

УДК 621.311.22

Разработка эмпирического обеспечения ячеечной модели деаэрации воды в деаэрационных баках с затопленным барботажным устройством

С.Д. Горшенин¹, А.Ю. Ненаездников², Г.В. Ледуховский¹, В.П. Жуков¹, Е.В. Барочкин¹,
¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
²ОАО «Северсталь», г. Череповец, Российская Федерация
E-mail: lgv83@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известна ячейная модель десорбции растворенного кислорода в деаэрационных баках атмосферных деаэраторов при наличии парового барботажа, однако для ее практического использования необходима разработка эмпирического обеспечения, позволяющего определять коэффициент массопередачи при газообмене.

Методы и материалы: Разработка эмпирического обеспечения модели осуществлена с использованием результатов экспериментальных исследований методами теории подобия процессов тепломассообмена и математической статистики.

Результаты: С использованием данных, полученных в ходе экспериментальных исследований на деаэрационном баке с затопленным барботажным устройством в виде горизонтального перфорированного коллектора, разработано эмпирическое обеспечение ячейной модели деаэрации воды в виде критериального уравнения, позволяющего определять значения коэффициента массопередачи по растворенному кислороду в различных режимах работы.

Выводы: Разработанное эмпирическое обеспечение ячейной модели деаэрации обеспечивает возможность постановки и решения ряда практически значимых для энергетики расчетных задач, например, структурной и режимной оптимизации затопленных барботажных устройств деаэрационных баков атмосферных деаэраторов.

Ключевые слова: деаэрация, барботажная ступень, тепломассообмен, ячейная модель, десорбция, теория подобия, регрессия, математическая статистика.

Development of empirical support for a cell model of water deaeration in deaerator tanks with flooded bubbling stage

S.D. Gorshenin¹, A.Y. Nенаездnikov², G.V. Leduhovsky¹, V.P. Zhukov¹, E.V. Barochkin¹,
¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
²OSC «Severstal», Cherepovets, Russian Federation
E-mail: lgv83@yandex.ru

Abstract

Background: The cell model of dissolved oxygen desorption in deaerator tanks of atmospheric deaerators equipped with a steam bubbling stage is well known. However, its practical use requires developing of empirical equations which makes it possible to determine the mass transfer coefficient for gas exchange.

Materials and methods: Development of the model empirical support is based on the results of experimental research using the theory of similarity of heat and mass transfer processes and mathematical statistics.

Results: The authors have developed empirical support for the cell model of water deaeration in the form of a criteria-based equation using the data obtained experimentally by studying a deaerator tank with a flooded bubbling stage produced in the form of a horizontal perforated collector. This criteria-based equation enables us to determine the value of mass transfer coefficient for dissolved oxygen in various operation modes.

Conclusions: The developed empirical support of the water deaeration cell model makes it possible to formulate and solve some important calculation problems in power industry, such as structure and mode optimization of flooded bubbling stage of deaerator tanks of atmospheric deaerators.

Key words: deaeration, bubble stage, heat and mass transfer, cell model, desorption, theory of similarity, regression, mathematical statistics.

Рассматривается задача разработки эмпирического обеспечения ячейной модели деаэрации воды в деаэрационных баках термических деаэраторов атмосферного давления с затопленным барботажным устройством. На предыдущих этапах исследования [1, 2] на основе синтеза решения гидродинамической задачи и решения задачи десорбции газа построен метод расчета деаэрации в рассматриваемых условиях и вычислительная система для его реализации.

Предложенная математическая модель включает две подмодели: подмодель движения воды в деаэрационном баке и подмодель процесса десорбции газа (рассматривается физическая десорбция растворенного в воде кислорода).

Подмодель движения реализуется средствами прикладного программного комплекса FlowVision [3] (версия 3.08.03), предназначенного для решения задач гидродинамики и тепломассообмена. Входными параметрами на этом этапе

являются геометрические характеристики деаэрационного бака и барботажного коллектора, а также расходы и условия подачи теплоносителей в ступень. Выходными являются параметры движения теплоносителей.

В основу подмодели процесса десорбции газа положена разработанная ранее ячеечная модель [1], которая позволяет учесть влияние на скорость процесса деаэрации характеристик циркуляции потоков воды в баке, обусловленной работой барботажного устройства. Это обеспечивается заданием параметра идентификации, который назван параметром циркуляции теплоносителя и определен как отношение расходной и циркуляционной составляющих скоростей потока воды. Значение этого параметра определяется расчетом при использовании подмодели движения. Подмодель процесса десорбции позволяет также определить эволюцию площади поверхности межфазного контакта в ступени деаэрации.

Таким образом, удалось получить модель деаэрации, включающую только один параметр идентификации – коэффициент массопередачи по рассматриваемому газу, в данном случае – по растворенному кислороду.

Идентификация модели выполнена с использованием данных экспериментальных исследований, проведенных на деаэраторе ДСА-300 в условиях промышленной эксплуатации. Характеристика объекта исследований и условия реализованных семи опытов подробно описаны ранее [2]. Ниже приведем лишь сводные данные по параметрам потоков теплоносителей в опытах и найденным значениям параметра идентификации модели – коэффициента массопередачи (табл. 1).

Целью настоящего этапа исследований является разработка эмпирического обеспечения предложенной синтезированной модели, обеспечивающей расчет процесса деаэрации воды в деаэрационном баке с затопленным барботажным устройством, в виде критериального уравнения для расчета коэффициента массопередачи по растворенному кислороду.

Постановка задачи. Задача о теплообмене между водой и водяным паром и деаэрации воды в условиях работы барботажного устройства решена теоретически в ранних работах академика С.С. Кутателадзе [4]. Обобщенное критериальное уравнение для рассматриваемого случая записано в виде

риальное уравнение для рассматриваемого случая записано в виде

$$\frac{C_2 - C^*}{C_1 - C^*} = f \left(Fr_6; \frac{\rho_n}{\rho_{ж}}; \frac{G_{ж}}{G_n}; \frac{\sigma}{g \rho_{ж} h_0^2}; \frac{p}{g \rho_{ж} h_0} \right), \quad (1)$$

где C_2 и C_1 – массовые концентрации растворенного кислорода на выходе и входе барботажного устройства соответственно, $мкг/дм^3$; C^* – массовая равновесная концентрация растворенного кислорода, $мкг/дм^3$; Fr_6 – критерий Фруда для барботажного устройства; ρ_n и $\rho_{ж}$ – плотности пара и воды соответственно, $кг/м^3$; $G_{ж}$, G_n – массовые расходы воды и пара на входе в барботажное устройство соответственно, $кг/с$; g – ускорение свободного падения, $м/с^2$; σ – коэффициент поверхностного натяжения воды, $Н/м$; p – абсолютное давление пара на входе, $Па$; h_0 – гидростатический уровень воды в барботажном устройстве, $м$.

Критерий Фруда для барботажного устройства рассчитывается по выражению

$$Fr_6 = \frac{G_n}{\rho_n F_6 \sqrt{g h_0}}, \quad (2)$$

где F_6 – полное сечение барботажного устройства, $м^2$.

Отметим, что для идентификации ячеечной модели требуется не отношение разностей концентраций газа в воде и паре, используемое в выражении (1), а непосредственно коэффициент массопередачи по растворенному кислороду. Поэтому в данном случае целесообразно использовать критерий Шервуда как безразмерную характеристику интенсивности процесса газообмена:

$$Sh = \frac{k_m d}{D_{ж} \rho_{ж}}, \quad (3)$$

где k_m – средний по поверхности контакта фаз коэффициент массопередачи по растворенному кислороду, $кг/(м^2 \cdot с)$; d – диаметр отверстий барботажного устройства, $м$; $D_{ж}$ – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде, $м^2/с$.

Кроме того, при описании процессов деаэрации используется понятие удельного расхода пара на барботаж, измеряемого в килограммах подаваемого барботажного пара на тонну воды:

$$d_6 = \frac{G_n 10^3}{G_{ж}}. \quad (4)$$

Таблица 1. Основные условия опытов и результаты идентификации модели

Наименование показателя, единица измерения	Значение показателя						
	1	2	3	4	5	6	7
Номер опыта							
Расход воды на входе, $кг/с$	59,07	86,9	86,74	64,95	66,11	71,63	85,36
Расход барботажного пара на входе, $кг/с$	0,556	2,083	2,11	2,306	1,306	2,056	2,472
Удельный расход пара на барботаж, $кг/т$	9,61	23,99	24,33	35,5	19,75	28,73	29,04
Уровень воды в баке, $мм$	2199	1800	1820	1997	1972	2173	2182
Температура воды на входе, $^{\circ}C$	102,9	101,4	103,2	101,8	102,7	100,5	103,0
Температура воды на выходе, $^{\circ}C$	103,1	105,7	105,8	103,8	104,8	102,4	104,3
Массовая концентрация растворенного в воде кислорода на входе, $мкг/дм^3$	1119	541	555	423	1078	501	769
Массовая концентрация растворенного в воде кислорода на выходе, $мкг/дм^3$	91	12	0	2	23	9	12
Коэффициент массопередачи по результатам идентификации модели, $мкг/(м^2 \cdot с)$	261	145	145	116	174	116	116

Учитывая сделанные замечания, будем искать расчетное критериальное уравнение в следующем виде:

$$\text{Sh} = f\left(\text{Fr}_6; \frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}}; d_6; \frac{\sigma}{g\rho_{\text{ж}}h_0^2}; \frac{p}{g\rho_{\text{ж}}h_0}\right). \quad (5)$$

Спецификация модели. Уравнение регрессии, согласно рекомендациям [4], запишем в мультипликативном виде:

$$\text{Sh} = m_0 \text{Fr}_6^{m_1} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{m_2} d_6^{m_3} \times \left(\frac{\sigma}{g\rho_{\text{ж}}h_0^2}\right)^{m_4} \left(\frac{p}{g\rho_{\text{ж}}h_0}\right)^{m_5}, \quad (6)$$

где $m_0 \dots m_5$ – искомые параметры идентификации.

Учитывая, что в конкретных условиях не все критерии, входящие в уравнение (6), могут оказаться значимыми, выполним корреляционный анализ для имеющегося массива экспериментальных данных. В рассматриваемом случае удобно использовать аппарат корреляционного анализа для множественной линейной регрессии [5, 6]. Для этого исходное уравнение необходимо прологарифмировать.

Матрица коэффициентов парной корреляции, определенных при использовании указанных экспериментальных данных, приведена в виде табл. 2.

Данные, приведенные в табл. 2, позволяют заключить следующее:

1. Факторы $\ln\left(\frac{\sigma}{g\rho_{\text{ж}}h_0^2}\right)$ и $\ln\left(\frac{p}{g\rho_{\text{ж}}h_0}\right)$ не свя-

заны с функцией отклика $\ln(\text{Sh})$ (коэффициенты парной корреляции равны $-0,14$ и $-0,01$ соответственно). Это согласуется с выводами С.С. Кутателадзе [4], согласно которым, влияние этих факторов становится заметным только при переходе от деаэраторов атмосферного типа к деаэраторам повышенного давления. Кроме того, эти факторы являются явно коллинеарными, поскольку коэффициент парной корреляции, характеризующий тесноту связи между ними, равен $0,98$. Последнее

объясняется тем, что знаменатели рассматриваемых факторов составлены из одних и тех же параметров, а числители для рассматриваемого случая являются тесно связанными: коэффициент поверхностного натяжения воды σ определяется по давлению в надводном пространстве бака p и средней температуре воды в баке, которая, в свою очередь, отличается от температуры насыщения при давлении p не более чем на $4,5$ °С. Таким образом, рассматриваемые факторы следует исключить из уравнения регрессии.

2. Факторы $\ln(\text{Fr}_6)$ и $\ln(d_6)$, напротив, тесно связаны с функцией отклика $\ln(\text{Sh})$, поскольку коэффициенты парной корреляции равны $-0,97$ и $-0,98$ соответственно. Однако эти факторы, судя по значению межфакторного коэффициента парной корреляции $0,97$, также должны быть коллинеарными. Анализ данных позволяет заключить, что эта связь обусловлена технологическими ограничениями по установлению режима работы барботажного устройства: большие значения расхода воды в деаэраторный бак $G_{\text{ж}}$ определяют малые значения уровня воды в нем h_0 и, одновременно, преимущественно большие значения удельного расхода пара на барботаж d_6 , т. е., учитывая уравнение (2), с увеличением Fr_6 преимущественно увеличивается d_6 (рис. 1). Учитывая, что при приблизительно одинаковой тесноте связи рассматриваемых критериев с функцией

отклика теснота связи с фактором $\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}}\right)$ больше для фактора $\ln(\text{Fr}_6)$, чем для фактора $\ln(d_6)$ (коэффициенты парной корреляции равны $0,63$ и $0,54$ соответственно), исключить из уравнения регрессии следует именно фактор $\ln(\text{Fr}_6)$.

3. Теснота связи фактора $\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}}\right)$ с функцией отклика $\ln(\text{Sh})$ может быть охарактеризована как неявная, однако на этапе спецификации модели этот фактор целесообразно включить в уравнение регрессии.

Таблица 2. Матрица коэффициентов парной корреляции

Факторы / функция отклика	$\ln(\text{Sh})$	$\ln(\text{Fr}_6)$	$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}}\right)$	$\ln(d_6)$	$\ln\left(\frac{\sigma}{g\rho_{\text{ж}}h_0^2}\right)$	$\ln\left(\frac{p}{g\rho_{\text{ж}}h_0}\right)$
$\ln(\text{Sh})$	1	$-0,97$	$-0,60$	$-0,98$	$-0,14$	$-0,01$
$\ln(\text{Fr}_6)$	$-0,97$	1	$0,63$	$0,97$	$0,35$	$0,24$
$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}}\right)$	$-0,60$	$0,63$	1	$0,54$	$0,47$	$0,47$
$\ln(d_6)$	$-0,98$	$0,97$	$0,54$	1	$0,24$	$0,10$
$\ln\left(\frac{\sigma}{g\rho_{\text{ж}}h_0^2}\right)$	$-0,14$	$0,35$	$0,47$	$0,24$	1	$0,98$
$\ln\left(\frac{p}{g\rho_{\text{ж}}h_0}\right)$	$-0,01$	$0,24$	$0,47$	$0,10$	$0,98$	1

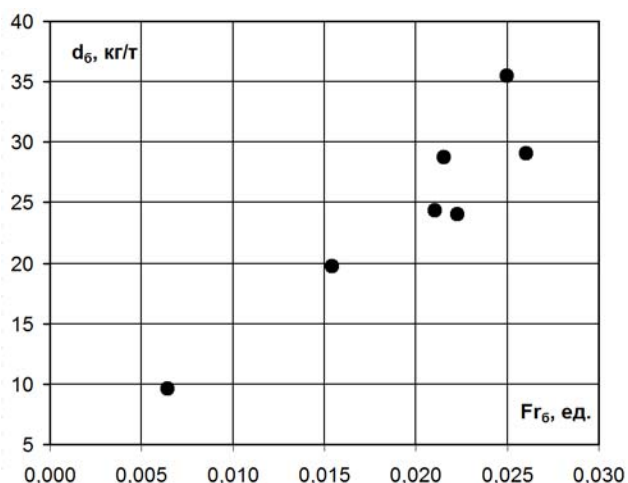


Рис. 1. Связь между факторами F_{r6} и d_6 в условиях опытов

4. Мультиколлинеарность факторов $\ln\left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}}\right)$

и $\ln(d_6)$ оценивается как незначительная (определитель матрицы межфакторных коэффициентов парной корреляции равен 0,71).

Таким образом, искомое уравнение регрессии (6) перепишем в виде

$$Sh = m_0 \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}} \right)^{m_2} d_6^{m_3}. \quad (7)$$

Идентификация уравнения регрессии.

Для определения параметров идентификации m_0 , m_2 и m_3 уравнения регрессии (7) после его логарифмирования использован метод наименьших квадратов. В результате искомое уравнение регрессии получено в виде

$$Sh = 7,448 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}} \right)^{-0,401} d_6^{-0,642}. \quad (8)$$

Сопоставление рассчитанных по уравнению (8) и экспериментальных значений критерия Шервуда показано на рис. 2.

Оценка существенности факторов и качества регрессии. Множественное корреляционное отношение для найденного уравнения регрессии составляет $R = 0,991$, а скорректированное значение этого показателя (с учетом поправки на число степеней свободы) равно $\hat{R} = 0,987$. Значимость уравнения (8) доказана с использованием критерия Фишера, значение которого составило 37,9 при табличном (критическом) значении 6,2 (уровень значимости принят равным 0,95).

Отметим, что оба найденных значения множественного корреляционного отношения мало отличаются от максимального из значений коэффициентов парной корреляции, которое составляет 0,98 (табл. 2), что указывает на возможную статистическую незначимость одного из факторов, включенных в уравнение регрессии. Эту дополнительную проверку выполним с использованием t -критерия Стьюдента и частных критериев Фишера.

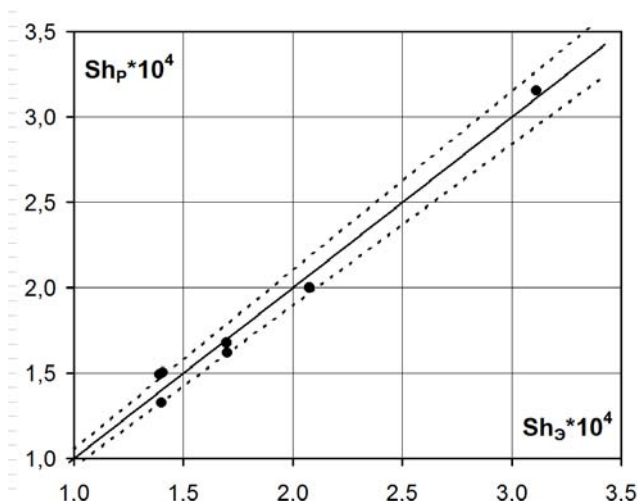


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений критерия Шервуда: Sh_3 и Sh_p – экспериментальные и расчетные значения критерия Шервуда соответственно; сплошная линия – совпадение экспериментальных и расчетных значений; пунктирные линии – границы 95 %-го доверительного интервала, обусловленного погрешностью измерения параметров в условиях опытов; точки – результаты расчета по уравнению регрессии (8)

Значения частных коэффициентов корреляции составили: 0,99 при исключении фактора

$\ln\left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}}\right)$ и 0,75 при исключении фактора $\ln(d_6)$.

Значения t -критерия Стьюдента получены следующими: для частного коэффициента корреляции при исключении фактора $\ln\left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}}\right)$ $t = 88,0$; для

частного коэффициента корреляции при исключении $\ln(d_6)$ $t = 4,1$. Критическое значение t -критерия Стьюдента равно 3,2. Частные критерии Фишера для рассматриваемого случая равны: 141,7 для фактора $\ln(d_6)$ и 9,5 для фактора

$\ln\left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}}\right)$. Табличное (критическое) значение частного критерия Фишера равно 7,7. Учитывая полученные результаты, влияние на функцию отклика

обоих рассматриваемых факторов можно признать статистически значимым.

Исследование остатков. Сумма остатков ε , определенных как разность между экспериментальными и расчетными значениями критерия Шервуда в опытах, составила менее 0,5 % от среднего наблюдаемого значения критерия Шервуда.

Ввиду малости выборки, проверка остатков на принадлежность нормальному распределению не выполнялась. При анализе зависимостей

вида $\varepsilon = f\left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}}\right)$, $\varepsilon = f(d_6)$ и $\varepsilon = f(Sh)$ функциональных связей не обнаружено.

В заключение необходимо отметить, что предложенное критериальное уравнение, несмотря на доказанную его статистическую значимость, следует рассматривать как оценочное, поскольку для его получения использована ма-

лая выборка – малый объем экспериментальных данных. Уточнение модели возможно путем привлечения дополнительного эмпирического материала. В частности, в дальнейших исследованиях предполагается использовать результаты натурных испытаний деаэратора ДА-300м.

Список литературы

1. **Моделирование** процесса деаэрации в барботажной ступени с учетом циркуляции потоков жидкости / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, А.Ю. Ненаездников и др. // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 9–13.
2. **Инкорпорация** решения гидродинамической задачи в ячеечную модель деаэрации / А.Ю. Ненаездников, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 4. – С. 12–16.
3. **Применение** пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: учеб. пособие / Т.В. Кондратин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова и др. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.
4. **Кутателадзе С.С., Зысин В.А.** Нагрев и деаэрация воды при непосредственном смешении ее с паром // За новое советское энергооборудование. – Л., 1939. – С. 86–124.
5. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 1.: пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

6. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 2.; пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 352 с.

References

1. Barochkin, E.V., Zhukov, V.P., Nenaezdnikov, A.Yu., Belyakov, A.N., Roslyakov, A.N., Leduhovsky, G.V., Zimin, A.P. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 9–13.
2. Nenaezdnikov, A.Yu., Leduhovsky, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Gorshenin, S.D. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 4, pp. 12–16.
3. Kondranin, T.V., Tkachenko, B.K., Berезnikova, M.V., Evdokimov, A.V., Zuev, A.P. *Primenenie paketov prikladnykh programm pri izuchenii kursov mekhaniki zhidkosti i gaza* [Application software packages in fluid mechanics courses]. Moscow, MFTI, 2005. 104 p.
4. Kutateladze, S.S., Zysin V.A. *Nagrev i deaeratsiya vody pri neposredstvennom smeshenii ee s parom* [Heating and deaeration of water directly mixed with steam]. *Za novoe sovetskoe energooborudovanie*. Leningrad, 1939, pp. 86–124.
5. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regressionnyy anaiz*, v 2 kn., kn. 1 [Applied Regression Analysis in 2 books, book 1]. Moscow, Finansy i statistika, 1986. 366 p.
6. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regressionnyy anaiz*, v 2 kn., kn. 2 [Applied Regression Analysis in 2 books, book 2]. Moscow, Finansy i statistika, 1986. 352 p.

Горшенин Сергей Дмитриевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
соискатель,
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

Ненаездников Александр Юрьевич

ОАО «Северсталь»,
инженер,
адрес: 162600, Россия, Вологодская обл., г. Череповец, ул. Мира, д. 30

Ледуховский Григорий Васильевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Жуков Владимир Павлович

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

Барочкин Евгений Витальевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой 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