

Экспериментальные исследования и моделирование технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды

Мошкарин А.В., доктор техн. наук, Виноградов В.Н., Ледуховский Г.В., кандидаты техн. наук, Коротков А.А., Барочкин А.Е., инженеры

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» – ИГЭУ

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

Приведены результаты экспериментальных исследований и предложены математические модели процессов гидродинамики, теплообмена и десорбции растворенного кислорода, реализуемых в струйных и барботажных элементах деаэраторов атмосферного давления.

Деаэраторы атмосферного давления типов ДСА, ДА и ДА-м широко применяются на действующих и проектируемых объектах энергетики. Особенности конструктивного исполнения деаэраторов различных моделей существенно влияют на их эксплуатационные характеристики. Технологически оптимальные режимы работы деаэраторов устанавливаются в ходе их натурных испытаний с учётом паспортных характеристик деаэрационных колонок. Проведение таких испытаний сопряжено с существенными затратами временных, трудовых и энергетических ресурсов. В связи с этим представляет интерес разработка математических моделей деаэраторов, адекватно описывающих протекающие в них технологические процессы.

В опубликованных работах, касающихся теории деаэрации, распространение получили статистические модели, отражающие функциональную связь между входными и выходными параметрами деаэратора заданной конструкции в различных режимах его работы. Статистический подход имеет недостаток: при внесении в конструкцию аппарата любого значимого изменения необходимы повторные испытания и разработка новой статистической модели. Более предпочтительным является такой способ моделирования, при котором выполняется анализ конструктивной схемы аппарата с выделением отдельных элементов, составляется расчетная схема деаэратора в целом и на её основе синтезируется математическая модель деаэратора из моделей его отдельных элементов. Количество таких элементов в деаэраторах современных конструкций может достигать десяти, а схема их соединения по потокам воды и греющего пара предусматривать рециркуляцию, объединение и разделение потоков.

Опубликован ряд альтернативных математических моделей струйных и барботажных элементов, применение которых при одних и тех же исходных данных приводит к существенно различающимся результатам. По этой причине использованию тех или иных моделей должна предшествовать проверка их адекватности с обращением к результатам натурных испытаний деаэраторов различных конструкций.

Экспериментальные исследования проведены в условиях промышленной эксплуатации деаэраторов. В

качестве объектов исследований выбраны деаэраторы типовых конструкций – модели ДСА-300 и ДА-300м, работающие на Na-катионированной воде. Разработана схема отбора проб и конструкции пробоотборных устройств, обеспечивающие получение экспериментальных данных о теплофизических и химических характеристиках теплоносителей в промежуточных элементах деаэраторов. В качестве примера, на рис. 1 показана схема отбора проб деаэрационной колонки КДА-300м.

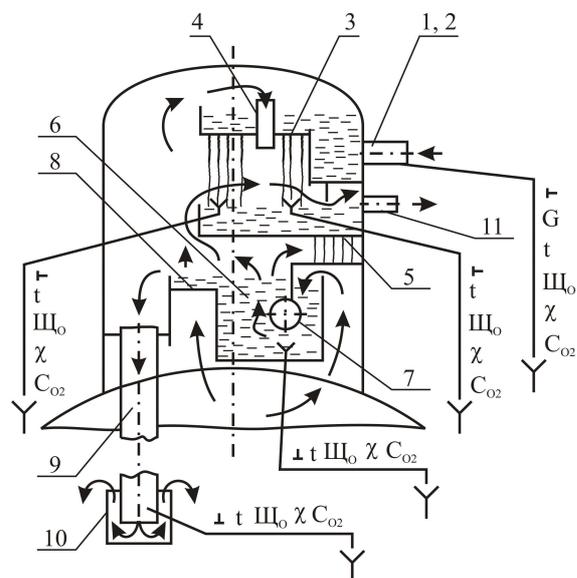


Рис. 1. Схема отбора проб воды деаэрационной колонки КДА-300м.

1, 2 – штуцеры подвода исходной воды (основной поток и поток после охладителя выпара); 3 – струеобразующая тарелка; 4 – пароперепускные трубы; 5 – переливная тарелка; 6 – барботажный колодец; 7 – барботажный коллектор (отключен); 8 – непровальный барботажный лист; 9 – опускные трубы; 10 – приемные стаканы опускных труб в деаэрационном баке; 11 – штуцер отвода выпара; ⊥ – точка контроля; G – массовый расход воды; t – температура неохлажденной пробы; Щ₀ – щелочность общая; χ – удельная электропроводность; C_{O₂} – массовая концентрация растворенного кислорода

Точки отбора проб соответствуют выходу воды из струйных отсеков, непрывальных барботажных листов, затопленных барботажных устройств. Перечень измеряемых теплотехнических параметров включал расходы, температуры и давления теплоносителей на входе и выходе ряда элементов деаэраторов, уровень воды в деаэрационных баках, атмосферное давление. В объем химического контроля вошли измерения в пробах воды и пара массовых концентраций растворенного кислорода, удельной электропроводности, щелочности общей. Последние два показателя использованы для контроля отсутствия подсоса парогазовой смеси из парового пространства деаэратора в пробу воды. Приборный парк составили современные образцовые приборы теплотехнического и химического контроля.

Исследования проведены методом активного эксперимента. Рассмотрены режимы работы с совместной подачей в деаэраторы основного и барботажного пара, только основного и только барботажного пара в широких диапазонах изменения гидравлической нагрузки, удельного расхода пара, температуры исходной воды, давления в деаэраторе и уровня воды в деаэрационном баке. Получены данные о показателях работы двух исследуемых деаэраторов в 69 опытах.

Опытные данные по струйным отсекам сопоставлены с результатами расчета показателей их работы по известным зависимостям (см. рис. 2 и 3). Рассмотрены модели процесса нагрева воды (критериальное уравнение ЦКТИ для струйных отсеков регенеративных подогревателей турбоустановок [4]; модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной [1–4]; модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского [2, 3]; модель М.П. Белоусова [1–4]), а также модели десорбции из воды растворенного кис-

лорода (модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского [2, 3]; модель ЦКТИ [1]; модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной [1–4]; критериальное уравнение ЦКТИ [1–3]). Минимальное значение среднеквадратического отклонения, рассчитанного по остаточной дисперсии в целом по всем опытам, получено на уровне $7,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ для модели теплообмена М.П. Белоусова и около 1100 мкг/дм^3 для модели десорбции кислорода ЦКТИ. Таким образом, ни одна из рассмотренных моделей не дает приемлемых результатов.

Анализ гидродинамических условий работы струйных отсеков исследуемых деаэраторов показал, что практически во всех режимах работы деаэрационных колонок наблюдается струйно-капельный режим течения воды. В таких условиях модели, основанные на предположении сплошности потока воды, оказываются неадекватными. Гипотеза об отсутствии чисто струйных режимов течения воды в струйных отсеках подтверждена результатами визуальных наблюдений при работе деаэратора на холодной воде (для исключения запаривания деаэрационной колонки) с последующим пересчетом результатов к реальным температурным условиям. Наблюдения показали, что сплошность потока воды в струях в регулировочном диапазоне гидравлических нагрузок деаэраторов сохраняется лишь в пределах зоны относительно небольшой высоты (не более 28 % от общей высоты струйного отсека) непосредственно под струеобразующей тарелкой. Ниже этой зоны режим течения характеризуется образованием крупных капель в результате свободного распада струй. Динамическое воздействие парового потока приводит к уменьшению высоты зоны существования сплошных струй.

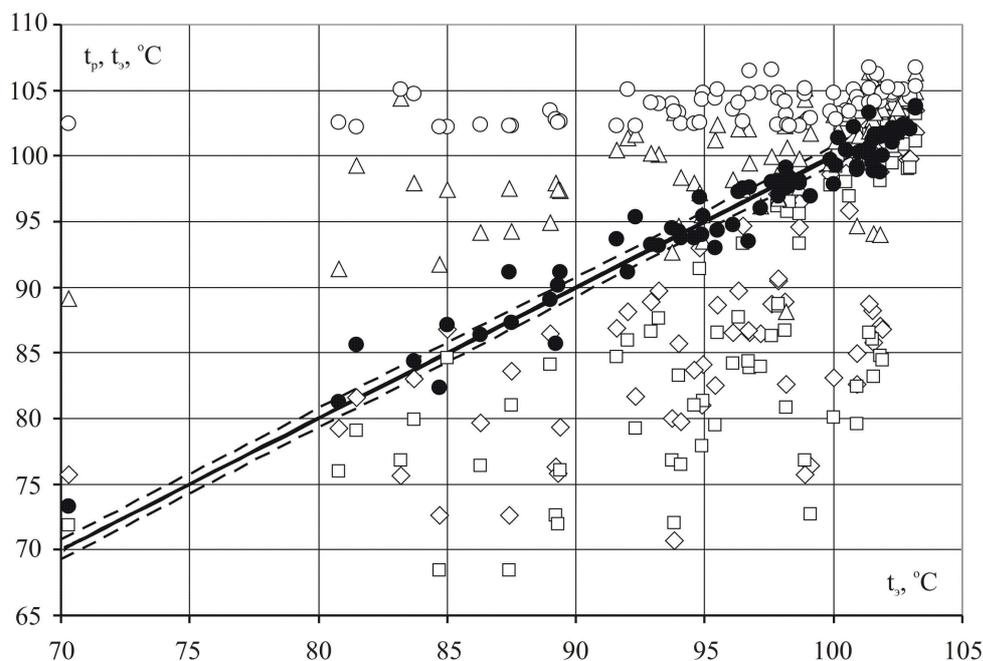


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета температуры воды на выходе струйных отсеков деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м.

t_s и t_p – соответственно экспериментальные и расчетные значения температур воды на выходе струйного отсека; сплошная линия – совпадение экспериментальных и расчетных данных; пунктирные линии – верхняя и нижняя границы 95 % - го доверительного интервала погрешности измерения; \circ – критериальное уравнение ЦКТИ для регене-

ративных подогревателей турбоустановок; \diamond - модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной; \square - модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского; Δ - модель М.П. Белоусова; \bullet - критериальное уравнение, полученные по результатам исследований

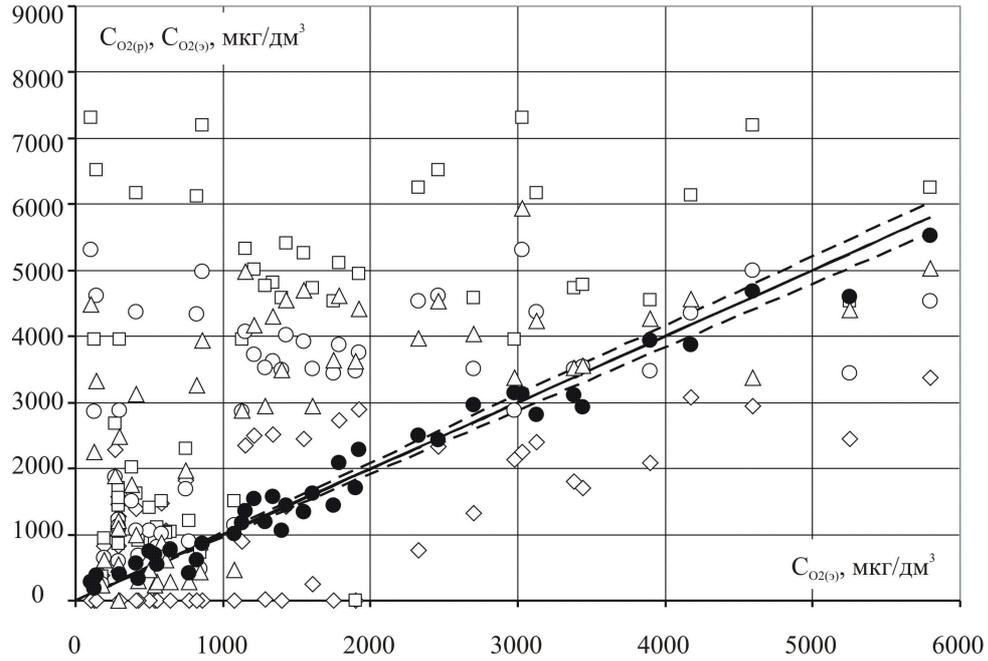


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета остаточной концентрации растворенного в воде кислорода на выходе струйных отсеков деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м.

$C_{O2(в)}$ и $C_{O2(р)}$ – соответственно экспериментальные и расчетные значения остаточной концентрации кислорода в воде на выходе струйного отсека; сплошная линия – совпадение экспериментальных и расчетных данных; пунктирные линии – верхняя и нижняя границы 95 % - го доверительного интервала погрешности измерения; \circ – модель С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского; \diamond – модель ЦКТИ; \square – модель А.А. Захарова, Р.Г. Черной; Δ – критериальное уравнение ЦКТИ; \bullet – критериальное уравнение, полученное по результатам исследований

В ходе исследований получены новые критериальные уравнения, обеспечивающие расчет процессов нагрева воды и десорбции из неё кислорода в струйных отсеках деаэраторов при струйно-капельном гидродинамическом режиме их работы:

$$\lg\left(\frac{t_n - t_1}{t_n - t_2}\right) = 0,0137 \left(\frac{H}{d}\right)^{0,982} Lap^{0,163} \times \quad (1)$$

$$\times Fr^{-0,054} Pr^{-0,832} K^{-0,290}$$

$$\lg\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = 0,8910 \left(\frac{H}{d}\right)^{0,964} Lap^{0,264} \times \quad (2)$$

$$\times Sc^{-1} K^{-0,882}$$

$$Lap = \frac{\rho_{жс} W_n^2 d}{\sigma_{жс}}, \quad Fr = \frac{W_{жс}^2}{gd}, \quad Pr = \frac{v_{жс}}{a_{жс}},$$

$$K = \frac{r}{c_{жс}(t_2 - t_1)}, \quad Sc = \frac{v_{жс}}{D_{жс}},$$

$$W_n = \frac{W_n^{6x} - W_n^{6yx}}{2,3 \lg \frac{W_n^{6x}}{W_n^{6yx}}} \quad \text{при } W_n^{вх} / W_n^{вых} \geq 1,7,$$

$$W_n = \frac{W_n^{6x} + W_n^{6yx}}{2} \quad \text{при } W_n^{вх} / W_n^{вых} < 1,7,$$

$$W_n^{6x} = \frac{D_n^{6x} v_n^{6x}}{\Omega_{6x}}, \quad W_n^{6yx} = \frac{D_n^{6yx} v_n^{6yx}}{\Omega_{6yx}},$$

$$W_{жс} = \frac{4G_{жс}^{6x}}{\pi d^2 n \rho_{жс}^{6x}}, \quad L = 3W_{жс} \sqrt{\frac{\rho_{жс}^{6x} d^3}{\sigma_{жс}}},$$

где t_1 и t_2 , $^{\circ}\text{C}$ – температуры воды соответственно на входе и выходе струйного отсека; t_n , $^{\circ}\text{C}$ – температура насыщения пара в отсеке; C_1 и C_2 , мкг/дм^3 – массовые концентрации растворенного в воде кислорода соответственно на входе и выходе струйного отсека (проба при 25°C); Lap , Fr , Pr , K и Sc – критерии соответственно Лапласа, Фруда, Прандтля, Кутателадзе и Шмидта; H , м – высота отсека от нижней поверхности струеобразующей тарелки до борта нижней тарелки; d , м – диаметр отверстий струеобразующей тарелки; $\rho_{жс}$, кг/м^3 – средняя плотность воды в отсеке; $W_{жс}$, м/с – средняя скорость парового потока в отсеке; $\sigma_{жс}$, Н/м – средний коэффициент поверхностного натяжения воды; $W_{жс}$, м/с – средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки; g , м/с^2 – ускорение свободного падения; $v_{жс}$, $\text{м}^2/\text{с}$ – коэффициент кинематической вязкости воды; $a_{жс}$, $\text{м}^2/\text{с}$ – коэффициент температуропроводности воды; r , кДж/кг – скрытая теплота парообразования; $c_{жс}$, $\text{кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$ – истинная массовая изобарная теплоемкость воды; $D_{жс}$, $\text{м}^2/\text{с}$ – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде (экстраполяция в зону высоких температур выполнена по формуле Шейбеля [5]); $G_{жс}^{6x}$, кг/с – массовый расход воды на входе в отсек; n , шт. – количество отверстий струеобразующей тарелки; $W_n^{вх}$ и $W_n^{вых}$, м/с – скорости парового потока соответственно во входном и выходном сечениях отсека; $v_n^{вх}$ и $v_n^{вых}$, $\text{м}^3/\text{кг}$ – удельные объемы

пара соответственно во входном и выходном сечениях отсека; $\Omega_{\text{вх}}$ и $\Omega_{\text{вых}}$, м^2 – площади проходного сечения соответственно на входе и выходе пара из отсека, рассчитанные через высоту отсека H , за вычетом площади, занимаемой условными струями воды постоянного по высоте диаметра d ; L , м – средняя высота зоны сплошного струйного режима течения воды в отсеке.

В качестве определяющих параметров для расчета средних значений теплофизических характеристик воды использованы средние значения давления пара и температуры воды в отсеке. Границы применимости моделей (1) и (2): максимальная длина сплошной части струй L – 28 % от общей высоты струйного отсека H ; диаметр отверстий струеобразующей тарелки от 0,006 до 0,01 м ; высота струйного отсека H от нижней поверхности струеобразующей тарелки до борта нижней тарелки от 0,3 до 0,95 м ; среднее абсолютное давление пара в отсеке от 109 до 137 кПа ; средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки $W_{\text{ж}}$ от 0,2 до 3,0 м/с ; средняя скорость пара в отсеке $W_{\text{п}}$ от 0,8 до 48,2 м/с .

Среднеквадратическое отклонение, характеризующее точность моделей (1) и (2) (см. рис. 2), составило: для модели теплообмена по расчетной температуре воды на выходе из отсека $\pm 1,55$ $^{\circ}\text{C}$; для модели десорбции кислорода по расчетной массовой концентрации кислорода на выходе из отсека ± 181 мкг/дм^3 .

Для расчета процессов нагрева воды и десорбции из неё растворенного кислорода на барботажном листе при условии отсутствия провала воды получены расчетные зависимости в следующем виде:

$$\ln\left(\frac{t_n - t_1}{t_n - t_2}\right) = 0,975 \left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{жс}}}\right)^{-0,315} \frac{1}{Fr_0}; \quad (3)$$

$$\frac{C_2}{C_1} = 0,465 \left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{жс}}}\right)^{-0,324} \frac{1}{Fr_0}; \quad (4)$$

$$Fr_0 = \frac{G_n}{\rho_n F_0 \sqrt{gh_0}}; \quad h_0 = \frac{1}{2g} \left(\frac{4G_n v_{\text{жс}}}{\pi d^2 n \mu}\right)^2,$$

где ρ_n и $\rho_{\text{жс}}$, кг/м^3 – плотности соответственно пара и воды; t_1 , t_2 и t_n , $^{\circ}\text{C}$ – температуры соответственно воды на входе и выходе барботажного листа и насыщения при давлении пара под листом; C_2 и C_1 , мкг/дм^3 – массовые концентрации растворенного кислорода соответственно на выходе и входе барботажного листа; Fr_0 – критерий Фруда для барботажного листа; G_n , кг/с – массовый расход пара на входе в барботажный лист, F_0 , м^2 – полное сечение барботажного устройства, то есть площадь перфорированной части листа без вычета площади отверстий; h_0 , м – гидростатический уровень воды на листе; $G_{\text{в}}$, кг/с – расход деаэрируемой воды на входе в лист; $v_{\text{жс}}$, $\text{м}^3/\text{кг}$ – удельный объем воды; d , м – диаметр отверстий в листе; n , шт. – количество отверстий в листе, μ – коэффициент расхода (при диаметре отверстий от 5 до 8 мм и толщине листа от 4 до 6 мм может приниматься равным 0,75).

Среднеквадратическое отклонение, рассчитанное по остаточной дисперсии, для модели теплообмена (3) составило 0,54 $^{\circ}\text{C}$, для модели десорбции кислорода (4) – 38 мкг/дм^3 . Границы применимости моделей (3) и

(4): недогрев воды до температуры насыщения на входе в лист не более 8 $^{\circ}\text{C}$; диаметр отверстий барботажного листа 0,007 м ; абсолютное давление пара под барботажным листом от 114 до 150 кПа .

Объекты исследований оборудованы затопленным барботажным устройством деаэрационного бака, выполненным в виде одиночного перфорированного коллектора на дне деаэрационного бака вдоль его образующих. Коллектор наружным диаметром 300 мм длиной 8 м имеет 187 равномерно распределенных по длине и расположенных в два ряда отверстий диаметром 12 мм . Анализ результатов экспериментальных исследований (в ходе которых в дополнение к описанным выше измерениям контролировались щелочность по фенолфталеину и массовая концентрация диоксида углерода в пробах воды из нескольких точек деаэрационных баков) позволяет заключить следующее:

- степень десорбции растворенного кислорода, рассчитываемая как процентное отношение уменьшения массовой концентрации растворенного кислорода в деаэрационном баке к значению этой концентрации на входе в бак, практически независима от удельного расхода пара на барботаж при его значениях более 15 кг/т (килограмм на тонну деаэрированной воды) и составляет от 98 до 100 % (в пределе). При таких значениях удельного расхода пара на барботаж на степень десорбции кислорода не оказывают заметного влияния ни концентрация кислорода в воде на входе в деаэрационный бак, ни гидравлическая нагрузка деаэраатора, то есть время пребывания воды в деаэрационном баке, ни уровень воды в нём;

- степень разложения бикарбонатов, рассчитываемая как удвоенное отношение щелочности по фенолфталеину к щелочности общей деаэрированной воды, линейно возрастает с увеличением времени пребывания воды в деаэрационном баке и составляет около 58 % при времени пребывания 1 час. При этом степень разложения бикарбонатов зависима от удельного расхода пара на барботаж, минимально необходимое значение которого по условию эффективного удаления диоксида углерода, как и по условию эффективной десорбции растворенного кислорода, составляет 15 кг/т . При значениях удельного расхода пара на барботаж менее 15 кг/т эффективность деаэрации резко снижается. Можно полагать, что при значениях удельного расхода пара на барботаж 15 кг/т и более складываются наиболее благоприятные условия для перемешивания воды в деаэрационном баке, то есть для развития поверхности контакта фаз и уменьшения диффузионного сопротивления процессам десорбции газов;

- эффективность десорбции кислорода и диоксида углерода тем выше, чем больше длина барботажного коллектора;

- недогрев воды до температуры насыщения на входе в бак не оказывает заметного влияния на показатели эффективности деаэрации. Причина этого связана с размерами барботажного коллектора: даже при наличии недогрева воды порядка 9,0 $^{\circ}\text{C}$ (максимальное зафиксированное в опытах значение) часть водяного объема бака работает как смешивающий подогреватель, а оставшаяся часть – как дегазационное устройство.

Разработанные математические модели струйных отсеков и барботажных устройств позволяют создавать математические модели деаэраторов различных конструкций путем синтеза из моделей отдельных элементов, связанных между собой потоками теплоносителей в соответствии с конструктивной схемой аппарата. При таком способе разработки модели деаэратора в целом представляется перспективным использование подхода матричной формализации расчета теплообменных аппаратов со сложной конфигурацией потоков, предложенного в [6]. Сами по себе матричные модели характеризуются меньшей точностью в сравнении с моделями, основанными на теории подобия. Однако они существенно упрощают и унифицируют процесс синтеза модели системы из моделей её отдельных элементов, предоставляя исследователю возможность полной автоматизации этого процесса. В этом случае для создания модели деаэратора необходимо лишь определить перечень элементов деаэратора, назначив для каждого из них свой метод расчета (определяемого типом элемента – струйный отсек, непровальный барботажный лист, затопленное барботажное устройство, узел смешения или разделения потоков), и указать связи между элементами по потокам воды и пара. Такой подход к моделированию представляется наиболее приемлемым как при конструировании деаэраторов, так и при оптимизации режимов их работы.

В настоящее время с использованием полученных экспериментальных данных разрабатываются критериальные уравнения, обеспечивающие расчет реализуемых в деаэраторах процессов хемосорбции-десорбции диоксида углерода. При этом учитываются термически

зависимые процессы перехода бикарбонатов в свободный диоксид углерода, влияние на эти процессы химических свойств деаэрируемой воды, возможность присутствия в греющем паре значительных количеств свободной углекислоты. Основные проблемы, возникающие при решении этой задачи, связаны с отсутствием достоверных данных о константах скоростей реакций превращения бикарбонатов (гидрокарбонатов) с образованием свободного диоксида углерода при температурах атмосферной деаэрации.

Список литературы

1. **Оликер, И.И.** Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях / И.И. Оликер. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с. – 8000 экз.
2. **Оликер, И.И.** Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях / И.И. Оликер, В.А. Пермяков. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971. – 185 с. – 7000 экз.
3. **Шарапов, В.И.** Термические деаэратеры / В.И. Шарапов, Д.В. Цюра. – Ульянов. гос. техн. ун-т., 2003. – 560 с. – 200 экз.
4. **Аронсон, К.Э.** Теплообменники энергетических установок: учебник для вузов / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин, В.К. Купцов, И.Д. Ларионов, М.А. Ниреншрейн, П.Н. Плотников, А.Ю. Рябчиков ; под ред. проф., докт. техн. наук Ю.М. Бродова. – Екатеринбург : Изд-во «Сократ», 2002. – 968 с. – 500 экз.
5. **Рамм, В.М.** Абсорбция газов / В.М. Рамм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Химия», 1976 г. – 656 с.
6. **Жуков, В.П.** Системный анализ энергетических теплообменных установок / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин. – Иваново.: ГОУ ВПО «Ивановский гос. энергетич. ун-т», 2009. – 176 с. – 150 экз.