

УДК 621.187.12

**МАССООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА ДЕАЭРАТОРОВ ТЭС
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ДЕСОРБИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ
ПРИРОДНОГО ГАЗА**

В.И. Шарапов, Е.В. Кудрявцева, О.В. Пазушкина
Ульяновский государственный технический университет
vlad-sharapov2008@yandex.ru

Резюме: Определены массообменные и гидродинамические характеристики работы деаэраторов тепловых электрических станций при использовании в качестве десорбирующего агента природного газа, подаваемого в топку котлов. Оценены теоретически необходимый и реальный удельные расходы природного газа для обеспечения нормативного качества деаэрации. Приведен расчет гидродинамических характеристик струйно-барботажного атмосферного деаэратора с непровальной дырчатой барботажной тарелкой при работе на природном газе. В результате расчета показана возможность использования серийно выпускаемых атмосферных деаэраторов для реализации новой технологии низкотемпературной деаэрации воды.

Ключевые слова: тепловые электростанции, деаэрация воды, природный газ, качество деаэрации, массообмен, гидродинамика.

**MASS TRANSFER AND HYDRODYNAMICS DEAERATORS THERMAL
POWER PLANTS WHEN USED AS A DESORBING AGENT NATURAL GAS**

V.I. Sharapov, E.V. Kudryavtseva, O.V. Pazushkina
Ulyanovsk state technical university, Ulyanovsk, Russia
vlad-sharapov2008@yandex.ru

Abstract: In this article identified the mass transfer and hydrodynamic characteristics of deaerators operation of thermal power plants when used as a desorbing agent of natural gas supplied to the boiler furnace. It was estimated theoretically required and real specific consumption of natural gas to ensure regulatory quality deaeration. The article presents the calculation of hydrodynamic characteristics of jet-bubbling atmospheric deaerator with undescended perforated plate when operating on natural gas. The calculation result shows the possibility of using commercially available atmospheric deaerators for the implementation of new technology of low-temperature deaeration of the water.

Keywords: thermal power plants, deaeration of the water, natural gas, quality of deaeration, mass transfer, hydrodynamics.

Надежная и экономичная эксплуатация оборудования тепловых электрических станций зависит от качества обработки воды. Для предприятий энергетики вода – основной теплоноситель, и потому к ее содержанию предъявляются очень высокие требования. Множество работ посвящено исследованию различных методов водоподготовки для теплоэнергетических предприятий [1 – 10].

Процесс водоподготовки состоит из нескольких этапов. Заключительным этапом обработки воды на ТЭС является деаэрация – удаление из воды растворенных в ней коррозионно-активных газов.

Технологии деаэрации воды существенно влияют на экономичность работы тепловых электростанций. Для повышения энергетически эффективной выработки электроэнергии на тепловом потреблении за счет отборов пара на подогрев потоков деаэрируемой и деаэрированной воды, деаэрацию воды следует проводить при минимально возможной температуре этих теплоносителей [11, 12].

В научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ создана серия решений по снижению потенциала теплоносителей, участвующих в термической деаэрации, что позволило существенно повысить энергетическую эффективность отечественных ТЭЦ [11 – 13].

Тем не менее, резервы повышения энергетической эффективности ТЭЦ с деаэрацией подпиточной воды систем теплоснабжения далеко не исчерпаны. В частности, одна из возможностей повышения тепловой экономичности связана с применением новых технологий низкотемпературной деаэрации подпиточной воды теплосети.

В работах [14–15] показана возможность существенного повышения энергетической эффективности теплофикационных турбоустановок ТЭЦ при реализации технологии [16] низкотемпературной деаэрации воды с использованием в качестве десорбирующего агента не содержащего в своем составе кислорода и диоксида углерода природного газа, подаваемого в топку котлов электростанции.

Для исследования технологической возможности применения технологии [16] низкотемпературной деаэрации воды необходимо оценить массообменную эффективность и гидродинамические условия работы деаэратора при использовании в качестве десорбирующей среды природного газа.

Оценим массообменную эффективность этого решения. В основу методики определения теоретически необходимого удельного расхода природного газа для удаления из воды растворенного кислорода $d_{\text{газа}}^{\min}$, кг/т, положено решение балансовых уравнений процессов массообмена и теплообмена при деаэрации при условии, что на выходе из деаэратора достигается равновесие между фазами [13]. С определенными допущениями можно принять, что наибольшая массообменная эффективность деаэратора достигается при обеспечении нормативного качества деаэрации с минимально возможными расходами десорбирующего агента и покидающего деаэратор выпара.

Уравнение материального баланса деаэрации можно записать в виде

$$G_{\text{и.в}} X_{\text{и.в}} + D_{\text{газа}} Y_{\text{газа}} = G_{\text{д.в}} X_{\text{д.в}} + D_{\text{вып}} Y_{\text{вып}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{и.в}}$ и $G_{\text{д.в}}$ – количество исходной и деаэрированной воды, кг/ч; $D_{\text{газа}}$ – расход природного газа, подаваемого в деаэратор, кг/ч; $D_{\text{вып}}$ – расход выпара деаэратора (смеси выделившихся из воды коррозионно-агрессивных газов и природного газа), кг/ч; $X_{\text{и.в}}$, $X_{\text{д.в}}$ – концентрации кислорода в воде на входе в деаэратор и на выходе из него; $Y_{\text{газа}}$, $Y_{\text{вып}}$ – содержание кислорода в природном газе на входе в деаэратор и в выпаре на выходе из деаэратора.

Расчетная схема деаэратора для определения теоретически необходимого расхода газа показана на рис. 1.

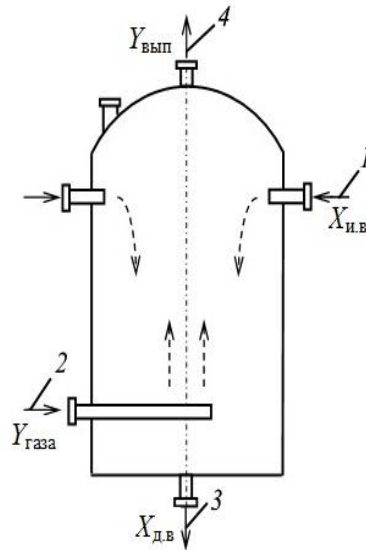


Рис. 1. Схема деаэрационной колонки противоточного типа:

1 – подвод исходной воды; 2 – подвод десорбирующего агента; 3 – отвод деаэрированной воды; 4 – отвод выпара деаэратора

Выразим $Y_{\text{газа}}$ и $Y_{\text{вып}}$ через концентрации газа в воде. Согласно закону Дальтона общее давление газовой или парогазовой смеси равно сумме парциальных давлений газов и паров, составляющих смесь. Из закона Генри следует, что концентрация газа, растворенного в воде, пропорциональна парциальному давлению этого газа над поверхностью воды.

Концентрация кислорода в газе на входе в деаэратор $Y_{\text{газа}}$ практически равна нулю. Концентрация кислорода в выпаре, покидающем деаэратор, зависит от схемы движения воды и пара в аппарате. При противоточном движении мольная доля O_2 в парогазовой смеси $Y_{\text{вып}}$ равна

$$Y_{\text{вып}} = K_{\Gamma}^{O_2} X_{\text{и.в}} / p, \quad (2)$$

где $K_{\Gamma}^{O_2}$ – коэффициент Генри (константа фазового равновесия для кислорода), Па; p – давление в деаэраторе, Па.

При противоточной схеме движения воды и природного газа в деаэраторе минимальное количество природного газа составит

$$D_{\text{газа}}^{\min} = G_{\text{и.в}} \frac{p}{K_{\Gamma}^{O_2}} \frac{X_{\text{и.в}} - X_{\text{д.в}}}{X_{\text{и.в}}}, \quad (3)$$

удельной величины

$$d_{\text{газа}}^{\min} = \frac{D_{\text{газа}}^{\min}}{G_{\text{и.в}}}. \quad (4)$$

Данные по расчету теоретически необходимого расхода природного газа для обеспечения нормативного остаточного содержания кислорода в деаэрированной воде показаны на рис. 2.

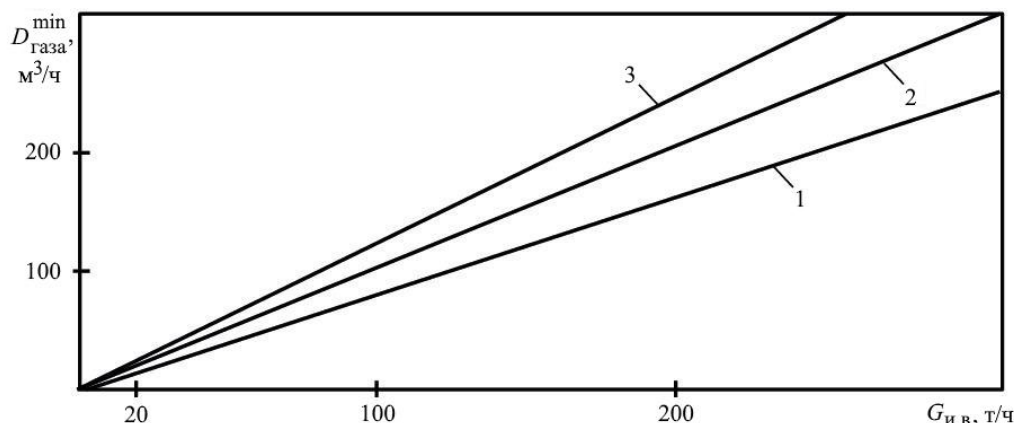


Рис. 2. Теоретически необходимый расход десорбирующего агента – природного газа при противоточном движении воды и газа в деаэраторе:

1 – при $X_{и.в.} = 8 \text{ мг/дм}^3$; 2 – при $X_{и.в.} = 10 \text{ мг/дм}^3$; 3 – при $X_{и.в.} = 12 \text{ мг/дм}^3$

В реальных условиях работы деаэратора необходимый удельный расход газа на деаэрацию следует принимать в 3–5 раз больше теоретически необходимого (по аналогии с термическими деаэраторами, работающими на водяном паре). Отметим, что обеспечение необходимого расхода природного газа для деаэрации воды на тепловых электростанциях не представляет каких-либо трудностей. Так, при деаэрации 800 т/ч подпиточной воды теплосети необходимый расход газа составит 2400–4000 м³/ч, в то время как на один паровой котел паропроизводительностью 500 т/ч требуется около 40000 м³/ч газа, т.е. на деаэрацию потребуется не более одной десятой доли расхода газа на котел.

Расчет гидродинамических характеристик низкотемпературной деаэрации воды при использовании в качестве десорбирующей среды природного газа произведен для серийно выпускаемого струйно-барботажного атмосферного деаэратора ДА-25 с непровальной дырчатой барботажной тарелкой, установленной в нижней части деаэрационной колонки. Выбор этого деаэратора в качестве примера для расчета обусловлен тем, что он имеет достаточно совершенную конструкцию, позволяющую обеспечить весьма высокое качество деаэрации при использовании в качестве рабочего агента водяного пара. Наши испытания этого деаэратора показали, что на нем можно добиться предельно низкой остаточной концентрации растворенного кислорода в деаэрированной воде – до 2–3 мкг/дм³.

Эффективная деаэрация может быть осуществима при следующих гидродинамических условиях работы деаэратора [17]:

1. Поддержание требуемых скоростей газа в отверстиях барботажного листа.
2. Наличие газовой подушки под барботажным листом, обеспечивающей непровальный режим работы листа.
3. Отсутствие брызгоуноса из колонки деаэратора.

Применение непровального принципа барботажного режима, в соответствии с которым вода на перфорированном листе непрерывно и многократно обрабатывается газом, подводимым под лист и проходящим через отверстия в нем, является наиболее эффективным при эксплуатации барботажных деаэраторов.

Под листом образуется газовый слой («подушка»), который предотвращает провал жидкости через отверстия листа. Гидродинамическая устойчивость непровального барботажного листа определяется скоростью прохождения газа через отверстия. Минимально необходимая скорость может быть определена по эмпирической формуле [18 – 20]

$$w_{\min} = \frac{20,6}{\sqrt{\rho_{\Gamma}}}, \quad (5)$$

где ρ_{Γ} – плотность газа под листом, кг/м³.

Высота газовой подушки под листом приближенно определяется по выражению

$$h = 2 \cdot 3 \sqrt{\frac{\sigma^2}{(g\rho_{\text{в}} - g\rho_{\Gamma})^2 d_o}} + \frac{\zeta w_o^2 \rho_{\Gamma}}{2g(\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})}, \quad (6)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения системы вода-газ, кг/м; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³; d_o – диаметр отверстий в перфорированном листе, м; w_o – скорость прохождения через отверстия листа, м/с; $\zeta = 1,9 \dots 2,6$ – коэффициент гидравлического сопротивления перфорированного листа.

Для оценки наличия или отсутствия брызгоуноса необходимо определение скорости газа в колонке деаэратора (рис. 3) [20, 21]. Устойчивый режим нисходящего потока существует при скоростях газа около 15–30 м/с, выше которых происходит брызгоунос [22].

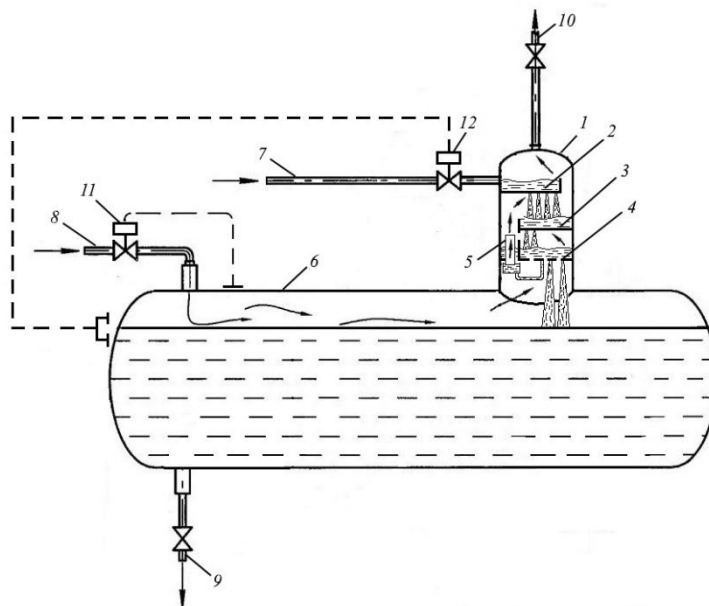


Рис. 3. Схема деаэрационной установки атмосферного давления типа ДА:

1 – деаэрационная колонка; 2 – верхняя тарелка; 3 – перепускная тарелка; 4 – барботажная тарелка; 5 – перепускное устройство; 6 – деаэрационный бак; 7 – подвод деаэрируемой воды; 8 – подвод природного газа; 9 – отвод деаэрированной воды; 10 – отвод газа в горелки котла; 11 – регулятор давления; 12 – регулятор уровня

Отметим, что в традиционных термических деаэраторах, использующих в качестве рабочей среды водяной пар, конденсирующийся в процессе деаэрации, скорости потока

пара в струйной части колонки невелики и опасность брызгоуноса практически отсутствует. В деаэраторах с использованием в качестве десорбирующего агента природного газа скорость газа и опасность брызгоуноса из деаэрационной колонки в газопровод перед котлом несколько выше, поскольку природный газ при деаэрации не конденсируется.

Скорость газа в колонке деаэратора определяется по формуле

$$w_{\text{колон}} = \frac{G_{\Gamma}}{S}, \quad (7)$$

где G_{Γ} – расход газа, м³/ч; S – площадь живого сечения, м².

В результате расчета по формулам (5)–(7) при удельном расходе газа 3–5 м³/т, т.е в 3–5 раз больше теоретически необходимого, были определены следующие гидродинамические характеристики деаэратора ДА-25:

1. Расчетная скорость газа в отверстиях барботажного листа $w_{\text{мин}}=57,58$ м/с.
2. Высота газовой подушки под барботажным листом $h=25,5$ см.
3. Скорость газа в колонке деаэратора $w_{\text{колон}}=0,13$ м/с, следовательно брызгоунос невозможен, как и в деаэраторах с использованием в качестве греющего агента водяного пара.

Таким образом, при эксплуатации струйно-барботажного атмосферного деаэратора на природном газе обеспечиваются требуемые гидродинамические условия работы струйной и барботажной ступеней деаэрационной колонки.

Выводы

1. Нормативная массообменная эффективность деаэраторов, на которых в качестве десорбирующей среды используется природный газ, подаваемый в горелки котлов тепловых электростанций, обеспечивается при относительно невысоком расходе газа на деаэрацию. Оценены теоретически необходимый и реальный удельный расходы природного газа на деаэрацию.
2. При эксплуатации струйно-барботажного деаэратора с использованием в качестве рабочей среды природного газа выполняются все необходимые гидродинамические условия работы струйной и барботажной ступеней деаэрации.
3. Для низкотемпературной деаэрации воды с использованием в качестве десорбирующей среды природного газа, подаваемого в горелки паровых или водогрейных котлов тепловых электростанций, могут быть использованы отечественные серийно выпускаемые струйно-барботажные деаэраторы атмосферного типа.

Литература

1. Пат. 145905 РФ. Водоподготовительная установка тепловой электроцентрали / Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Гирфанов А.А., Филимонов А.Г., Саитов С.Р.; заявл. 27.12.2013; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27.
2. Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Ляпин А.И., Филиппов И.Е. Анализ процессов в системе ТЭЦ - открытая тепловая сеть с использованием модели реактора вытеснения с рециркуляцией // Промышленная энергетика. 2014. № 11. С. 21–26.
3. Пат. 133122. Водоподготовительная установка тепловой электроцентрали / Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Власов С.М.; Заявл. 04.03.2013; Опубл. 10.10. 2013. Бюл. № 28.
4. Пат. 133526 РФ. Водоподготовительная установка тепловой электроцентрали./ Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Власов С.М.; Заявл. 03.07.2013; Опубл. 20.10.2013. Бюл. № 29.
5. Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Ляпин А.И., Матвеев Д.Ю. Разработка автоматизированной системы физико-химического контроля теплоносителя в системе ТЭС – закрытая тепловая сеть // Труды Академэнерго. 2010. № 2. С. 57–69.

6. Виноградов В.Н., Ледуховский Г.В., Шатова И.А. Особенности организации водно-химического режима тепловых сетей средствами химической обработки и деаэрации воды // Вестник ИГЭУ. 2006. №4. С. 19–23.
7. Барочкин А.Е., Виноградов В.Н., Коротков А.А., Ледуховский Г.В., Мошкарин А.В. Экспериментальные исследования и моделирование технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды // Теплоэнергетика. 2010. №8. С. 21–25.
8. Kittredge A.E. Evaluate Your Deaerator Performance// Power.1958. № 4 P. 88-90, 204-212.
9. Kingsbury A.W., Pfillips E.L. Vacuum Deaerator Design // Transaction of ASME, series A. 1961. Vol. 83. № 4. P. 3-12.
10. Upmalis A. Die Thermische Entgasung von Kesselspeisewasser in Warmekraftwerken// Wärme. 1974/ № 3. S. 41-45.
11. Шарапов В.И. Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов. М.: Энергоатомиздат, 1996. 176 с.
12. Шарапов В.И. Справочно-информационные материалы по применению вакуумных деаэраторов для обработки подпиточной воды систем централизованного теплоснабжения. М.: СПО ОРГРЭС, 1997. 20 с.
13. Шарапов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэратеры. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 560 с.
14. Sharapov V.I., Pazushkina O.V., Kudryavtseva E.V. Energy-Effective Method for Low-Temperature Deaeration of Make-up Water on the Heating Supply System of Heat Power Plants // Thermal Engineering. 2016. Vol. 63. No. 1. Pp. 56-60.
15. Sharapov V.I., Kudryavtseva E.V. Energy Efficiency of Low-Temperature Deaeration of Makeup Water for a District Heating System // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. No 2. Pp. 204-207.
16. Пат. 2537656 РФ. Способ работы тепловой электрической станции. / Шарапов В.И., Пазушкина О.В., Кудрявцева Е.В. заявл. 19.07.2013; опубл. 10.01.2015. Бюл № 1.
17. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
18. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976. 296 с.
19. Оликер И.И., Пермьяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. Л.: Энергия, 1971. 184 с.
20. Справочник по теплообменным аппаратам паротурбинных установок / Бродов Ю.М., Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю., Ниренштейн М.А., Под ред. Бродова Ю.М. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 480 с.
21. Водоподготовительное оборудование. Информационно-справочный каталог. Саратов: ОАО «Сарэнергомаш», 2007. 166 с.
22. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.

Авторы публикации

Шарапов Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). E-mail: vlad-sharapov2008@yandex.ru.

Кудрявцева Екатерина Валерьевна – аспирант кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). E-mail: kudr-e@mail.ru.

Пазушкина Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). E-mail: o.pazushkina@ulstu.ru.

References

1. Pat. № 145905 RF na poleznuyu model'. Vodopodgotovitel'naya ustanovka teplovoy elektrotsentrali / A.A. Chichirov, N.D. Chichirova, A.A. Girfanov, A.G. Filimonov. S.R. Saitov. Izobretenie. - 2014. - № 27.
2. Chichirov A.A., Chichirova N.D., Lyapin A.I., Filippov I.E. Analiz protsessov v sisteme TETs - otkrytaya teplovaya set' s ispol'zovaniem modeli reaktora vytesneniya s retsirkulyatsiey // Promyshlennaya energetika. - 2014. - № 11. - Pp. 21-26.
3. Pat. № 133122 RF na poleznuyu model'. Vodopodgotovitel'naya ustanovka teplovoy elektrotsentrali / N.D. Chichirova, A.A. Chichirov, S.M. Vlasov. Izobretenie. - 2013. - № 28.
4. Patent RF № 133526 ot 10.10.2013. Chichirova N.D., Chichirov A.A., Vlasov S.M. Vodopodgotovitel'naya ustanovka teplovoy elektrotsentrali.
5. Chichirova N.D., Chichirov A.A., Lyapin A.I., Matveev D.Yu. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy fiziko-khimicheskogo kontrolya teplonositelya v sisteme TES – zakrytaya teplovaya set' // Trudy Akademenergo. - 2010. - № 2. - Pp. 57-69.
6. Vinogradov V.N., Ledukhovskiy G.V., Shatova I.A. Osobennosti organizatsii vodno-khimicheskogo rezhima teplovykh setey sredstvami khimicheskoy obrabotki i deaeratsii vody // Vestnik IGEU. - 2006. - №4. - Pp. 19-23.
7. Barochkin A.E., Vinogradov V.N., Korotkov A.A., Ledukhovskiy G.V., Moshkarin A.V. Eksperimental'nye issledovaniya i modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov atmosferynoy struynobarbotazhnoy deaeratsii vody // Teploenergetika. - 2010. - №8. - Pp. 21-25.
8. Kittredge A.E. Evaluate Your Deaerator Performance// Power.1958. № 4 P. 88-90, 204-212.
9. Kingsbury A.W., Pfillips E.L. Vacuum Deaerator Design // Transaction of ASME, series A. 1961. Vol. 83. № 4. P. 3-12.
10. Upmalis A. Die Thermische Entgasung von Kesselspeisewasser in Warmekraftwerken// Wärme. 1974/ № 3. S. 41-45.
11. Sharapov V.I. Podgotovka podpitochnoy vody sistem teplosnabzheniya s primeneniem vakuumnykh deaeratorov. - M.: Energoatomizdat, 1996. - 176 p.
12. Sharapov V.I. Spravochno-informatsionnye materialy po primeneniyu vakuumnykh deaeratorov dlya obrabotki podpitochnoy vody sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya. M.: SPO ORGRES, 1997. - 20 p.
13. Sharapov V.I., Tsyura D.V. Termicheskie deaeratory. - Ul'yanovsk: UlGTU, 2003. - 560 p.
14. Sharapov V.I., Pazushkina O.V., Kudryavtseva E.V. Energy-Effective Method for Low-Temperature Deaeration of Make-up Water on the Heating Supply System of Heat Power Plants // Thermal Engineering. 2016. Vol. 63. No. 1. Pp. 56-60.
15. Sharapov V.I., Kudryavtseva E.V. Energy Efficiency of Low-Temperature Deaeration of Makeup Water for a District Heating System // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. No 2. Pp. 204-207.
16. Patent RF № 2537656 ot 10.01.2015. V.I. Sharapov, O.V. Pazushkina, E.V. Kudryavtseva. Sposob raboty teplovoy elektricheskoy stantsii.
17. Ramm V.M. Absorbtsiya gazov. - M.: Khimiya, 1976. - 656 p.
18. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem. - M.: Energiya, 1976. - 296 p.
19. Olikier I.I., Permyakov V.A. Termicheskaya deaeratsiya vody na teplovykh elektrostantsiyakh. - L.: Energiya, 1971. - 184 p.
20. Spravochnik po teploobmennym apparatam paroturbinnnykh ustanovok / Brodov Yu.M., Aronson K.E., Ryabchikov A.Yu., Nirenshteyn M.A., Pod red. Brodova Yu.M. - M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2008. - 480 p.
21. Vodopodgotovitel'noe oborudovanie. Informatsionno-spravochnyy katalog. Saratov: OAO «Sarenergomash», 2007. - 166 p.
22. Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. - M.: Khimiya, 1973. - 752 p.

Authors of the publication

Sharapov Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department «Heat-and-gas Service and Ventilation» Ulyanovsk state technical university (USTU). E-mail: vlad-sharapov2008@yandex.ru.

Kudryavtseva Ekaterina Valeryevna – Postgraduate of department «Heat-and-gas Service and Ventilation» Ulyanovsk state technical university (USTU). E-mail: kudr-e@mail.ru.

Pazushkina Olga Vladimirovna – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of department «Heat-and-gas Service and Ventilation» Ulyanovsk state technical university (USTU). E-mail: o.pazushkina@ulstu.ru.

Поступила в редакцию

24 января 2017 г.