

УДК 621.311.22

## Инкорпорация решения гидродинамической задачи в ячеечную модель деаэрации

А.Ю. Ненаездников<sup>1</sup>, Г.В. Ледуховский<sup>2</sup>, В.П. Жуков<sup>2</sup>, Е.В. Барочкин<sup>2</sup>, С.Д. Горшенин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ОАО «Северсталь», г. Череповец, Российская Федерация  
<sup>2</sup>ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Процессы движения воды и газа в слое барботируемой жидкости традиционно рассматриваются раздельно, без учета влияния условий подачи пара на характер циркулирующего движения воды в слое и без учета влияния характера движения воды на движение пузырьков пара. В связи с этим при определении времени пребывания теплоносителей в слое, которое существенным образом влияет на кинетику обменных процессов, необходимо учитывать это взаимное влияние.

**Методы и материалы:** Для совместного описания движения пара и воды в слое барботируемой жидкости использован специализированный прикладной программный пакет с дальнейшей инкорпорацией полученных результатов в ячеечную модель расчета собственно процесса деаэрации.

**Результаты:** На основе синтеза решения гидродинамической задачи и решения задачи десорбции газа разработаны метод расчета деаэрации в барботажной ступени атмосферных деаэраторов и вычислительная система для его реализации. Проведена проверка адекватности предложенного метода посредством сопоставления результатов расчета с результатами проведенных на промышленной установке экспериментальных исследований процесса деаэрации в барботажной ступени.

**Выводы:** Предложенный подход инкорпорации (включения) результатов решения гидродинамической задачи, полученного с помощью специализированного прикладного программного пакета, в ячеечную модель барботажной ступени атмосферных деаэраторов обеспечивает возможность постановки и решения ряда практически значимых для энергетики расчетных задач.

**Ключевые слова:** деаэрация, барботажная ступень, теплообмен, гидродинамическая задача, межфазная поверхность, ячеечная модель, десорбция.

## Incorporation of hydrodynamic problem solutions in a deaeration cell model

A.Y. Nenaezdnikov<sup>1</sup>, G.V. Leduhovsky<sup>2</sup>, V.P. Zhukov<sup>2</sup>, E.V. Barochkin<sup>2</sup>, S.D. Gorshenin<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>OSC «Severstal», Cherepovets, Russian Federation  
<sup>2</sup>Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

### Abstract

**Background:** Processes of water and gas movement in a layer of bubbled liquid are traditionally considered separately without taking into account the influence of steam conditions on the characteristics of water circulation in the layer and the affect of the water circulation characteristics on the movement of steam bubbles. These parameters should be taken into consideration when determining the coolant residence time in the layer which has a significant influence on the exchange processes.

**Materials and methods:** To describe the joint motion of water and steam in the layer of bubbled liquid the authors propose to use specialized application software with further incorporation of the results in a cell model of deaeration calculation.

**Results:** The authors have developed a method of calculating deaeration in the bubble level of atmospheric deaerators and a computer system for its implementation based on combining the solutions of hydrodynamic and gas desorption problems. The proposed method was validated by comparing the calculation results with those obtained by experimental studies of the deaeration process in the bubble stage of an industrial installation.

**Conclusions:** The new approach of incorporating (including) the results of the hydrodynamic problem solutions, obtained with the help of a specialized application software package, in a cell model of atmospheric deaerator bubble stage, makes it possible to formulate and solve a number of problems that are of practical importance in power industry.

**Key words:** deaeration, bubble stage, heat and mass transfer, hydrodynamic problem, interphase surface, cell model, desorption.

В опубликованной ранее работе [1] сделана попытка учесть в модели процесса деаэрации воды в барботажной ступени циркуляцию потока воды в баке, обусловленную подачей пара в слой жидкости. Предложенная при этом модель

движения содержит один параметр идентификации, который определен через отношение расходной и циркуляционной составляющих скоростей потока воды и назван параметром циркуляции теплоносителя. Очевидно, что значение

данного параметра будет зависеть от условий подачи пара через коллектор и места размещения указанного коллектора в слое воды. Для определения искомого параметра модели предложено два способа: экспериментальный и расчетный. Второй путь при существенном увеличении объема вычислений позволяет без привлечения экспериментальных данных моделировать сложный характер движения жидкости, что особенно актуально при разработке новых конструкций аппаратов.

Для определения параметра циркуляции теплоносителя в рамках второго способа предлагается использовать решение гидродинамической задачи, найденное с использованием специализированного прикладного программного пакета (ППП), и инкорпорировать результаты этого решения в ячеечную модель.

Целью исследований является разработка синтезированной модели барботажной ступени, которая включает два модуля: модуль решения гидродинамической задачи в ступени и модуль собственно расчета процесса деаэрации. Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- декомпозиция модели объекта на две подмодели: подмодель движения теплоносителей в баке деаэратора и подмодель процесса десорбции газа;
- разработка структуры информационных потоков для сопряжения указанных модулей;
- постановка гидродинамической задачи и ее решение в рамках специализированного ППП;
- интеграция результатов решения гидродинамической задачи в ячеечную модель деаэрации;
- идентификация синтезированной модели на основе экспериментальных данных, полученных в ходе специальных экспериментальных исследований.

Объектом исследования является барботажная ступень атмосферного деаэратора с затопленным коллектором для подачи пара в слой жидкости. Эскиз ступени с указанием основных потоков теплоносителей приведен на рис. 1,а. Пар подается в слой жидкости снизу через затопленный коллектор 1. Деаэрируемая вода 2 поступает в ступень сверху. За счет разности температур между пузырьками пара и водой происходит теплообмен, а за счет разности парциальных давлений газов – деаэрация воды. Неконденсируемые газы покидают ступень вместе с паром 3.

Декомпозицию модели объекта на два расчетных модуля иллюстрирует рис. 1,б. Первый модуль в качестве входных параметров использует геометрические характеристики деаэраторного бака и барботажного коллектора, а также расходы и условия подачи теплоносителей в ступень. Из модуля после выполнения расчета выдаются значения параметров движения теплоносителей, которые используются во втором

расчетном модуле процесса деаэрации, в основе которого лежит построенная ранее ячеечная модель [1]. Предлагаемый синтез расчетных модулей позволяет, с одной стороны, наиболее полно реализовать возможности специализированных ППП, а с другой стороны, инкорпорировать результаты использования специализированных ППП в собственные исследовательские пакеты.

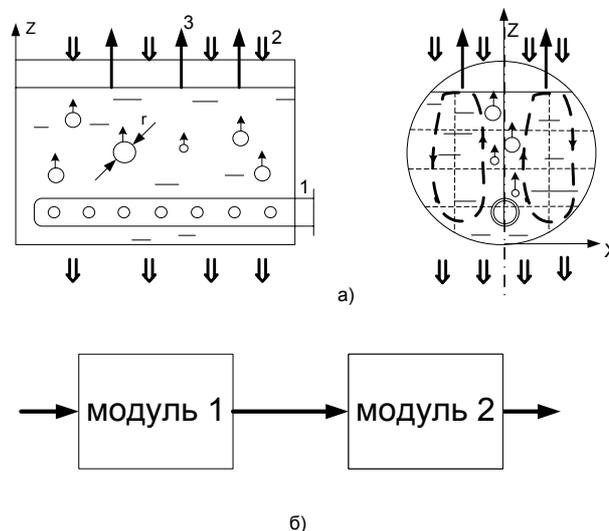


Рис. 1. Схема барботажной ступени деаэратора (а) и структура модели и информационных потоков для согласования ее расчетных модулей (б): 1 – подвод пара; 2 – подвод воды; 3 – отвод пара

При построении первого расчетного модуля для решения гидродинамической задачи использован программный комплекс FlowVision-2 [2], позволяющий, в частности, моделировать ламинарные и турбулентные течения несжимаемой жидкости в каналах произвольной формы.

Для решения гидродинамической задачи создана модель деаэраторного бака атмосферного деаэратора ДСА-300 с затопленным барботажным коллектором, место установки которого показано на рис. 1,а. Учитывая функциональные ограничения используемой версии пакета FlowVision-2, гидродинамическая ситуация в затопленном водой баке моделировалась подачей через отверстия барботажного коллектора воды при условии постоянства соответствующих критериев гидродинамического подобия. В качестве модели турбулентности принята  $k-\epsilon$  модель. Задавались следующие граничные условия: температура и профиль скоростей потока воды на входе в бак; статическое давление в выходном отверстии бака; температура и расход модельной среды через барботажный коллектор; стенки бака и коллектора реальные (учтена шероховатость); свободная поверхность жидкости задавалась идеальной стенкой.

При проведении численных экспериментов расход и температура деаэрируемой воды, подаваемой в бак, оставались неизменными и равными соответственно 63 кг/с и 104 °С. Проведено семь расчетных опытов при значениях расхода

модельной среды через барботажный коллектор в диапазоне от 0 до 4,4 кг/с в пересчете к условиям парового барботажа, что соответствует значениям удельного расхода пара на барботаж от 0 до 70 кг пара на тонну деаэрированной воды, т.е. во всем реальном регулировочном диапазоне.

Для определения циркуляционной составляющей скорости воды в баке в условиях моделируемых опытов определялись проекции вектора скорости потока в характерных сечениях геометрической модели с последующим их осреднением по длине бака и проверкой материальных балансов ячеек, образованных выбранными сечениями.

Решение гидродинамической задачи представлено на рис. 2 в виде зависимости циркуляционной составляющей скорости воды от расхода пара на барботаж. Знание этой зависимости позволяет определить значение параметра циркуляции теплоносителя как отношение расходной составляющей скорости к циркуляционной.

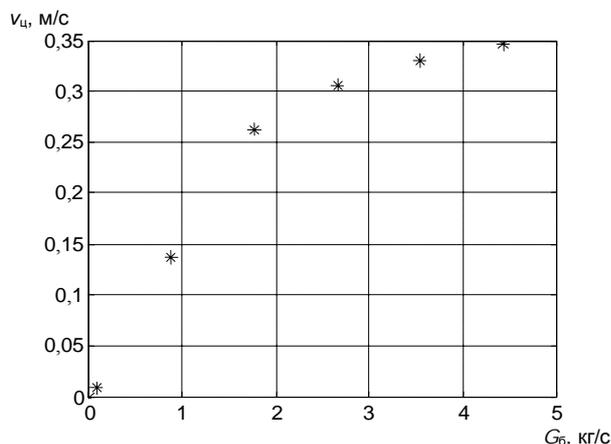


Рис. 2. Результаты решения гидродинамической задачи по определению циркуляционной составляющей скорости воды  $v_{ц}$ , м/с, в зависимости от расхода пара на барботаж  $G_b$ , кг/с

Результаты решения гидродинамической задачи обеспечивают информационную связь между двумя расчетными модулями, т. е. являются исходными данными для ячейочной модели деаэрации в барботажной ступени. Подробно указанная модель рассматривается в работе [1], ниже приводятся наиболее важные ее положения и основные результаты решения задачи деаэрации.

Разработка и решение модели деаэрации на основе ячейочного подхода заключается в выборе структуры расчетного фазового пространства, разбиении объема аппарата на ячейки, указании связей между ячейками и соответствующих этим связям вероятностей переходов.

В качестве искомой функции рассматривается плотность распределения вещества по координатам фазового пространства. В качестве геометрических координат рассматриваются ширина  $x$  и высота слоя  $z$  (рис. 1,а), в качестве третьей координаты — вертикальная скорость

пузырьков пара, однозначно определяемая их размером  $r$  [1]. В качестве четвертой координаты, показывающей тип теплоносителя и его фазовое состояние, вводится ось  $\Phi$ , вдоль которой откладываются следующие дискретные значения:  $\Phi = [1(\text{пар}) 2(\text{вода}) 3(\text{газ в паре}) 4(\text{газ в воде})]$  [1].

Решение задачи или определение эволюции плотности распределения вещества по координатам фазового пространства выполняется на основе матричного метода и программного пакета [3]. Эволюция искомого распределения по выбранным ячейкам позволяет, в частности, определить эволюцию площади межфазной поверхности, которая в основном и определяет скорость процессов тепло- и массообмена в слое. На рис. 3 представлены предварительные тестовые расчетные зависимости по стабилизации площади поверхности контакта фаз. Согласно представленным данным, стабилизация результатов расчета наблюдается при числе итераций в диапазоне от 15 до 20, что было использовано при проведении основных расчетов.

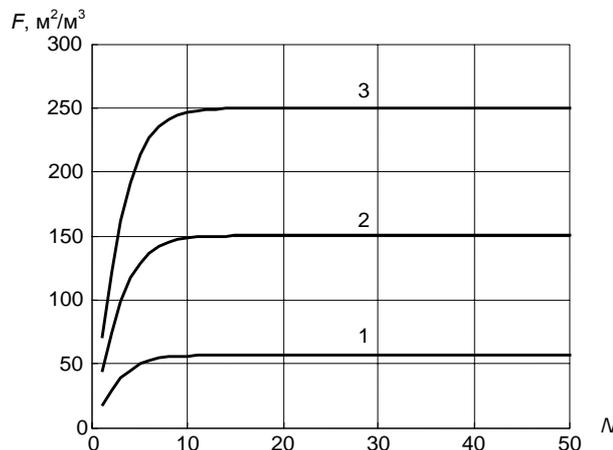


Рис. 3. Зависимость удельной площади поверхности контакта фаз  $F$ , м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, от числа итераций  $N$  для различных условий проведения опытов (цифры соответствуют номерам опытов согласно таблице)

На рис. 4 приведены результаты расчетов, выполненных с помощью ячейочной модели, по определению установившихся значений площади межфазной поверхности для условий проведения опытов, представленных в таблице. Определение коэффициентов массопередачи в слое непосредственно связано с методикой расчета площади межфазной поверхности. Найденная зависимость удельной межфазной поверхности в слое от удельного расхода пара на барботаж позволяет перейти к определению коэффициентов массопередачи в барботажном слое. Кроме этого, приведенные на рис. 4 зависимости могут быть использованы при разработке и применении инженерных методов расчета, работающих без привлечения для решения гидродинамической задачи специализированных ППП.

Отметим, что полученные значения удельной площади поверхности контакта фаз

меньше, чем значения этого показателя, характерные для барботажных листов непривального типа ( $670\text{--}1500\text{ м}^2/\text{м}^3$ )<sup>1</sup>. Тем не менее по эффективности рассматриваемое устройство в виде затопленного барботажного коллектора на дне деаэрационного бака даже несколько превосходит затопленное барботажное устройство системы ЦКТИ [4, 5], что обусловлено существенно большими размерами образуемой им барботажной ступени.

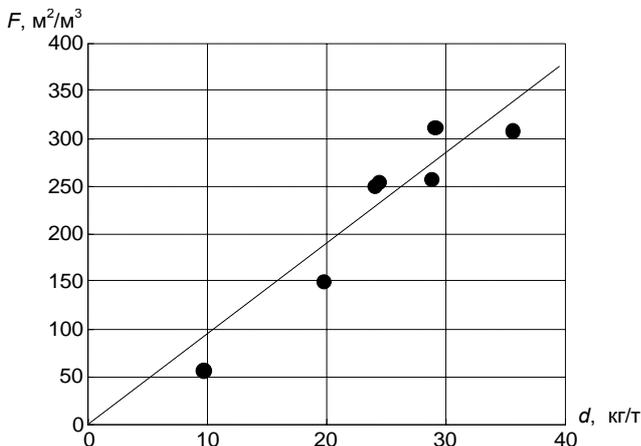


Рис. 4. Зависимость удельной площади поверхности контакта фаз  $F$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ , в барботажной ступени деаэратора от удельного расхода пара на барботаж  $d$ ,  $\text{кг}/\text{т}$

С учетом предложенного подхода определения площади межфазной поверхности для проведения в рамках ячеечной модели расчета процесса деаэрации в барботажной ступени необходима идентификация модели с определением коэффициента массопередачи в слое.

Идентификация модели выполнена с привлечением результатов экспериментальных исследований [4, 5], объектом которых являлся струйно-барботажный термический деаэратор атмосферного давления модели ДСА-300 (рис. 5). Деаэратор двухступенчатый: первая ступень – струйная – расположена в деаэрационной колонке и включает два расположенных один под другим струйных отсека; вторая ступень – барботажная – находится в деаэрационном баке и выполнена аналогично тому, как показано на рис. 1, а.

В целях получения данных о характеристиках процессов массообмена, протекающих в струйных и барботажных устройствах, разработана схема отбора проб воды из внутренних элементов деаэратора. Расположение пробоотборных зондов показано на рис. 5. В ходе исследований с использованием преимущественно образцовых средств измерения и их выбороч-

ным дублированием контролировались значения теплофизических характеристик потоков теплоносителей, а также массовая концентрация растворенного в воде кислорода.

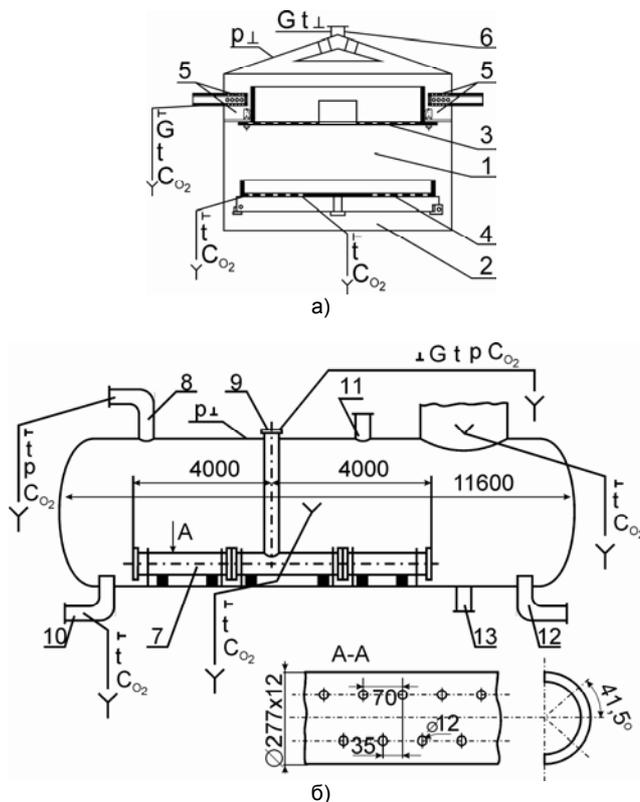


Рис. 5. Схема объекта экспериментальных исследований: а – деаэрационная колонка; б – деаэрационный бак; 1 и 2 – верхний и нижний струйные отсеки; 3 и 4 – верхняя и нижняя струеобразующие тарелки; 5 – система водораспределения; 6 – отвод выпара; 7 – барботажный коллектор деаэрационного бака; 8 и 9 – подвод основного и барботажного пара соответственно; 10 – отвод деаэрированной воды; 11 и 12 – подключение деаэратора к паровому и водяному уравнительным трубопроводам соответственно; 13 – дренаж;  $\Upsilon$  – отбор пробы воды для лабораторного контроля;  $\perp$  – точка контроля теплотехнических и химических параметров;  $G$  – расхода,  $t$  – температуры,  $p$  – давления,  $C_{O_2}$  – концентрации растворенного кислорода

В ходе каждого опыта длительностью не менее 1,5 часов с предварительной выдержкой по времени (из расчета времени, необходимого для трехкратного обмена воды в деаэрационном баке) выполнено не менее 9 измерений каждого теплотехнического параметра и около 15 измерений массовой концентрации растворенного кислорода. Полученные таким образом данные подвергнуты первичной обработке, включающей идентификацию и отсеивание выбегов, исключение известных систематических погрешностей, расчет окончательных результатов измерений и доверительных границ их погрешности. Последующая обработка экспериментальных данных, основу математического аппарата которой составляли системы уравнений материального и теплового балансов отдельных элементов и их комплексов [4], позволила определить, в частности, регуляризованные с точки зрения сходимости этих балансов теплофизические характери-

<sup>1</sup> РД 34.40.101 (СО 153-34.40.101). Руководящие указания по проектированию термических деаэрационных установок питательной воды котлов; разраб. ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского и ЦКТИ им. И.И. Ползунова; введ. в действие с 01.01.1968 г. (переизд. 01.01.2009 г.)

стики воды и пара на входе и выходе воды в деаэрационном баке, а также содержание в этой воде и паре растворенного кислорода.

Таким образом, сформирован блок исходных экспериментальных данных для идентификации рассматриваемой модели. Всего проведено и принято к обработке семь опытов с подачей в деаэратор барботажного пара. Основные характеристики потоков теплоносителей на входе и выходе водяного объема деаэрационного бака в условиях опытов приведены в таблице.

Условия опытов и найденные в ходе идентификации модели значения коэффициента массопередачи

Наименование показателя, единица измерения	Значение показателя						
	1	2	3	4	5	6	7
Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7
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 (деаэрированной воды)	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, °С	102,9	101,4	103,2	101,8	102,7	100,5	103,0
Температура воды на выходе, °С	103,1	105,7	105,8	103,8	104,8	102,4	104,3
Массовая концентрация растворенного кислорода в барботажном паре, мкг/дм <sup>3</sup>	0	0	0	0	0	0	0
Массовая концентрация растворенного кислорода в воде на входе, мкг/дм <sup>3</sup>	1119	541	555	423	1078	501	769
Массовая концентрация растворенного кислорода в воде на выходе, мкг/дм <sup>3</sup>	91	12	0	2	23	9	12
Коэффициент массопередачи по результатам идентификации модели, мкг/(м <sup>2</sup> с)	261	145	145	116	174	116	116

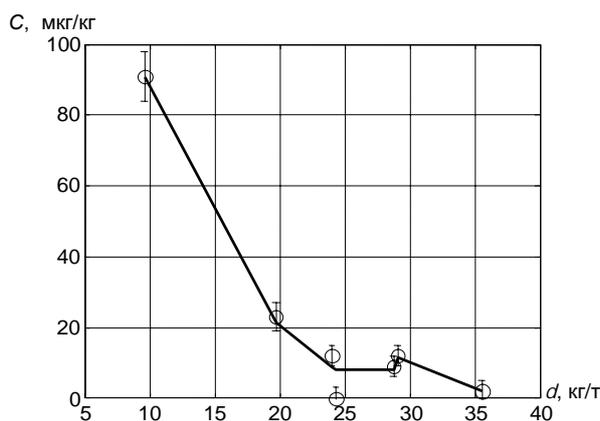


Рис. 6. Сопоставление расчетных (линия) и экспериментальных (точки) значений массовой концентрации растворенного кислорода в воде после деаэрационного бака  $C$ , мкг/кг, в зависимости от удельного расхода пара на барботаж  $d$ , кг/т

Для эмпирического обеспечения предложенной синтезированной модели, обеспечивающей расчет процесса деаэрации воды в деаэрационном баке с затопленным барботажным коллектором, целесообразно разработать метод расчета коэффициента массопередачи в различных режимах работы рассматриваемого барботажного устройства. Для этого в рамках дальнейших исследований предполагается использовать аппарат теории подобия.

#### 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.

В ходе идентификации модели деаэрации в деаэрационном баке, оборудованном барботажным коллектором, определены коэффициенты массопередачи по условию согласования расчетных и экспериментальных данных (см. таблицу). Сопоставление расчетных и экспериментальных значений массовой концентрации растворенного кислорода в воде на выходе из деаэрационного бака иллюстрирует рис. 6.

2. **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.

3. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет процессов теплообмена в многоступенчатых аппаратах» №2010611545 от 10 февраля 2012 года / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, А.Н. Беляков.

4. **Ледуховский Г.В.** Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно-барботажных деаэрациях атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2008. – 226 с.

5. **Исследование** эффективности деаэрации воды в баках атмосферных деаэрационных, оборудованных барботажным коллектором / Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 32–36.

#### References

1. Barochkin, E.V., Zhukov, V.P., Nenaezdnikov, A.Yu., Belyakov, A.N., Roslyakov, A.N., Ledukhovskiy, G.V., Zimin, A.P. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 9–13.

2. Kondratin, T.V., Tkachenko, B.K., Bereznikova, M.V., Evdokimov, A.V., Zuev, A.P. *Primenenie paketov prikladnykh programm pri izuchenii kursov mekhaniki zhidkosti i gaza* [Using Application Program Packages in Teaching Courses]. Moscow, MFTI, 2005. 104 p.

3. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM «Raschet protsessov teplomassoobmena v mnogopotchnykh apparatakh»* [Certificate of State Registration of Computer Program «Calculation of heat and mass transfer in multi-threaded multi-stage devices»], no. 2010611545, 2012.

4. Ledukhovskiy, G.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii desorbtsii kisloroda v struyno-barbotazhnykh deaeratorakh atmosferynoy davleniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving of Oxygen Desorption Technology in Jet-Type Atmospheric-Pressure Deaerators. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2008. 226 p.

5. Barochkin, E.V., Ledukhovskiy, G.V., Vinogradov, V.N., Korotkov, A.A., Nenaezdnikov, A.Yu. *Vestnik IGEU*, 2009, issue 2, pp. 32–36.

*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,  
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

*Горшенин Сергей Дмитриевич*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
соискатель,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,  
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru