды кислорода и диоксида углерода, находящегося в химически не связанном виде.

В деаэраторе наряду с процессами физической десорбции кислорода и диоксида углерода протекают процессы термического разложения бикарбонатов и гидролиза карбонатов. Необходимо учитывать также гидратацию молекулярного диоксида углерода и диссоциацию образовавшейся углекислоты. Степень разложения бикарбонатов σ_d , рассчитываемая по формуле $\sigma_d = 2\psi_{\text{ф}} / \psi_{\text{общ}}$, где $\psi_{\text{ф}}$, $\psi_{\text{общ}}$ – щелочность по фенолфталеину и щелочность общая деаэрированной воды соответственно, является важным показателем работы деаэрата, поскольку определяет эффективность удаления не только свободной, но и связанной углекислоты. Оставшиеся в воде после деаэрата бикарбонаты подвергаются термическому разложению уже в более теплонапряженном оборудовании (бойлерном, котельном) либо непосредственно в тепловой сети. Высвободившийся при этом углекислый газ участвует в коррозионных процессах.

Значение σ_d зависит от времени пребывания воды в деаэрационном баке T и от наличия в этом баке затопленного барботажного устройства и его типа. Чем больше это время, тем больше значение σ_d . При наличии затопленного барботажного устройства значение σ_d больше, чем при его отсутствии [5]. Связь между указанными параметрами при этом линейна (рис. 2).

Вместимость типовых деаэрационных баков атмосферных деаэраторов с производительностью не менее $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ составляет 25 % от их номинальной производительности. Диапазон регулирования производительности деаэраторов – от 30 до 120 %. Таким образом, время пребывания воды в деаэрационном баке T максимально при сниженной гидравлической нагрузке деаэрата и минимально при повышенной. Это время изменяется в пределах от 0,21 до 0,83 ч.

При линейной зависимости σ_d от T можно рассчитывать на получение следующих значений σ_d :

- для деаэраторов с затопленным барботажным устройством – от 0,126 до 0,498;
- для деаэраторов без затопленного барботажного устройства – от 0,084 до 0,332.

Более точные данные могут быть получены только в ходе специальных экспериментальных исследований.

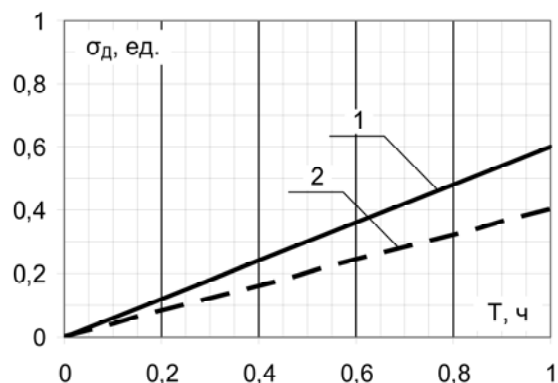


Рис. 2. Зависимость степени превращения бикарбонатов в карбонаты от времени пребывания воды в деаэрационном баке: T – время пребывания воды в деаэрационном баке, ч; σ_d – степень разложения бикарбонатов в деаэраторе, ед.; 1 – деаэраторы с затопленным барботажным устройством в деаэрационном баке; 2 – деаэраторы без затопленного барботажного устройства в деаэрационном баке

Одним из наиболее часто применяемых барботажных устройств деаэрационных баков является одиночный перфорированный коллектор, смонтированный на дне бака вдоль его образующих. Нами проведены исследования эффективности деаэрации воды в деаэрационных баках деаэраторов ДА-300м и ДСА-300, оборудованных таким барботажным устройством (деаэрационные баки обоих деаэраторов и их барботажные устройства одинаковы, отличие состоит только в типе слива воды из деаэрационной колонки: в деаэраторе ДА-300м использованы опускающие трубы, в деаэраторе ДСА-300 вода сливается в бак в виде струйного потока) (рис. 3).

Вода из деаэрационной колонки поступает в деаэрационный бак (в деаэраторе ДА-300м – по опускающим трубам в сливной стакан 1) и движется в сторону трубопровода деаэрированной воды 3. При этом поступательном движении она обрабатывается барботажным паром, выходящим из отверстий барботажного коллектора 2. Подача пара в сам барботажный коллектор 2 осуществляется через трубопровод 5. Второй паровой поток – основной пар – поступает в надводное пространство деаэрационного бака через трубопровод 4. В надводном пространстве бака этот поток пара смешивается с несконденсированной частью барботажного пара, эта смесь паровых потоков движется в сторону деаэрационной колонки, обеспечивая вентиляцию надводного пространства деаэрационного бака и эвакуацию выделившихся из воды в баке газов (в частности, кислорода и диоксида углерода). Бак оборудован также вспомогательными трубопроводами 6, 7 и 8, уравнивающим устройством 9.

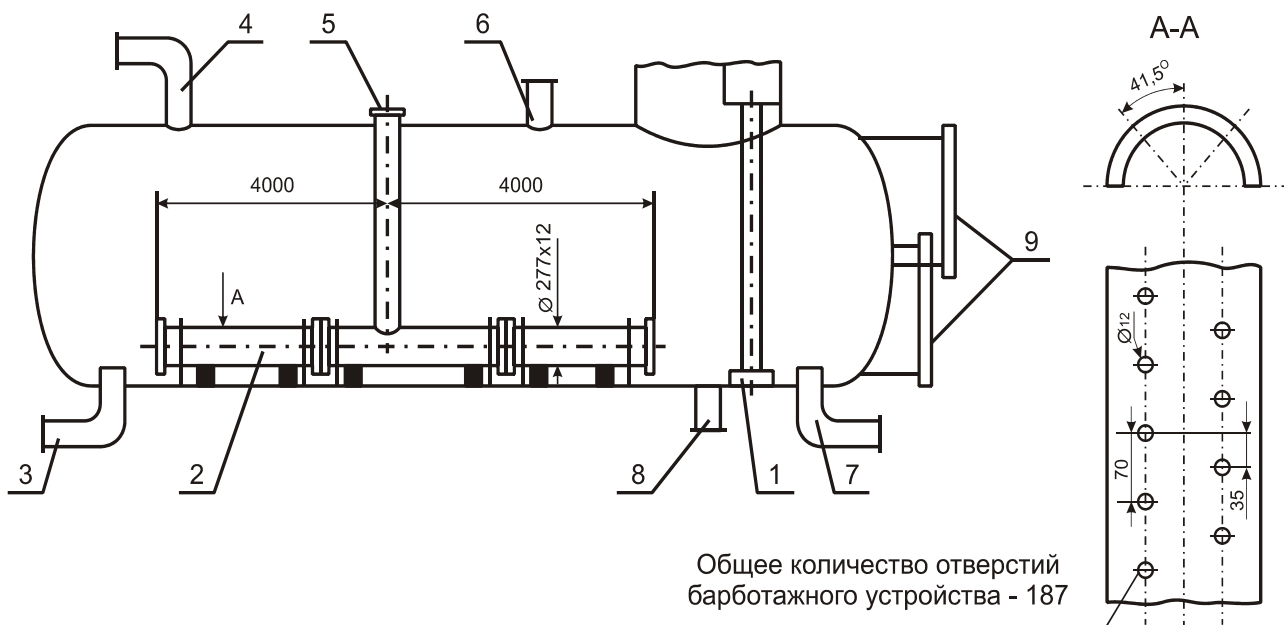


Рис. 3. Конструктивная схема деаэрационного бака деаэратора ДА-300М: 1 – стакан сливной опускных труб деаэрационной колонки; 2 – перфорированный барботажный коллектор деаэрационного бака; 3 – трубопровод отвода деаэрированной воды; 4 и 5 – трубопроводы ввода соответственно основного и барботажного пара; 6 и 7 – трубопроводы подключения деаэратора к паровой и водной уравнивающим линиям; 8 – трубопровод дренажный; 9 – уравнивающее устройство

В ходе экспериментальных исследований выполнены измерения теплотехнических параметров теплоносителей, а также измерения химических показателей качества проб воды, включая пробы воды из внутренних элементов деаэратора. В результате обработки опытных данных теплотехнических измерений определены значения массовых расходов воды и пара на входе и выходе каждого отдельного элемента деаэратора, а также значения давлений, температур, энтальпий этих теплоносителей. Подробные сведения об алгоритме этой обработки приведены в [2] и поэтому здесь опущены. Остановимся более подробно на измерениях химических параметров, касающихся расчета десорбции кислорода и хемосорбции-десорбции углекислоты в деаэрационном баке.

В перечень измеренных химических параметров вошли:

- щелочность общая $\text{Щ}_{\text{общ}}$ и по фенолфталеину $\text{Щ}_{\text{фф}}$, мкг-экв/дм³;
- концентрация кислорода C_{O_2} и диоксида углерода C_{CO_2} , мкг/дм³.

Эти параметры измерены в следующих пробах воды и пара:

- основного и барботажного пара на входе в деаэратор;
- воды на входе в деаэрационный бак;
- воды из зоны деаэрационного бака, соответствующей середине барботажного коллектора;
- воды на выходе из деаэрационного бака.

Рассмотрим характеристики эффективности десорбции кислорода из воды в деаэрационном баке. При графической интерпретации ре-

зультатов удобно пользоваться понятием эффекта десорбции (эффекта деаэрации), рассчитываемого по выражению (для кислорода):

$$\text{Э}_{\text{O}_2} = (\text{C}_{\text{O}_2(\text{вх})} - \text{C}_{\text{O}_2(\text{вых})}) / \text{C}_{\text{O}_2(\text{вх})} * 100, \quad (1)$$

где Э_{O_2} – эффект десорбции кислорода из воды в деаэрационном баке, %; $\text{C}_{\text{O}_2(\text{вх})}$ и $\text{C}_{\text{O}_2(\text{вых})}$ – концентрация растворенного кислорода в воде соответственно на входе (после деаэрационной колонки) и выходе деаэрационного бака, мкг/дм³.

Наибольшая корреляция выявлена между значениями эффекта десорбции кислорода и удельного расхода пара на барботаж (рис. 4). Видно, что эффект дегазации по кислороду практически не зависит от удельного расхода пара на барботаж при его значениях более 15 кг/т и составляет от 98 до 100 % (в пределе). При малых значениях расхода пара на барботаж (менее 15 кг/т) эффективность удаления кислорода резко снижается. Это означает, что для барботажных устройств типа исследованных нами для обеспечения эффективного удаления кислорода из воды необходимо поддерживать удельный расход барботажного пара не менее 15 кг/т.

Аналогичные результаты получены другими авторами при исследовании барботажных устройств системы ЦКТИ [3]. Однако для устройств системы ЦКТИ максимальный эффект дегазации, рассчитанный нами по опубликованным данным [3], составляет около 85 %. Причина этого, по-видимому, заключается в недостаточности размеров устройства системы ЦКТИ и, как следствие, в недостаточном развитии площади поверхности контакта фаз.

К сожалению, авторы не приводят характеристик точности полученных ими результатов.

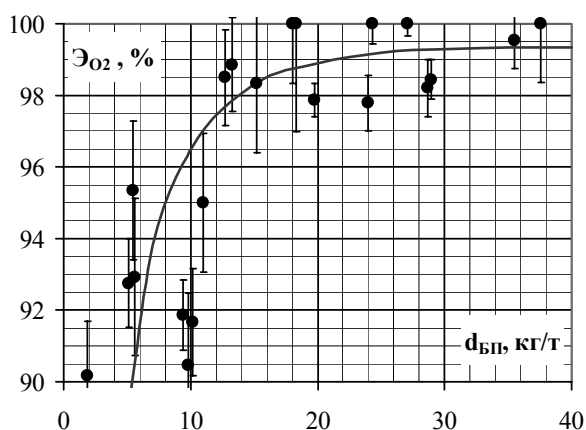


Рис. 4. Влияние удельного расхода пара через затопленный барботажный коллектор деаэрационного бака на эффект десорбции кислорода: $d_{БП} = G_{БП} / C_{В}^{вх}$ — удельный массовый расход пара через затопленный барботажный коллектор деаэрационного бака, кг/т; $G_{БП}$ — массовый расход пара на барботаж, кг/ч; $C_{В}^{вх}$ — массовый расход воды на входе в деаэрационный бак, т/ч; \mathcal{E}_{O_2} — эффект десорбции кислорода из воды в деаэрационном баке, %; точки — экспериментальные данные; сплошная линия — линия регрессии (метод наименьших квадратов); погрешность эффекта дегазации рассчитана как максимальная через погрешности измерения концентрации кислорода на входе и выходе деаэрационного бака

Выявлено также, что размеры барботажного устройства играют значительную роль при десорбции кислорода из воды в деаэрационном баке. Совместное рассмотрение результатов измерения концентрации кислорода в воде из зоны деаэрационного бака, соответствующей середине барботажного коллектора, и в воде на выходе деаэрационного бака показывает, что эффект дегазации тем выше, чем больше длина барботажного коллектора (рис. 5). При этом с увеличением длины коллектора вероятность проскока растворенного кислорода в деаэрированную воду снижается: эффект дегазации до середины барботажного устройства изменялся в опытах от 60 до 90 %, а до выхода из бака — лишь от 90 до 100 % (в пределе).

При этом для исследуемых нами барботажных устройств не удалось обнаружить корреляции между эффектом дегазации и недогревом воды на входе в бак до температуры насыщения. Причина этого, видимо, связана с размерами барботажного коллектора: даже при наличии недогрева воды порядка $9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (максимальное зафиксированное в опытах значение) часть объема бака работает как смешивающий подогреватель, а оставшаяся часть — как дегазационное устройство.

Установлено также, что при оптимальных значениях удельного расхода пара на барботаж на эффективность процесса десорбции кислорода не оказывают заметного влияния ни концентрация кислорода в воде на входе в деаэрационный бак, ни гидравлическая на-

грузка деаэрационного бака (т. е. время пребывания воды в баке).

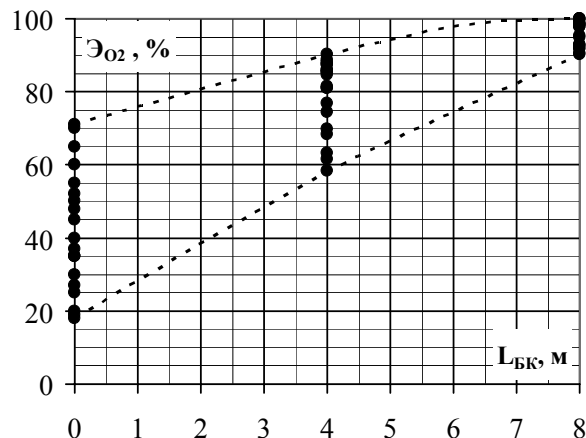


Рис. 5. Влияние длины барботажного коллектора на эффект десорбции кислорода из воды в деаэрационном баке: $L_{БК}$ — длина барботажного коллектора от места ввода воды в деаэрационный бак до точки измерения концентрации кислорода в воде, м; точки — экспериментальные данные; пунктирные линии показывают границы изменения эффекта дегазации по кислороду в опытах; остальные обозначения те же, что на рис. 4

Анализ экспериментальных данных показывает, что в зоне оптимальных удельных расходов пара на барботаж (более 15 кг/т) на эффективность процесса дегазации по кислороду не оказывает влияния и уровень воды в деаэрационном баке, в то время как в режимах работы деаэрационных баков без подачи барботажного пара этот режимный фактор является одним из определяющих.

Обратимся теперь к эффективности хемосорбции-десорбции углекислоты в деаэрационных баках исследуемых деаэрационных баков. Корреляция рассчитанных по экспериментальным данным значений степени разложения бикарбонатов σ_d от времени пребывания воды в деаэрационном баке T (рис. 6) практически полностью подтверждает полученные данные (рис. 2) для режима работы деаэрационного бака с подачей барботажного пара.

Экстраполяция регрессионной зависимости (рис. 6) до значения времени пребывания воды в деаэрационном баке $T = 60$ мин (1 ч) приводит к значению $\sigma_d = 0,58$, что также соответствует полученным данным (рис. 2).

Линейный характер рассматриваемой зависимости подтверждает зависимость степени разложения бикарбонатов в деаэрационном баке от длины барботажного коллектора (рис. 7). В каждом опыте степень разложения бикарбонатов, достигнутая к середине барботажного коллектора (середине деаэрационного бака), приблизительно вдвое меньше, чем значение этого показателя для воды на выходе из бака.

Необходимо отметить, что экспериментальные данные не подтверждают зависимости, аналогичной 2 на рис. 2, между значениями степени разложения бикарбонатов σ_d и

времени пребывания воды в деаэрационном баке T для режима работы деаэратора без подачи в него барботажного пара: например, при $T = 15$ мин $\sigma_d = 0,09$, а при $T = 38,5$ мин $\sigma_d = 0$. К сожалению, имеющиеся в нашем распоряжении экспериментальные данные не позволяют выявить какой-либо регрессионной зависимости между σ_d и T . Требуется дополнительные экспериментальные исследования при работе деаэраторов без подачи барботажного пара.

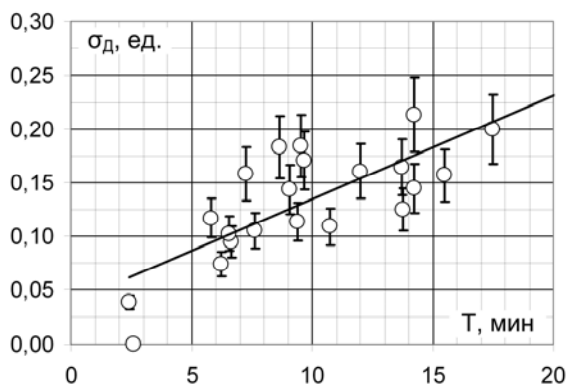


Рис. 6. Экспериментальная зависимость степени превращения бикарбонатов в карбонаты от времени пребывания воды в деаэрационном баке: точки – значения σ_d , рассчитанные по экспериментальным данным; сплошная линия – линия регрессии (метод наименьших квадратов); прочие обозначения те же, что на рис. 2

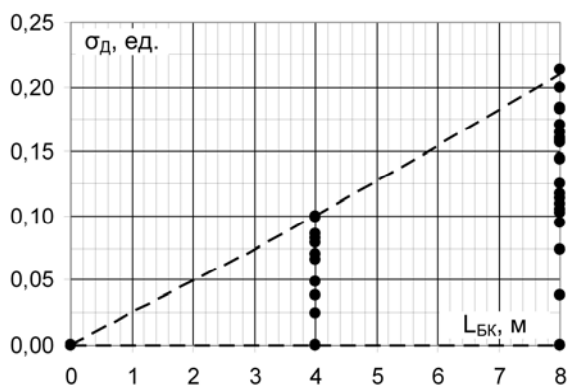


Рис. 7. Влияние длины барботажного коллектора на степень разложения бикарбонатов в деаэрационном баке: пунктирные линии показывают границы изменения степени разложения бикарбонатов в опытах; остальные обозначения те же, что на рис. 5

В ходе экспериментальных исследований выявлено также, что значение σ_d определяется не только временем пребывания воды в баке, но также (как и значение эффекта обескислороживания ΔO_2) величиной удельного расхода пара на барботаж $d_{БП}$ (рис. 8).

Сопоставив данные, представленные на рис. 4 и 8, можно увидеть, что зависимости эффекта обескислороживания и степени разложения бикарбонатов от удельного расхода пара на барботаж весьма схожи: эффективность работы деаэратора заметно ухудшается при уменьшении удельного расхода пара на

барботаж (менее 15 кг/т). Можно полагать, что при значениях $d_{БП} \geq 15$ кг/т складываются наиболее благоприятные условия для перемешивания воды в деаэрационном баке, т. е. для развития поверхности контакта фаз и уменьшения диффузионного сопротивления процессам десорбции газов.

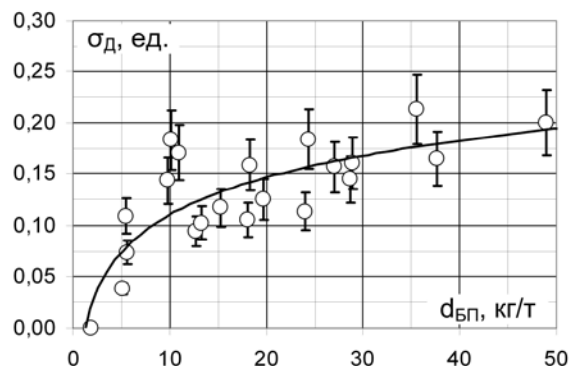


Рис. 8. Экспериментальная зависимость степени превращения бикарбонатов в карбонаты от удельного расхода пара на барботаж в деаэрационном баке: обозначения те же, что на рис. 2, 4 и 6

Заключение

Использование затопленных барботажных устройств деаэрационных баков атмосферных деаэраторов позволяет существенно повысить эффективность десорбции кислорода и, особенно, хемосорбции-десорбции углекислоты.

На основании результатов экспериментальных исследований установлены характеристики эффективности деаэрации воды в деаэрационных баках атмосферных деаэраторов, оборудованных затопленным барботажным устройством в виде одиночного перфорированного коллектора на дне бака:

- минимально необходимое значение удельного расхода пара на барботаж по условию обескислороживания воды и удалению связанной углекислоты составляет 15 кг/т; при меньших значениях удельного расхода пара на барботаж эффективность деаэрации резко снижается; увеличение удельного расхода пара на барботаж до значения более 15 кг/т не приводит к заметному изменению эффекта десорбции кислорода, а степень разложения бикарбонатов в деаэрационном баке при этом увеличивается по закону, близкому к логарифмическому;

- при значениях удельного расхода пара на барботаж от 15 кг/т и более на эффективность десорбции кислорода в деаэрационном баке практически не оказывают влияния прочие теплогидравлические параметры работы деаэратора;

- с увеличением длины барботажного коллектора эффективность десорбции кисло-

рода и хемосорбции-десорбции углекислоты повышается;

– подтверждается линейный характер зависимости степени разложения бикарбонатов от времени пребывания воды в деаэрационном баке.

Список литературы

1. **Деаэраторы** термические: отраслевой каталог 77-94 / Комитет Российской Федерации по машиностроению. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1995.

2. **Ледуховский Г.В.** Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления: Дис... канд. техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2008.

3. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы / Ульян. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003.

4. **Оликер И.И., Пермяков В.А.** Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971.

5. **Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В.** Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

Барочкин Евгений Витальевич,
Ивановский государственный энергетический университет,
доктор технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 38-47-39,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,
Ивановский государственный энергетический университет,
кандидат технических наук, ассистент кафедры тепловых электрических станций,
телефон 8-910-698-99-90,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Виноградов Владимир Николаевич,
Ивановский государственный энергетический университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике,
телефон (4932) 38-57-38,
e-mail: admin@xxte.ispu.ru

Коротков Александр Александрович
Ивановский государственный энергетический университет,
ассистент кафедры тепловых электрических станций
телефона 8-910-680-65-68
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Ненаездников Александр Юрьевич,
ОАО «Северсталь»,
начальник теплосилового цеха,
телефон (8202) 53-09-09,
адрес: 162600, Россия, Вологодская обл., г. Череповец, ул. Мира, д. 30.