

УДК 621.311.22

Исследование начального эффекта при десорбции растворенного кислорода в деаэраторах перегретой воды

Ю.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При быстром понижении давления в деаэраторе возможно мгновенное закипание воды с одновременным выходом из нее пара, сопровождающимся десорбцией растворенного в воде кислорода. В литературе это явление получило название начального эффекта деаэрации. Учет указанного эффекта при расчете десорбции выполняется, как правило, с использованием статистических зависимостей, полученных по результатам экспериментальных исследований. К недостаткам такого способа можно отнести применимость полученных результатов только для исследованных условий деаэрации. В связи с этим поиск теоретических подходов к учету влияния начального эффекта на процесс десорбции растворенного кислорода в деаэраторах перегретой воды является актуальным направлением исследований.

Методы и материалы: Для теоретического учета начального эффекта деаэрации используются термодинамические соотношения для описания процесса фазового перехода в перегретой жидкости, для проверки полученных соотношений использованы результаты экспериментальных исследований процесса деаэрации.

Результаты: Для описания начального эффекта при десорбции растворенного кислорода получена теоретическая зависимость, позволяющая оценить его остаточное содержание в деаэрированной воде. Показано качественное соответствие полученных результатов экспериментальным данным по центробежно-вихревому и капельному деаэрационным устройствам.

Выводы: На основе результатов расчетного анализа начального эффекта и сравнения их с экспериментальными результатами показано определяющее влияние данного эффекта на процесс десорбции растворенного кислорода в вакуумной деаэрационной установке, что дает возможность получения более точных решений задач по моделированию и совершенствованию конструкций и режимов работы данных установок.

Ключевые слова: термический деаэратор, вакуумная деаэрация, начальный эффект, перегретая жидкость, десорбция растворенного кислорода, центробежно-вихревой деаэратор, капельный деаэратор, математическая модель, фазовый переход, термодинамика.

Research into primary effect of dissolved oxygen desorption in superheated water deaerators

Y.E. Barochkin, V.P. Zhukov, G.V. Ledukhovsky, E.V. Barochkin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Abstract

Background: A rapid pressure decrease in a deaerator may result in instant boiling of water with simultaneous formation of steam. This process is accompanied by desorption of oxygen dissolved in water. In the literature, this phenomenon is called primary deaeration effect. This effect is usually taken into account when calculating desorption by statistical dependences obtained from experimental studies. The disadvantages of this method include the applicability of the obtained results only to the investigated deaeration conditions. Therefore, an attempt to find theoretical approaches to taking account of the primary effect influence on desorption of the dissolved oxygen in superheated water deaerators is an urgent research direction.

Methods and materials: Theoretical consideration of the primary effect of deaeration employs the thermodynamic relations to describe the process of phase transition in a superheated liquid, and the results of deaeration experimental studies to test the obtained relations.

Results: In order to describe the primary effect of dissolved oxygen desorption, the authors obtained a theoretical dependence that can estimate the oxygen residual content in deaerated water. It is also shown that there is a qualitative agreement between the obtained results and experimental data for the centrifugal-vortex and drip deaeration devices.

Conclusions: Based on the results of the primary effect calculation and their comparison with the experimental results, the authors show the decisive influence of this effect on the process of dissolved oxygen desorption in a vacuum deaerator, which enables obtaining more exact solutions while modeling and improving the structures and operating modes of these installations.

Key words: thermal deaerator, vacuum deaeration, primary effect, superheated liquid, desorption of dissolved oxygen, centrifugal-vortex deaerator, drip deaerator, mathematical model, phase transition, thermodynamics.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.005-010

Введение. Наряду с традиционными конструкциями деаэрационных установок [1–3], которые широко используются на тепловых электрических станциях и в котельных для предотвращения коррозии энергетического оборудования, в настоящее время все большую популярность приобретают малогабаритные деаэраторы перегретой воды (центробежно-вихревые деаэраторы (ДЦВ), кавитационно-струйные деаэраторы и др. [3,4]). В таких аппаратах, работающих под разрежением, при подаче в рабочее пространство воды, перегретой по отношению к температуре насыщения при соответствующем давлении, происходит мгновенное ее вскипание, которое сопровождается интенсивным парообразованием. В [1, 5, 6] процесс десорбции растворенных газов в этих условиях получил название начального эффекта деаэрации. Для количественного описания данного эффекта используются эмпирические зависимости, полученные путем обработки результатов экспериментальных исследований. Опубликованные экспериментальные данные [5], характеризующие величину начального эффекта для вакуумного деаэратора классической конструкции, свидетельствуют, что максимальное значение начального эффекта по растворенному кислороду оценивается в 80 %, а в большинстве случаев он составляет 40–60 %. Установлено, что значение начального эффекта для данной конструкции аппарата зависит от давления в деаэраторе и температуры воды перед ним. Экспериментальные исследования процессов деаэрации, несмотря на свои очевидные преимущества, связаны с существенными затратами времени и ресурсов. В связи с этим проведение теоретических исследований начального эффекта при деаэрации воды является актуальной задачей.

Целью исследования является разработка математического описания для оценки начального эффекта десорбции растворенного кислорода в деаэраторах перегретой воды для возможности получения на его основе более точных решений задач по моделированию и совершенствованию конструкций и режимов работы данных установок.

Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- разработка математического описания начального эффекта десорбции растворенного кислорода в деаэраторах перегретой воды;
- проверка адекватности предложенного математического описания посредством сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на центробежно-вихревой и капельной ступенях вакуумной деаэрационной установки;
- оценка вклада начального эффекта в общую эффективность вакуумной деаэрации.

Объектом исследования является вакуумная деаэрационная установка с центробежно-вихревой и капельной ступенями, в которую для дегазации подается перегретая вода. Предме-

том исследования является начальный эффект процесса десорбции растворенного кислорода в перегретой жидкости.

Методы исследования. Для решения поставленных задач будем использовать термодинамические соотношения для описания процесса фазового перехода в перегретой жидкости с проверкой полученной модели по результатам экспериментальных исследований.

Принципиальная схема деаэрационной установки на базе деаэраторов ДЦВ-200 приведена на рис. 1. Деаэрационная установка включает последовательно включенные центробежно-вихревую ступень (ДЦВ), в которую подается исходная вода (ИВ), и капельную ступень (КД), включающую два устройства А и Б, подключенных по воде параллельно. Деаэрируемая вода после капельной ступени попадает в аккумуляторный бак (АБ), откуда направляется потребителю деаэрированной воды (ДВ). Для создания необходимого вакуума имеются трубопроводы отсоса парогазовой смеси на эжектор (В). На представленной схеме также указаны точки установки измерительных приборов для определения давления (p), температуры (t), расхода (w) и массовой концентрации растворенного кислорода (c) в теплоносителях.

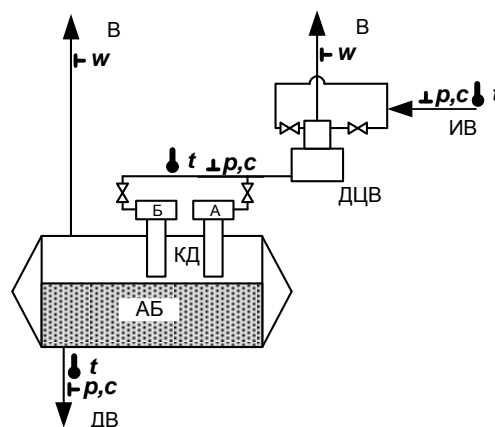


Рис. 1. Принципиальная схема объекта исследований

Конструкции собственно центробежно-вихревой и капельной ступеней деаэрации с указанием основных потоков деаэрируемой воды и пара представлены на рис. 2.

Экспериментальные данные получены в ходе серии специальных опытов на промышленной установке рассмотренной конструкции. Цель исследования состояла в получении новых экспериментальных данных о технологической эффективности элементов деаэрационной установки в зависимости от режимных параметров и проверке по полученным экспериментальным данным адекватности предложенного математического описания начального эффекта десорбции растворенного кислорода.

Для определения концентрации растворенного кислорода в воде по элементам схемы деаэрационная установка оборудована пробоот-

борными зондами. Все зонды, трубопроводы отбора и групповой охладитель проб были изготовлены из аустенитной нержавеющей стали. Точки контроля измеряемых в ходе проведения экспериментальных исследований теплотехнических параметров показаны на рис. 1. Массовая концентрация растворенного в воде кислорода измерялась амперометрическим методом.

Одним из направлений теоретических исследований процесса деаэрации в рассматриваемых условиях является использование термодинамического подхода для анализа состояния перегретой жидкости, который позволяет получить удобные для практического использования интегральные оценки эффективности процесса. В рамках термодинамического или феноменологического подхода [7, 8] процесс десорбции в ступени деаэратора рассматривается интегрально без детального учета механизма этого процесса. Для оценки начального эффекта предлагается рассматривать механизм захвата растворенного кислорода паровыми пузырьками при их мгновенном образовании за счет уменьшения давления.

Будем считать, что при парообразовании пузырьки пара «захватывают» число молекул (массовую долю) растворенного кислорода пропорционально мольной доле пара в смеси, которая соответствует объемной доле компонента в смеси [8, 9]. На основании уравнения материального газового баланса ступени

$$C_{20} = C_1x + C_2(1-x),$$

сделанного допущения по механизму десорбции

$$\frac{C_1x}{C_2(1-x)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{x/\rho_n}{(1-x)/\rho_v}$$

и формальных математических преобразований остаточное содержание растворенного кислорода в воде после ступени, работающей на начальном эффекте, определяется в виде

$$C_2 = \frac{C_{20}}{\frac{\Delta Tc}{r} \left(\frac{\rho_v}{\rho_n} - 1 \right) + 1} \quad (1)$$

или в критериальной форме

$$\frac{C_2}{C_{20}} = \frac{1}{\frac{Ar}{Ku} + 1}, \quad (2)$$

где C_1, C_{20}, C_2 – массовая концентрация растворенного кислорода в паре, воде на входе и на выходе ступени соответственно; V_1, V_2 – объемы, занимаемые паром и водой соответственно;

$x = \frac{\Delta Tc}{r}$ – доля пара; $Ar = \left(\frac{\rho_v}{\rho_n} - 1 \right)$ – критерий

Архимеда; $Ku = \frac{r}{\Delta Tc}$ – критерий Кутателадзе; ΔT

– охлаждение деаэрируемой воды в ступени; c, r – удельная теплоемкость воды и удельная теплота парообразования соответственно; ρ_v – плотность воды; ρ_n – плотность пара.

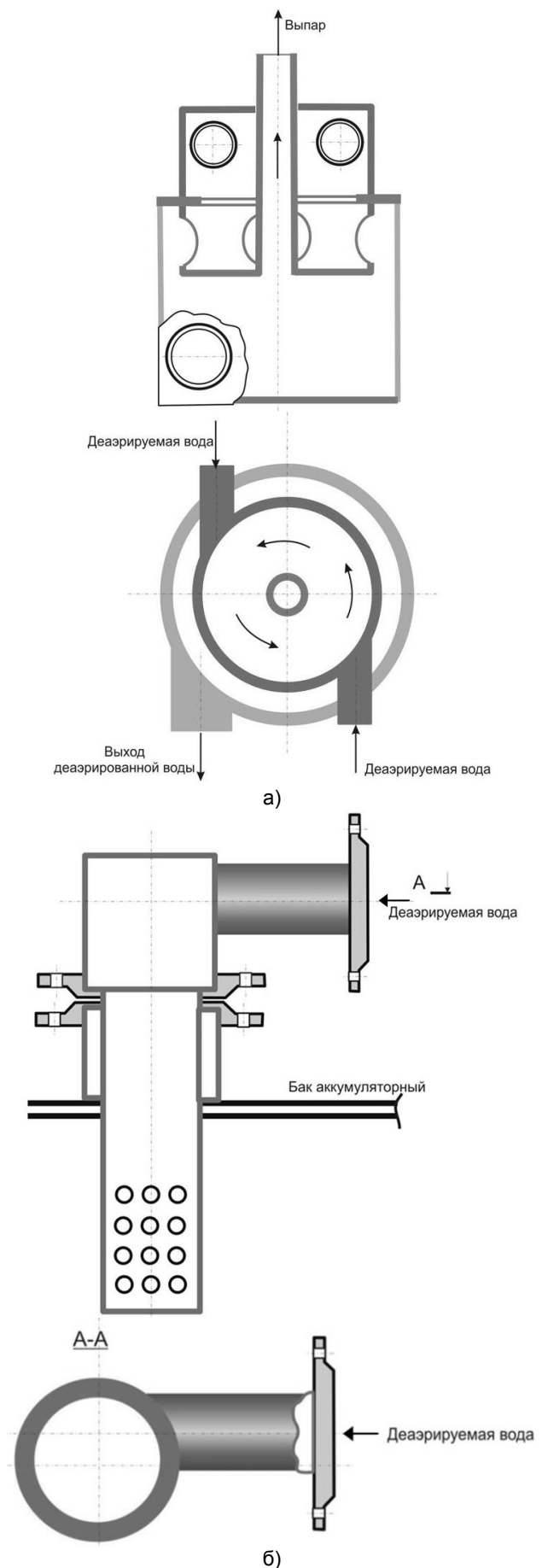


Рис. 2. Конструктивные схемы: а – центробежно-вихревого деаэратора; б – капельного

После введения новых переменных:

$$x = \frac{\Delta T c}{r} = \frac{1}{Ku}, \quad y = \frac{C_{20}}{C_2}, \quad k = \left(\frac{\rho_B}{\rho_n} - 1 \right) = Ar,$$

зависимость (1) может быть линеаризована и представлена в следующем виде:

$$y = 1 + k x. \quad (3)$$

Согласно выражению (1), десорбция растворенного кислорода за счет начального эффекта в деаэраторах перегретой воды определяется, главным образом, величиной охлаждения воды в деаэраторе ΔT , которая, в свою очередь, зависит от давления в аппарате и температуры воды перед ним. Это согласуется с опубликованными результатами исследований начального эффекта деаэрации применительно к вакуумным деаэраторам классической конструкции [5]. Для исследуемого центробежно-вихревого деаэратора, согласно опубликованным данным [3], величина охлаждения воды в деаэраторе ΔT варьируется в диапазоне от 3 до 10 градусов.

Результаты исследования. На рис. 3 представлены результаты расчетного анализа процесса десорбции растворенного кислорода за счет начального эффекта. На рис. 3,а показана расчетная зависимость остаточной концентрации растворенного кислорода в деаэрированной воде от перегрева подаваемой в деаэратор жидкости, рассчитанной согласно (1). На рис. 3,б приведен вид расчетной линеаризованной зависимости (3) в системе введенных координат x , y . Для проведения расчетного анализа приняты следующие исходные данные: теплоемкость воды $c = 4,216$ кДж/(кг·К); теплота парообразования $r = 2260$ кДж/кг; плотность пара $\rho_n = 0,5903$ кг/м³; плотность воды $\rho_B = 965$ кг/м³.

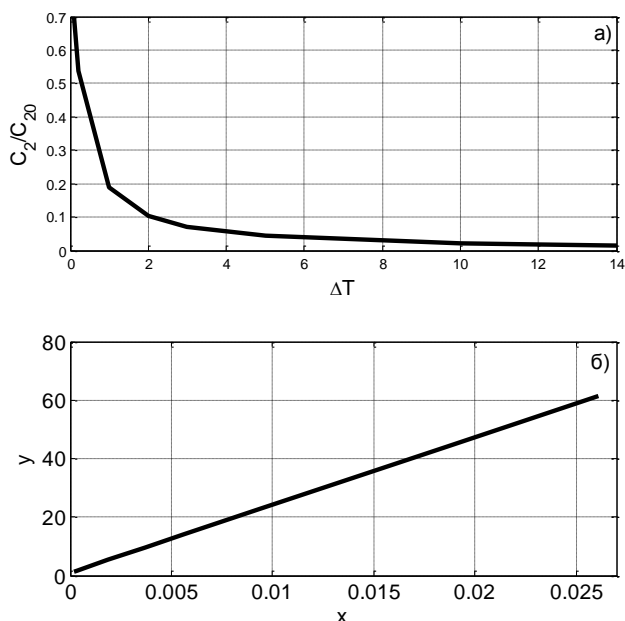


Рис. 3. Расчетная зависимость (1) остаточной концентрации растворенного кислорода в деаэрированной воде (а) и расчетная линеаризованная зависимость (3) в новых введенных координатах (б)

Для проверки адекватности полученных теоретических зависимостей выполнено их сопоставление с опытными данными. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4 совместно с результатами расчетов, полученных для аналогичных условий каждого опыта.

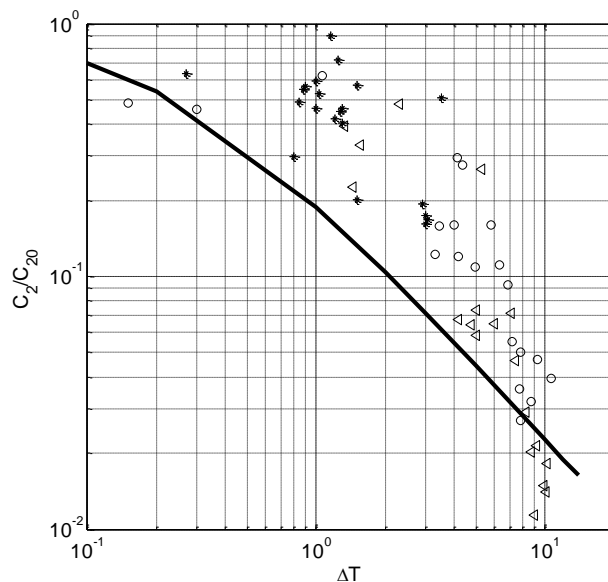


Рис. 4. Сопоставление результатов расчета (линия) и экспериментальных данных (точки) по десорбции растворенного кислорода в установке с ДЦВ: * – в центробежно-вихревой ступени; o – в капельной ступени; Δ – совместно в вихревой и капельной ступенях

Выводы. Приведенные результаты показывают, что начальный эффект обуславливает существенный вклад в общий процесс десорбции растворенного кислорода, что подтверждает данные литературных источников [5, 6, 10, 11] о доминирующем вкладе начального эффекта в процесс деаэрации в вакуумных установках.

Следует отметить, что теоретические зависимости, полученные для описания начального эффекта, при качественно верном прогнозировании экспериментальных данных количественно дают заниженные значения остаточной концентрации растворенного в воде кислорода. Такие результаты можно объяснить тем, что термодинамический подход не учитывает время пребывания воды в аппарате, а полученное заниженное содержание растворенного в воде кислорода соответствует асимптотическому по времени состоянию. Для количественной корректировки представленное математическое описание процесса должно быть, очевидно, уточнено путем введения поправки на реальное время пребывания воды в ступени. Использование критериальной зависимости (3) с введением в нее поправок для учета времени пребывания воды в установке является при этом наиболее перспективным подходом и рассматривается нами как направление дальнейших исследований.

Таким образом, на основе результатов расчетного анализа начального эффекта и срав-

нения его с экспериментальными данными показано определяющее влияние данного эффекта на процесс десорбции растворенного кислорода в вакуумной деаэрационной установке, включающей центробежно-вихревую и капельную ступени деаэрации, что дает возможность получения более точных решений задач по моделированию и совершенствованию конструкций и режимов работы данных установок.

Список литературы

1. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэратеры / Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003. – 560 с.
2. **Шарапов В.И.** Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 176 с.
3. **Анализ** процесса дегазации в центробежно-вихревых деаэраторах / А.Н. Росляков, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 4. – С. 11–16.
4. **Пат.** 2131555 Российская Федерация: F22D1/50, C02F1/20, B01D19/00. Деаэратор / Б.А. Зимин. Опубл. 10.06.1999, Бюл. № 22 (1 ч.).
5. **Олиker И.И.** Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с.
6. **Олиker И.И., Пермяков В.А.** Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971. – 185 с.
7. **Зельдович Я.Б.** Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. – М.: Наука, 1984. – 374 с.
8. **Коновалов В.И.** Техническая термодинамика. – Иваново, 2005. – 620 с.
9. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
10. **Energy-Effective** Method for Low-Temperature Deaeration of Make-up Water on the Heating Supply System of Heat Power Plants / V.I. Sharapov, O.V. Pazushkina, E.V. Kudryavtseva // Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 63, № 1. – P. 687–690.

11. **Sharapov V.I.** Improvement of Water Thermal Deaeration Technologies // Thermal Engineering. – 2006. – Vol. 53, № 5. – P. 390–394.

References

1. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ulyanovsk, 2003. 560 p.
2. Sharapov, V.I. *Podgotovka podpitochnoy vody sistem teplosnabzheniya s primeneniem vakuumnykh deaeratorov* [Preparation of feed water for heat supply systems by using vacuum deaerators]. Moscow, Energoatomizdat, 1996. 176 p.
3. Roslyakov, A.N., Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, B.A., Vinogradov, V.N. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 4, pp. 11–16.
4. Zimin, B.A. *Deaerator* [Deaerator]. Patent RF, no. 2131555, 1999.
5. Oliker, I.I. *Termicheskaya deaeratsiya vody v otopitel'no-proizvodstvennykh kotel'nykh i teplovykh setyakh* [Thermal water deaeration in heating and industrial boilers and heat networks]. Leningrad, Stroyizdat, 1972. 137 p.
6. Oliker, I.I., Permyakov, V.A. *Termicheskaya deaeratsiya vody na teplovykh elektrostantsiyakh* [Thermal deaeration of water at heat power stations]. Leningrad, Energiya, 1971. 185 p.
7. Zel'dovich, Ya.B. *Izbrannye trudy. Khimicheskaya fizika i gidrodinamika* [Selected works. Chemical physics and hydrodynamics]. Moscow, Nauka, 1984. 374 p.
8. Konovalov, V.I. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics]. Ivanovo, 2005. 620 p.
9. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow, Khimiya, 1971. 784 p.
10. 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. 687–690.
11. Sharapov, V.I. Improvement of Water Thermal Deaeration Technologies. *Thermal Engineering*, 2006, vol. 53, no. 5, pp. 390–394.

Барочкин Юрий Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Жуков Владимир Павлович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Барочкин Евгений Витальевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru