

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА ПРИ ПОПАДАНИИ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В ЗОНУ РАЗРЕЖЕНИЯ

© 2021 г. Г. В. Ледуховский^а, *, В. П. Жуков^а, Ю. Е. Барочкин^а, Е. В. Барочкин^а

^аИвановский государственный энергетический университет, Рабфаковская ул., д. 34, г. Иваново, 153003 Россия

*e-mail: lgv83@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.09.2020 г.

После доработки 06.10.2020 г.

Принята к публикации 21.10.2020 г.

Предложена математическая модель процесса десорбции растворенного кислорода из перегретой воды при ее попадании в зону разрежения. Исходная модель получена на основе термодинамического подхода в результате решения уравнений материального баланса по компонентам рассматриваемой системы “вода – водяной пар – газ” с учетом фазового перехода в жидкости. Развитие модели для учета неравновесности протекающих в системе процессов выполнено методами теории подобия процессов тепломассообмена и регрессионного анализа с привлечением экспериментальных данных по деаэрационным устройствам различных типов. По результатам статистического анализа альтернативных моделей, включая известную модель деаэрации воды при входе ее в вакуумные струйно-барботажные деаэраторы, обоснован выбор итоговой математической модели, позволяющей рассчитывать эффект деаэрации в рассматриваемых условиях в зависимости от начального перегрева воды относительно температуры насыщения в зоне разрежения, гидравлической нагрузки деаэрационного элемента и статического давления в нем. Выявлено, что полученное математическое описание с приемлемой точностью обобщает экспериментальную информацию по конструктивно различающимся деаэрационным элементам, работающим при вводе в них перегретой воды: капельным, центробежно-вихревым, кавитационно-струйным, вакуумно-кавитационным. Полученная модель может быть использована при проектировании новых и повышении эффективности работы существующих деаэрационных установок ТЭС и промышленных предприятий. В рамках исследования проведена апробация модели при решении задач режимной наладки кавитационно-струйного деаэратора, а также обоснования технических решений по реконструкции струйного деаэратора путем надстройки его деаэрационным устройством, работающим в режиме перегретой воды.

Ключевые слова: деаэрация, тепломассообмен, десорбция растворенного кислорода, математическое моделирование, деаэратор перегретой воды, фазовый переход в жидкости, температура насыщения

DOI: 10.1134/S0040363621050076

Технологии термической деаэрации воды широко применяются в энергетических установках для обеспечения противокоррозионной защиты оборудования и трубопроводов. За длительный период развития энергетической отрасли выработаны технические решения, которые являются в значительной степени типовыми, например:

применение двухступенчатых струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления для деаэрации питательной воды паровых котлов низкого и среднего давления или добавочной воды на ТЭЦ;

использование деаэраторов повышенного давления со струйными или насадочными колонками в деаэрационных установках питательной воды паровых котлов высокого, сверхвысокого и сверхкритического давления;

применение горизонтальных или вертикальных вакуумных струйно-барботажных деаэраторов в схемах деаэрации подпиточной воды тепловых сетей [1].

Вместе с тем перечень мест в технологических системах энергообъектов, где деаэрация теплоносителя необходима или, по крайней мере, целесообразна, не ограничен перечисленными случаями. Так, деаэрация турбинного конденсата необходима в конденсационных установках паровых турбин, но при этом не во всех случаях обеспечивается с требуемой эффективностью благодаря собственно деаэрирующей способности конденсаторов [2]. Остается актуальной проблема обеспечения эффективности деаэрации охлаждающего дистиллята в замкнутых системах водяного охлаждения обмотки статоров турбогенераторов с

водородно-водяным охлаждением [3]. Во многих случаях не решены задачи защиты от коррозии трубопроводов возвратного конденсата от внешних паровых потребителей ТЭЦ [4]. Не проработаны на должном уровне вопросы деаэрации подпиточной воды тепловых сетей в водогрейных котельных при отсутствии источника пара [1]. Этот перечень можно продолжать и далее, но во всех перечисленных случаях можно выделить следующие общие ограничения, препятствующие решению рассматриваемой задачи путем применения термических деаэраторов классических конструкций: невозможность или нецелесообразность использования греющего пара, ограничения по массогабаритным характеристикам деаэрационного устройства.

Указанные ограничения обуславливают возможность применения в рассматриваемых случаях малогабаритных деаэрационных устройств, работающих за счет так называемого начального эффекта деаэрации [1, 5], т.е. при попадании в зону разрежения и при объемном вскипании воды, перегретой относительно температуры насыщения в этой зоне. Конструкций таких устройств к настоящему времени разработано довольно много: деаэраторы кавитационно-струйные (ДКС) [6, 7], центробежно-вихревые (ДЦВ) [8], вакуумно-кавитационные (ДВК) [9, 10], вихревые струйные (ДВС) [11], капельные (КД) [8] и др. В большинстве конструкций применены вихревое течение, закрутка потока воды или иные способы трансформации статического давления потока в динамическое. Опубликованные экспериментальные данные по таким устройствам [7–11] позволяют заключить, что их эффективность обычно на порядок меньше, чем у деаэраторов классических конструкций. Однако в случаях, когда применение эффективных деаэраторов невозможно, часто оказывается целесообразным использовать деаэрационные устройства со сравнительно низкой эффективностью. Это позволяет если не решить проблему полностью, то, по крайней мере, значимо улучшить условия работы конструктивных материалов.

В отношении перечисленных деаэрационных устройств, работающих за счет начального эффекта деаэрации, опубликованы, главным образом, лишь экспериментальные данные [7–13] либо узкоспециализированные математические модели, например модель И.И. Оликера для участка входа перегретой воды в вакуумный струйно-барботажный деаэратор [5]. Отсутствует математическое описание процесса десорбции растворенных в воде газов, что является основным фактором, сдерживающим развитие таких технологий деаэрации, поскольку без адекватной математической модели затруднены проектирование деаэрационных устройств и оценка эффективности их применения в конкретных технологических системах энергетических установок.

Цель настоящего исследования – разработка математической модели процесса десорбции растворенного кислорода при попадании перегретой воды в зону разрежения.

ИСХОДНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЕЕ ПРИМЕНИМОСТИ

Исходная математическая модель разработана на основе термодинамического подхода при описании процесса фазового перехода в перегретой жидкости. Авторы настоящей статьи полагают, что при вскипании воды пузырьки пара “захватывают” молекулы растворенного кислорода, массовая доля которого пропорциональна мольной доле пара в смеси:

$$\frac{C_{пx}}{C(1-x)} = \frac{V_{п}}{V_{ж}} = \frac{\rho_{п}}{1-x} = \frac{x\rho_{ж}}{(1-x)\rho_{п}}; \quad x = \frac{c_p \Delta t}{r}, \quad (1)$$

где $C_{п}$, C – массовая концентрация растворенного кислорода в паре и воде на выходе из ступени деаэрации, мкг/дм^3 ; $V_{п}$, $V_{ж}$ – объем, занимаемый паром и водой, м^3 ; x – массовое паросодержание; $\rho_{ж}$, $\rho_{п}$ – плотность воды и сухого насыщенного пара, кг/м^3 , при давлении в ступени $p_{д}$ (значения $\rho_{ж}$ и c_p соответствуют средней температуре воды в ступени $t_{ср}$); c_p – удельная теплоемкость воды, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; Δt – уменьшение температуры воды в ступени, $^{\circ}\text{C}$; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг (значение r соответствует $p_{д}$).

Уравнение материального баланса для ступени деаэрации выглядит следующим образом:

$$C_0 = C_{пx} + C(1-x), \quad (2)$$

где C_0 – массовая концентрация растворенного кислорода в воде на входе в ступень, мкг/дм^3 .

С учетом (1), (2) получается соотношение

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{\frac{c_p \Delta t}{r} \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{п}} - 1 \right) + 1} \quad (3)$$

или при переходе к критериальной форме

$$\zeta = 1 - \frac{C}{C_0} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{Ar}{Ku}}; \quad Ar = \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{п}} - 1 \right); \quad (4)$$

$$Ku = \frac{1}{x} = \frac{r}{c_p \Delta t},$$

где ζ – эффект деаэрации [1, 5]; Ar , Ku – критерии Архимеда и Кутателадзе.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные по деаэраторам ДЦВ, КД, ДКС, ДВК (данные пересчитаны к точке выхода воды из вакуумно-кавитационной ступени деаэрации, поэтому

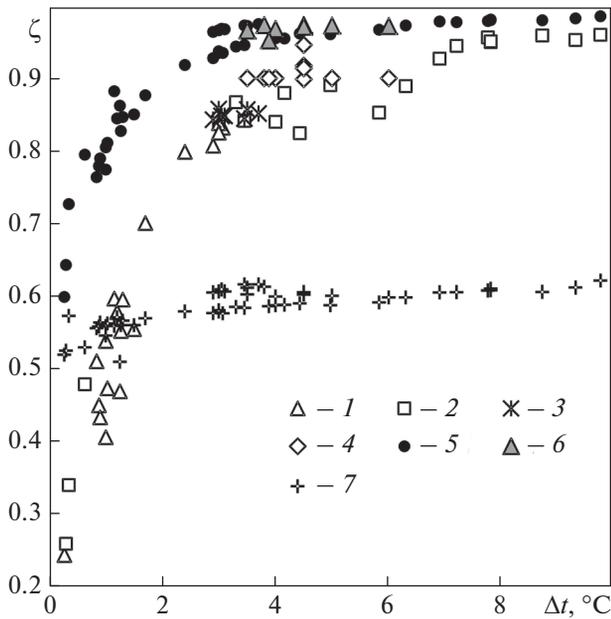


Рис. 1. Оценка применимости модели (4). Экспериментальные данные по деаэраторам ДЦВ (1), КД (2) [12], ДКС (3) [13], ДВК (4) [9, 10]; результаты расчетов по модели (4) при условиях опытов для деаэраторов ДЦВ, КД и ДКС (5), ДВК (6); результаты расчетов для условий опытов по модели И.И. Оликера для вакуумных деаэраторов классической конструкции (7) [5]

показаны отдельно), а также результаты расчетов по (4) для соответствующих условий проведения экспериментов. Для сравнения представлены также результаты расчетов по модели И.И. Оликера для начального участка вакуумных деаэраторов классической конструкции [5]. Данные, приведенные на рис. 1, позволяют заключить следующее:

условия протекания процесса деаэрации в рассматриваемых деаэрационных устройствах существенно отличаются от условий во входном участке вакуумных деаэраторов классических конструкций, поэтому известная модель И.И. Оликера в данном случае не применима;

модель (4) качественно верно описывает экспериментальные данные, однако дает завышенную оценку эффекта деаэрации. Это, по-видимому, объясняется тем, что модель (4) базируется на термодинамическом подходе и поэтому не учитывает время пребывания воды в аппарате. Полученная в расчете по (4) заниженная концентрация растворенного в воде кислорода (завышенный расчетный эффект деаэрации) соответствует асимптотическому по времени состоянию и не учитывает неравновесность процессов.

РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для учета неравновесности протекающих процессов проведено уточнение модели (4). Было рас-

смотрено несколько вариантов, в том числе моделирование с использованием классической теории подобия процессов тепломассообмена [14, 15]. В результате наилучшие показатели адекватности и точности были выявлены для модели, полученной из (4) путем введения дополнительного параметра идентификации *b*, учитывающего факторы, влияющие на неравновесность процесса деаэрации:

$$\zeta = 1 - \frac{1}{1 + b \frac{\Delta t}{Ku}} \quad (5)$$

На основе экспериментальных данных с помощью метода множественной линейной регрессии [16] была установлена связь параметра *b* с факторами, в существенной мере определяющими неравновесность процесса деаэрации в рассматриваемых условиях:

$$b = 0.37 - 0.18\bar{G} + 0.007\Delta t_{\text{вх}}; \quad \bar{G} = \frac{G}{G_{\text{н}}} \quad (6)$$

$$\Delta t_{\text{вх}} = t_{\text{вх}} - t_{\text{с}}$$

где \bar{G} – относительная гидравлическая нагрузка деаэрационного устройства; *G*, *G_н* – текущая и номинальная гидравлическая нагрузка деаэрационного устройства, кг/с; $\Delta t_{\text{вх}}$ – начальный перегрев воды перед деаэрационным устройством, °С; *t_{вх}* – температура воды на входе в устройство, °С; *t_с* – температура насыщения, °С, при давлении *p_д*.

На рис. 2 приведены результаты использования модели (5), (6) для рассмотренных выше экспериментальных условий по деаэраторам ДЦВ, КД, ДКС и ДВК, на рис. 3 – корреляционная диаграмма, демонстрирующая соотношение между экспериментальными и расчетными данными. Значимость факторов, включенных в модель (5), (6), доказана по критерию Стьюдента и частным критериям Фишера. Значения показателей точности и статистической значимости полученного математического описания приведены далее:

Множественное корреляционное отношение с учетом поправки на число степеней свободы	0.994
Критерий Стьюдента при анализе значимости множественного корреляционного отношения	525.3
Критическое значение критерия Стьюдента	2.0
Критерий Фишера при анализе адекватности модели	81.6
Критическое значение критерия Фишера	1.7
Среднеквадратичное отклонение расчетных значений от экспериментальных, %	11.6

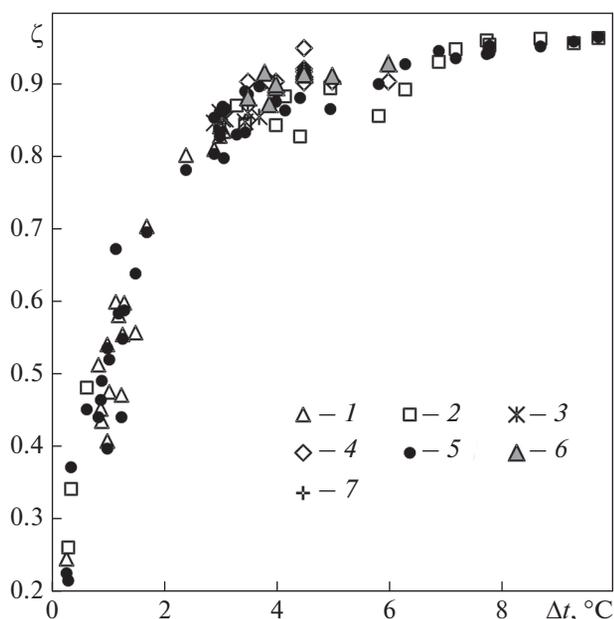


Рис. 2. Оценка применимости модели (5), (6). 5 – результаты расчетов по модели (5), (6) при условиях опытов для деаэраторов ДЦВ, КД и ДКС; 6 – то же, для деаэратора ДВК; остальные обозначения см. рис. 1

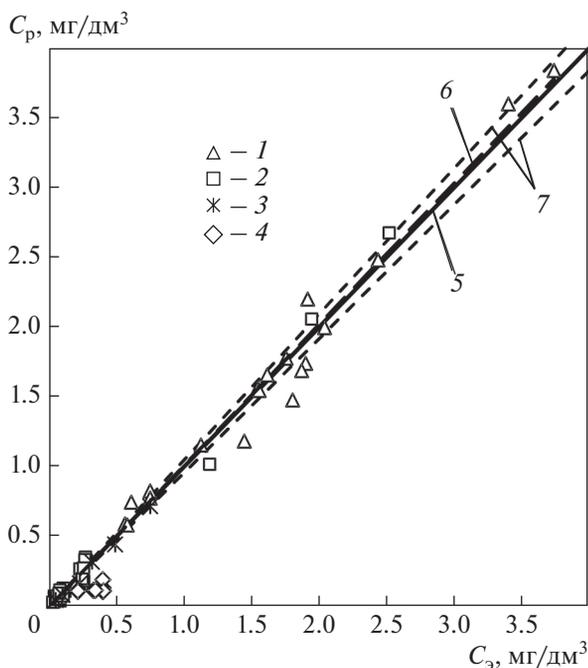


Рис. 3. Корреляционная диаграмма для модели (5), (6). $C_э$, C_p – экспериментальная и расчетная концентрация растворенного в воде кислорода на выходе из деаэрационного устройства; 5 – совпадение расчетных и экспериментальных значений; 6 – линейная аппроксимация результатов расчета; 7 – границы доверительного интервала, обусловленные нормируемой неопределенностью (погрешностью) амперметрического метода измерения массовой концентрации растворенного в воде кислорода; остальные обозначения см. рис. 1

Разработанная математическая модель имеет следующие границы применимости: $\Delta t_{вх} = 0.3–9.7^\circ\text{C}$, $p_d = 0.026–0.088$ МПа, $\bar{G} = 0.3–1.0$, $C_0 = 330–6405$ мкг/дм³.

АПРОБАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Разработанное математическое описание было использовано при решении нескольких практических задач. Далее рассмотрены два примера: разработка рабочих характеристик деаэратора ДКС при его режимной наладке и оценка эффективности реконструкции струйного деаэратора путем надстройки его деаэрационным устройством, работающим в режиме перегретой воды.

Пример 1. Рассматривается деаэратор ДКС номинальной производительностью по воде 20 т/ч (рис. 4). Отсос выпара производится эжектором, при этом давление на начальном участке тракта отсоса выпара (со стороны эжектора) равно 11.3 кПа. Эксплуатационные диапазоны изменения параметров составляют: $\bar{G} = 0.1–1.2$; $t_{вх} = 50–90^\circ\text{C}$. Задача состоит в расчете рабочих характеристик установки. В графическом виде требуется построить зависимости значений основных параметров деаэратора от \bar{G} и $t_{вх}$.

Для решения задачи были проведены варианты расчетов с применением разработанной математической модели (5), (6), а также известных методов расчета гидродинамических характеристик каналов для определения потерь давления в тракте отсоса выпара от деаэратора до эжектора. На рис. 5 показаны примеры полученных рабочих характеристик установки. Они позволяют устанавливать технологически целесообразные значения регулируемых параметров для достижения удовлетворительной эффективности деаэрации воды. Видно, что теоретически в ДКС можно добиться эффекта деаэрации на уровне 0.985 и более. Однако при этом необходимо учитывать, что в реальных условиях при малой гидравлической нагрузке деаэратора возникает вероятность его “захлебывания” – попадания воды в трубопровод выпара из-за недостаточной энергии потока воды для поддержания вихревого течения по всей длине активной зоны деаэратора (между элементами 2 и 3, см. рис. 4). Поэтому допускать уменьшение гидравлической нагрузки менее 50–60% номинальной не рекомендуется.

Пример 2. Рассматривается деаэратор атмосферного давления типа ДСА номинальной производительностью 100 т/ч, состоящий из деаэрационного бака без барботажных устройств и установленной на нем деаэрационной колонки устаревшей конструкции, включающей в себя только два струйных отсека. Эксплуатационная эффективность деаэратора не соответствует требованиям, предъявля-

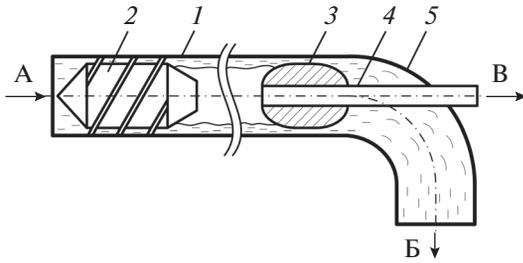


Рис. 4. Конструктивная схема деаэратора ДКС. 1 – цилиндрический корпус; 2 – завихритель с винтовой навивкой; 3 – обтекатель (стабилизатор); 4, 5 – патрубок отвода пара и деаэрированной воды; А, Б – вход и выход воды; В – отвод пара к эжектору

емым к качеству деаэрированной воды по концентрации растворенного кислорода. Задача состоит в разработке вариантов реконструкции деаэратора в условиях, когда использование барботажа в деаэрационном баке нецелесообразно из-за необходимости увеличения давления греющего пара. Для рассматриваемого объекта это повлечет за собой повышение давления в камере теплофикационного отбора турбины типа ПТ и соответствующее ухудшение показателей экономичности по выработке электроэнергии. Установка барботажного листа в деаэрационной колонке невозможна без увеличения ее высоты, поэтому такой вариант также в данном случае не обсуждается.

В качестве возможного варианта решения задачи рассматривается надстройка существующего деаэратора дополнительным деаэрационным устройством ДКС, устанавливаемым на линии рециркуляции деаэрированной воды после деаэратора струйного атмосферного (ДСА) (после насосов деаэрированной воды). При этом вода отводится после ДКС в водоприемный колодец верхней струеобразующей тарелки деаэрационной колонки деаэратора ДСА, в котором смешивается с основным потоком – водой, направляемой на деаэрацию. Отсос пара ДКС осуществляется эжектором. Пар деаэратора ДСА утилизируется по традиционной для атмосферных деаэраторов схеме – через охладитель пара. При такой схеме, меняя степень рециркуляции воды K через ДКС (отношение расхода воды через ДКС к расходу деаэрированной воды потребителям), удается изменять среднюю массовую концентрацию растворенного кислорода в воде перед верхним струйным отсеком. Это позволяет изменять массовую концентрацию растворенного кислорода в воде на выходе из ДСА, которая, за вычетом расхода воды на рециркуляцию в ДКС, направляется потребителям.

При расчетном анализе получившейся комбинированной деаэрационной установки моделирование деаэратора ДКС осуществляли по (5), (6)

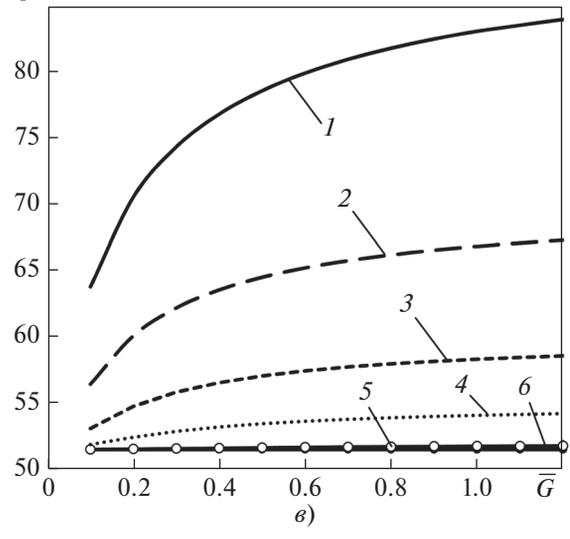
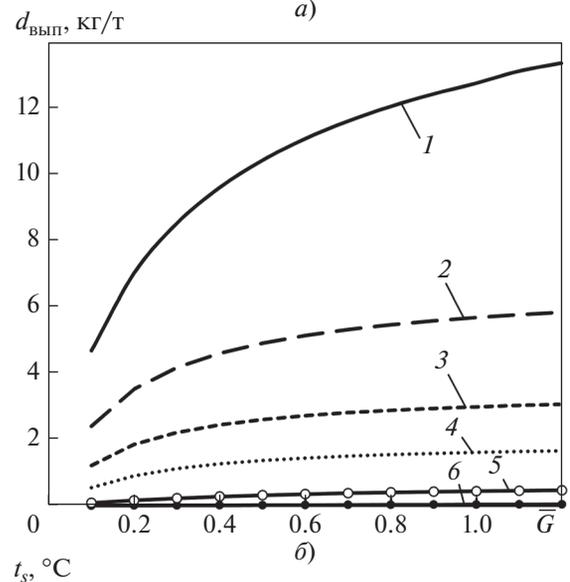
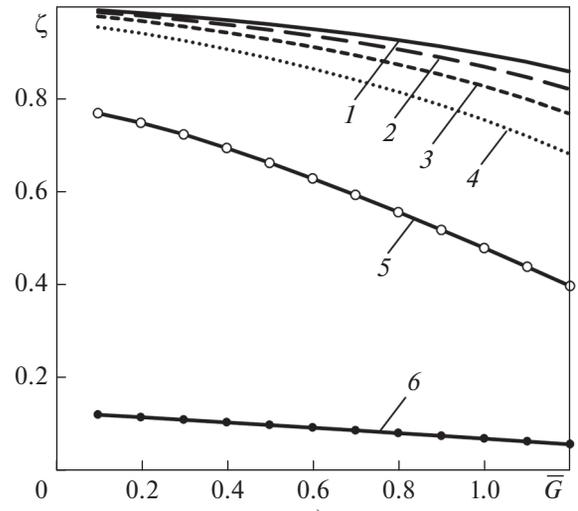


Рис. 5. Рабочие характеристики деаэратора ДКС. $d_{\text{вып}}$ – удельный расход пара (отношение массы пара к массе деаэрированной воды); $t_{\text{вх}}$, °С: 1 – 90; 2 – 70; 3 – 60; 4 – 55; 5 – 52; 6 – 50

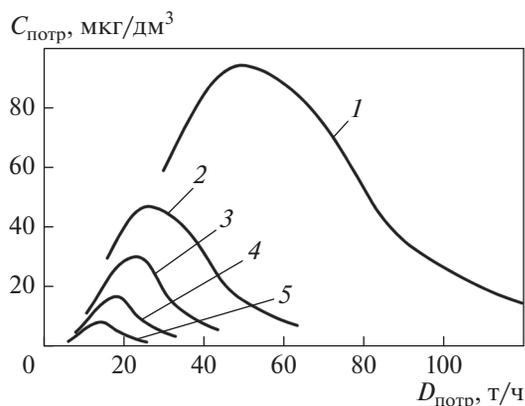


Рис. 6. Основная режимная характеристика комбинированной деаэрационной установки при температуре исходной воды 20°C.
K: 1 – 0; 2 – 1.0; 3 – 2.0; 4 – 3.0; 5 – 4.14 (max)

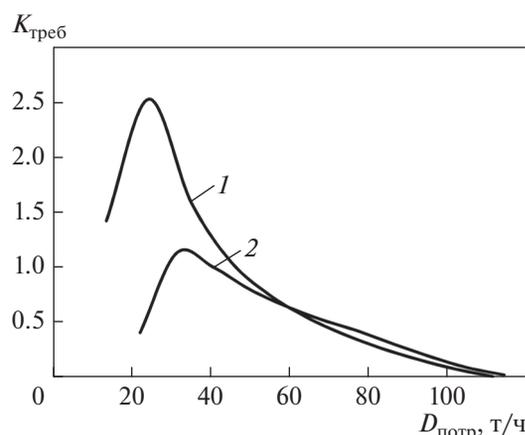


Рис. 7. Зависимость требуемой для обеспечения нормативной концентрации растворенного в деаэрированной воде кислорода (20 мкг/дм³) кратности циркуляции от расхода воды потребителям.
 $t_{исх}$, °C: 1 – 20; 2 – 70

и с применением известных методов расчета гидравлического сопротивления тракта отсоса пара от ДКС до эжектора, а моделирование ДСА – с применением ранее разработанной авторами модели [17, 18]. При этом учитывали, что максимальный расход воды через ДКС (т.е. максимальная кратность рециркуляции K_{max}) соответствует максимально допустимой температуре воды на верхней струеобразующей тарелке 94°C, получаемой после смешения потоков воды от ДКС, и воды, направляемой на деаэрацию через подогреватели химически очищенной воды.

На рис. 6 приведен пример основной режимной характеристики комбинированной деаэрационной установки при температуре воды, подаваемой на деаэрацию, $t_{исх} = 20^\circ\text{C}$ (режим с отклю-

ченным подогревателем химически очищенной воды). Видно, что при соответствующей кратности рециркуляции воды через деаэратор возможно обеспечить нормативную концентрацию кислорода в деаэрированной воде, направляемой потребителям, $C_{потр} = 20$ мкг/дм³ практически при всех ее расходах $D_{потр}$.

На рис. 7 приведены значения требуемой кратности рециркуляции $K_{треб}$, вычисленные при $C_{потр} = 20$ мкг/дм³, в эксплуатационном диапазоне температуры исходной воды $t_{исх}$ (минимальная температура 20°C соответствует режиму с отключенными подогревателями химически очищенной воды, максимальная 70°C – номинальному режиму работы подогревателей химически очищенной воды). Эта зависимость может быть использована для изменения K в процессе эксплуатации средствами системы автоматического регулирования.

ВЫВОДЫ

1. Разработано замкнутое математическое описание процесса десорбции растворенного кислорода в различающихся по конструкции деаэрационных устройствах, работающих за счет вскипания перегретой воды, поступающей в зону разрежения. Полученная математическая модель характеризуется показателями точности, приемлемыми для решения практических задач повышения эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах и установках.

2. Эффективность разработанной математической модели доказана при решении задач режимной наладки и оценки эффективности реконструкции деаэрационных установок. При этом выявлено, что, несмотря на относительно низкую эффективность деаэрационных устройств рассматриваемых типов как самостоятельных деаэраторов, они могут применяться в технологических системах энергоустановок при отсутствии возможности использования высокоэффективных деаэраторов классических конструкций, а также как ступени деаэрации в комбинированных деаэрационных установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы. Ульяновск: Ульян. гос. техн. ун-т, 2003.
2. **Шемпелев А.Г., Иглин П.В.** Причины повышенного содержания кислорода в конденсате паротурбинных установок // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 4. С. 61–64.
3. **Деаэрация** воды в системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенератора с водородно-водяным охлаждением / Г.В. Ледуховский, Ю.Е. Барочкин, В.П. Жуков, В.Н. Виноградов, И.А. Шатова // Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 89–95. <https://doi.org/10.1134/S0040363618100041>

4. **Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В.** Водоподготовка, водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: справ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. **Олиker И.И., Пермьяков В.А.** Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. Л.: Энергия, 1971.
6. **Пат. № 2246446 РФ.** Деаэратор “АВАКС” / З.М. Аджиев. Заявка № 2001126955/15 от 08.10.2001. Оpubл. 20.02.2005 // Б.И. 2005. № 5.
7. **Шарапов В.И., Макарова В.Е.** О прямоточных вакуумных деаэраторах // Энергосбережение и водоподготовка. 2006. № 3. С. 42–44.
8. **Зимин Б.А.** Проблемы деаэрации воды в энергетике и способ их решения // Новости теплоснабжения. 2006. Вып. 1. С. 40–44.
9. **Исследование** режимов работы вакуумно-кавитационных деаэраторов Самарской ГРЭС / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Н.В. Борисова, Г.И. Шамшурина // Электрические станции. 2011. № 2. С. 38–42.
10. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Вакуумно-кавитационный деаэратор Самарской ГРЭС // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2014. № 3 (16). С. 96–102.
11. **Абиев Р.Ш., Васильев М.П., Доильницын В.А.** Исследование процесса вакуумной дегазации воды в вихревом струйном аппарате // Изв. СПбГТИ (ТУ). 2015. № 28 (54). С. 64–69.
12. **Эмпирическое** обеспечение математической модели деаэрации воды в центробежно-вихревых деаэраторах / Г.В. Ледуховский, А.Н. Росляков, В.Н. Виноградов, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 5. С. 5–10. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.5.005-010>
13. **Повышение** эффективности технологических систем ТЭС с применением кавитационных деаэрационных устройств / Г.В. Ледуховский, Ю.Е. Барочкин, В.Н. Виноградов, А.Е. Барочкин // Вестник ИГЭУ. 2018. Вып. 1. С. 5–13. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2018.1.005-013>
14. **Кутателадзе С.С.** Теплопередача при конденсации и кипении. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машгиз, 1952.
15. **Physical Hydrodynamics** / E. Guyon, J.-P. Hulin, L. Petit, C.D. Mitescu. Oxford: Oxford University Press, 2015.
16. **Heinhold I.** Ingenieur statistic. München; Wien: Springer Verlag, 1964.
17. **Ледуховский Г.В., Жуков В.П., Барочкин Ю.Е.** Моделирование процессов термической деаэрации воды на основе матричной формализации расчета теплообменных установок // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 81–88. <https://doi.org/10.1134/S0040363619040052>
18. **Обобщенный** метод расчета многоступенчатых деаэраторов / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, А.А. Борисов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2004. Т. 47. № 9. С. 100–103.

Modeling the Dissolved Oxygen Desorption when Superheated Water Enters the Rarefaction Zone

G. V. Ledukhovskiy^{a,*}, V. P. Zhukov^a, Yu. E. Barochkin^a, and E. V. Barochkin^a

^a*Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003 Russia*

^{*}*e-mail: lgv83@yandex.ru*

Abstract—A mathematical model describing the desorption of dissolved oxygen from superheated water when it enters the rarefaction zone is proposed. The initial model was obtained proceeding from a thermodynamic approach as a result of solving the material balance equations for the components of the considered “water–water vapor–gas” system taking into account the phase transition in the liquid. Further development of the model for taking into account the nonequilibrium nature of the processes occurring in the system was carried out using the methods of the heat and mass transfer processes similarity theory and regression analysis involving experimental data on various types of deaeration devices. Based on the results from a statistical analysis of alternative models, including the well-known model describing the deaeration of water when it enters into vacuum jet-bubbling deaerators, the choice of the final mathematical model is substantiated. Using this makes it possible to calculate the deaeration effect under the considered conditions depending on the initial water superheating with respect to the saturation temperature in the rarefaction zone, the deaeration element hydraulic load, and static pressure in it. It has been found that the obtained mathematical description is able to generalize, with acceptable accuracy, the experimental information on structurally different deaeration elements operating when superheated water is injected into them: droplet, centrifugal-vortex, cavitation-jet, and vacuum-cavitation ones. The obtained model can be used in designing new and improving the performance efficiency of existing deaeration plants at thermal power plants and industrial enterprises. As part of the study, the model was tested in solving problems concerned with operational adjustment of a cavitation-jet deaerator and for substantiating the technical solutions on upgrading the jet deaerator by topping it with a deaeration device operating under superheated water conditions.

Keywords: deaeration, heat and mass transfer, dissolved oxygen desorption, mathematical modeling, superheated water deaerator, phase transition in liquid, saturation temperature