

УДК 621.926

## Моделирование процесса деаэрации в барботажной ступени с учетом циркуляции потоков жидкости

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

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Подача пара в слой барботируемой жидкости приводит к появлению в слое циркулирующих потоков воды, которые в настоящее время при описании процесса деаэрации не учитываются, но могут приводить к трансформации размеров пузырьков пара, площади поверхности раздела фаз и скорости протекания тепломассообменных процессов. В связи с этим необходим учет циркуляции потоков жидкости при моделировании процесса деаэрации.

**Методы и материалы:** Для учета сложного характера движения теплоносителей в слое и его влияния на протекание тепломассообмена предложен подход, основанный на кинетическом уравнении Больцмана.

**Результаты:** На основе уравнения Больцмана разработана математическая модель деаэрации воды в барботируемом слое, учитывающая циркуляцию жидкости, исследована параметрическая чувствительность модели, показано влияние циркуляции потоков жидкости на процесс деаэрации.

**Выводы:** Предложенный новый подход к моделированию движения теплоносителей и процессов тепломассообмена в барботируемом слое жидкости позволяет повысить эффективность процесса деаэрации.

**Ключевые слова:** деаэрация, барботажная ступень, тепломассообмен, уравнение Больцмана, межфазная поверхность.

## Modeling of Deaeration Process in Bubble Stage with Liquid Flows Circulation

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

### Abstract

**Background:** Steam supply in bubbled liquid causes the appearance of circulating liquid flows, which at present are not considered in the description of deaeration process, but which can affect the size of steam bubbles, the area of interfacial surface and heat and mass transfer velocity. As a result, the circulation accounting of liquid flows is necessary for modeling of deaeration process.

**Materials and methods:** To consider the complicated movement of heat transfer agents in the layer and its influence on heat and mass transfer the authors use a new method, based on the Boltzmann kinetic equation.

**Results:** The mathematical model of water deaeration in bubbled liquid layer, based on the Boltzmann kinetic equation, is developed; parametric sensitivity of the model is investigated; the influence of circulating water flows on deaeration is shown.

**Conclusions:** The new approach to simulate the heat transfer agent movement and the heat-exchange process in bubbled liquid layer is proposed. The author prove that this method allows to increase the efficiency of deaeration process.

**Key words:** deaeration, bubble stage, heat and mass exchange, Boltzmann equation, interfacial surface.

Ранее нами была предложена модель процесса деаэрации в барботажной ступени [1], разработанная на основе уравнения Больцмана, в которой движение жидкости представлено моделью идеального вытеснения. Известные экспериментальные и расчетные исследования [2–4] показали, что при барботаже жидкость в слое начинает циркулировать. Очевидно, что такой характер движения приводит к изменению времени пребывания теплоносителей в слое и, следовательно, к изменению условий протекания тепломассообменных процессов.

Целью исследования является разработка математического описания процесса деаэрации воды в барботажной ступени с учетом циркуляции воды в слое.

Для достижения цели последовательно решаются следующие задачи:

- разработка математической модели движения, учитывающей циркуляцию жидкости в барботажной ступени;

- интеграция модели движения в ячеечную модель деаэрации, построенную на основе уравнения Больцмана;

• оценка влияния циркуляции жидкости на теплообмен в деаэраторе.

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 водой и пузырьками пара происходит теплообмен, а за счет разности парциальных давлений газов – деаэрация воды. Неконденсируемые газы покидают ступень вместе с паром 3.

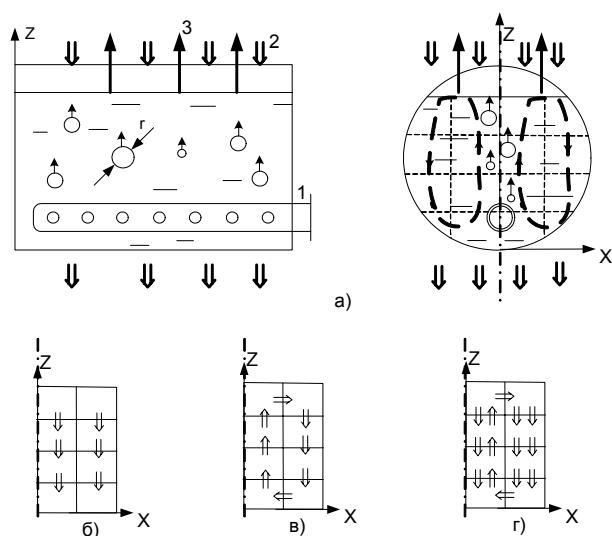


Рис. 1. Эскиз барботажной ступени деаэратора (а) и расчетные схемы расходных (б), циркуляционных (в) и суммарных (г) потоков воды в ступени

Модель деаэрации воды в барботажной ступени аппарата с учетом циркуляции жидкости разрабатывается на основе уравнения Больцмана [6], которое позволяет эффективно описывать совместное протекание процессов в ступени. В качестве искомой функции рассматривается плотность распределения вещества по фазовому пространству. Произведение плотности распределения на элемент объема показывает вероятность попадания вещества в данную область фазового пространства.

Разработка и решение модели деаэрации на основе уравнения Больцмана [7] заключается в выборе структуры фазового пространства, разбиении рабочего объема на ячейки, указании связей между ячейками и соответствующих этим связям вероятностей переходов.

Следует отметить особенность применения уравнения Больцмана для моделирования барботажной ступени деаэратора с циркуляцией жидкости. Наличие в слое затопленного парового коллектора приводит к изменению гидродинамической обстановки в слое [2–4]: подача пара через

коллектор в слой жидкости обуславливает появление циркуляционных течений, масштаб которых существенно зависит от условий подачи пара. Разработка модели деаэрации в ступени с учетом циркуляции воды выполняется в два этапа. На первом этапе моделируется движение теплоносителей, на втором этапе совместно с движением рассматривается теплообмен. Последовательное рассмотрение процессов возможно в том случае, если теплообмен не оказывает существенного влияния на характер движения теплоносителей. Расчетный анализ показал, что такое последовательное представление процессов с приемлемой для инженерных расчетов точностью возможно при незначительном недогреве (до температуры насыщения) подаваемой в деаэратор воды, величина которого для рассматриваемых условий подачи пара не должна превышать восьми градусов [4].

При описании движения жидкости рассматривается плоская задача, то есть выбираются две геометрические координаты ( $x, z$ ), направление которых показано на рис. 1. Для оценки влияния циркуляции жидкости на процесс деаэрации предлагается движение воды в каждой ячейке модельно представлять суперпозицией (или суммой) двух скоростей: расходной и циркуляционной. Расходная скорость обеспечивает равенство в каждом горизонтальном сечении расхода жидкости через аппарат и направлена вертикально вниз (рис. 1,б). Направление циркуляционной составляющей скорости схематично представлено на рис. 1,в. Суммарный расход жидкости через произвольное горизонтальное сечение, обусловленный циркуляционными составляющими скорости, равен нулю. Построенное на основании приведенных допущений поле скоростей жидкости (рис. 1,г), с одной стороны, обеспечивает выполнение материальных балансов в каждом горизонтальном сечении и, с другой стороны, позволяет оценить влияние циркуляции жидкости на теплообмен в слое. В предельных случаях предложенная модель движения жидкости переходит в более простые: при отсутствии циркуляции – в модель идеального вытеснения, а при отсутствии подачи жидкости в слой описывает работу аппарата периодического действия с циркулирующей загрузкой.

Для учета влияния циркуляции на процесс движения в модель вводится параметр  $K$ , равный отношению скорости циркулирующего потока к скорости расходного потока:  $K = v_z/v_k$ . При равенстве нулю этого параметра поток двигается в соответствии с моделью идеального вытеснения, а равенство бесконечности соответствует нулевой расходной скорости через аппарат. Расходная составляющая скорости определяется величиной расхода воды через ступень, а параметр отношения скоростей ( $x, z$ ) в дальнейшем рассматривается как параметр идентификации модели.

Для определения параметра идентификации модели предложены два подхода: экспериментальный и расчетный. Прямые экспериментальные исследования полей скоростей в барботируемом слое связаны со значительными ресурсными и временными затратами и в промышленных условиях практически невыполнимы. Наиболее перспективным подходом, по нашему мнению, является расчетный подход, позволяющий без привлечения экспериментальных данных моделировать движение жидкости, что особенно актуально при разработке новых конструкций аппаратов. Построение модели движения и определение циркулирующей в слое загрузки по известным полям скоростей является отдельной задачей.

Проведенный ранее анализ [1] динамики движения пара в слое позволяет принять следующие допущения:

- температура пара в пузырьке равна температуре насыщения при данном давлении ( $t_n = \text{const}$ );
- скорость всплытия пузырька равна равновесной скорости пузырька этого размера ( $v = v(r)$ );
- температура жидкости во всех точках барботируемого слоя считается постоянной ( $t_2 = \text{const}$ ).

Предложенное описание движения теплоносителей и принятые допущения позволяют представить структуру фазового пространства в виде, показанном на рис. 2. В качестве геометрических координат рассматриваются ширина  $x$  и высота  $z$  барботируемого слоя, в качестве третьей координаты – вертикальная скорость или размер пузырьков пара  $r$ , который в соответствии со сделанными допущениями однозначно связан со скоростью. Четвертая координата  $\Phi$ , принимающая дискретные значения, характеризует тип теплоносителя и его фазовое состояние:  $\Phi = [1(\text{пар}) 2(\text{вода}) 3(\text{газ в паре}) 4(\text{газ в воде})]$ . Для пара ( $\Phi = 1$ ) фазовое подпространство представляется набором областей, каждая из которых относится к пузырькам определенного размера (рис. 2,а). Для воды ( $\Phi = 2$ ) структура фазового подпространства представлена на рис. 2,б. На рис. 2,в,г показаны структуры фазовых подпространств для газа в паровой фазе ( $\Phi = 3$ ) и газа в жидкой фазе ( $\Phi = 4$ ). Перечисленные области могут быть наглядно представлены в виде трехмерного фазового пространства (рис. 2,ж).

Искомая плотность распределения вещества по ячейкам представляется при построении расчетной схемы модели одномерным вектором  $\mathbf{S} = \{S_{ij}\}$ , где индекс  $i$  соответствует номеру ячейки (рис. 2). Алгоритм расчета искомого распределения  $\mathbf{S}$  в произвольные моменты времени включает следующие этапы [8]. Сначала для каждой ячейки фазового пространства определяются номера ячеек, с которыми она может взаимодействовать. Затем составляются уравнения теплового и материального балансов для опре-

деления потоков энергии или вещества между этими ячейками. Известные потоки энергии и массы позволяют определить потоки вероятностей переходов за рассматриваемый промежуток времени  $\Delta t$ . Суммирование потоков вероятностей из всех ячеек в  $i$ -ю ячейку системы определяет ее состояние в следующий момент времени:

$$S_i^{k+1} = \sum_j S_j^k p_{ij}, \quad (1)$$

где  $p_{ij}$  – вероятность перехода из  $j$ -й ячейки в  $i$ -ю; верхний индекс показывает номер шага по времени.

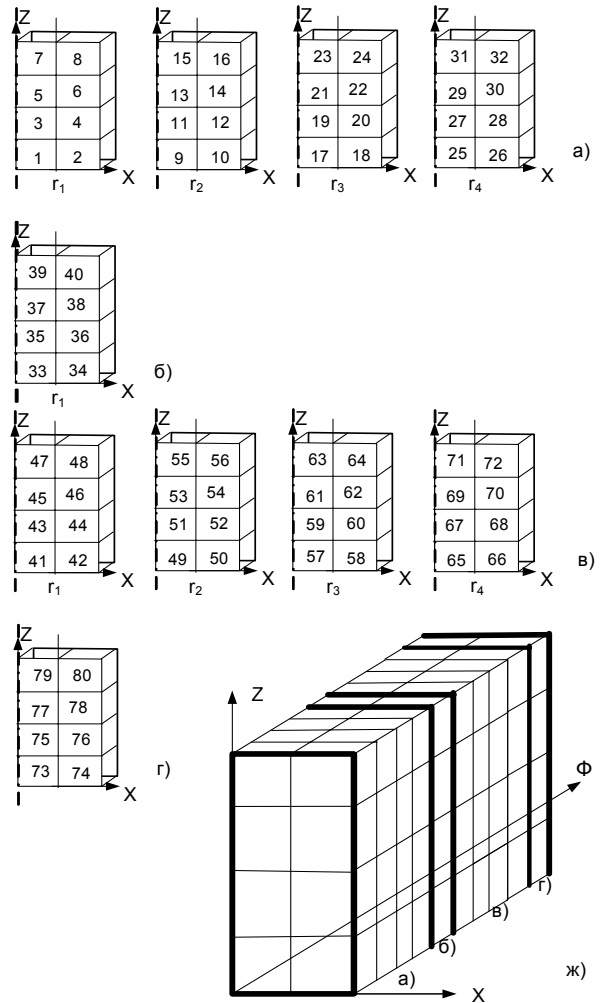


Рис. 2. Порядок нумерации ячеек для пара (а), воды (б), газа в паровой фазе (в), газа в жидкой фазе (г) и расчетное представление структуры фазового пространства барботажной ступени деаэратора (ж)

Для определения вероятностей переходов между ячейками фазового пространства  $p_{ij}$  используется метод конечных объемов [9], который при описании системы оперирует аналитическими решениями частных задач для отдельных подсистем. В частности, при сделанных допущениях о постоянном значении температуры пара в состоянии насыщения температура воды в слое определяется из уравнения теплового баланса

$$t_2 = \frac{kFt_n + t_{20}c_2Q_{20}}{kF + c_2Q_{20}}, \quad (2)$$

где  $F = \sum_i S_i^k f_i$  – площадь межфазной поверхности,  $f_i$  – удельная межфазная поверхность, приходящаяся на единицу массы  $i$ -й фракции;  $k$  – коэффициент теплопередачи;  $t_n$  – температура насыщения пара в деаэраторе;  $Q_{20}$  – расход воды на входе в ступень;  $c$  – удельная теплоемкость воды.

Поток (или скорость) вероятности перехода массы вдоль оси  $\Phi$  при конденсации пара для пузырьков  $i$ -й крупности находится из уравнения теплового баланса с учетом уравнения теплопередачи [2]

$$p'_{\Phi i} = \frac{k(t_n - t_2)f_i}{r}, \quad (3)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования.

Конденсация пара обуславливает уменьшение размера пузырька. Скорость дрейфа вдоль оси размера пузырьков  $r$  для пара определяется из уравнения баланса масс в виде

$$p'_{ri} = \frac{1 - (1 - p'_{\Phi i})^{1/3}}{\Delta r_i / r_i}, \quad (4)$$

где  $\Delta r_i$  – размер ячейки вдоль оси  $r$ .

Движение пара вдоль вертикальной оси происходит с равновесной для каждой фракции скоростью, при этом поток вероятности перехода пара по оси  $z$  находится из выражения

$$p'_{zi} = \frac{v_i}{\Delta z}, \quad (5)$$

где  $v$  – скорость пузырька выделенного размера, определяемая согласно экспериментальным данным [2, 3];  $\Delta z$  – размер ячейки вдоль оси  $z$ .

Считая значения скорости вероятностей переходов для ячейки за малое время  $\Delta\tau$  постоянными, составляется балансовое дифференциальное уравнение, описывающее изменение содержания ячейки, в виде [7]

$$\frac{dS}{S d\tau} = -(p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi}). \quad (6)$$

Из решения полученного дифференциального уравнения вероятность вещества остаться в рассматриваемой ячейке представляется в виде

$$p_{oi} = \frac{S_i}{S_{oi}} = \exp(-(p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi})\Delta\tau). \quad (7)$$

Считая, что вероятности перехода за время  $\Delta\tau$  пропорциональны скоростям этих вероятностей, получим расчетные зависимости для вероятностей переходов массы пара вдоль координат  $\Phi$ ,  $r$ ,  $z$  соответственно:

$$\begin{aligned} p_{\Phi i} &= (1 - p_{oi}) \frac{p'_{\Phi i}}{p'_{\Phi i} + p'_{ri} + p'_{zi}}; \\ p_{ri} &= (1 - p_{oi}) \frac{p'_{ri}}{p'_{\Phi i} + p'_{ri} + p'_{zi}}; \\ p_{zi} &= (1 - p_{oi}) \frac{p'_{zi}}{p'_{\Phi i} + p'_{ri} + p'_{zi}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для самых мелких пузырьков считается, что их переход в более мелкий класс соответст-

вует «схлопыванию» пузырьков и переходу их массы в жидкую фазу:

$$\tilde{p}_{\Phi 1} = p_{\Phi 1} + p_{r1}; \quad p_{r1} = 0. \quad (9)$$

Вычисленные вероятности переходов по воде и пару позволяют определить массовые концентрации газа в воде и паре. Разность концентраций газа в воде и паре обуславливает процесс деаэрации [5]:

$$\Delta G_g = k_m(k_g S_{i5} / S_{i3} - S_{i4} / S_{i2})\Delta\tau, \quad (10)$$

где  $\Delta G_g$  – массовый поток газов от воды к пару;  $i_1, i_2, i_3, i_4, i_5$  – индексы относятся к ячейкам воды, пара, газа в воде и газа в паре соответственно (рис. 2);  $k_m$  – коэффициент массопереноса;  $k_g$  – константа фазового равновесия, вычисляемая через коэффициент Генри [5].

Численный пример решения задачи выполнен для следующих исходных данных:  $Q_{20} = 100$  кг/с;  $t_{20} = 95$  °С;  $c_2 = 4180$  Дж/(кг·К);  $r = 2452,84$  кДж/кг;  $t_n = 100$  °С. Рабочее пространство разделено на ячейки со следующими векторами значений фазовых координат:  $x = [0,1 \ 1 \ 5 \ 10]$ , мм;  $z = [0,25 \ 0,5 \ 0,75 \ 1]$ , м;  $\Phi = [1(\text{пар}) \ 2(\text{вода}) \ 3(\text{газ в паре}) \ 4(\text{газ в воде})]$ . Рабочий объем ступени разбит на 80 ячеек, порядок нумерации которых показан на рис. 2: номера ячеек с 1 по 32 относятся к пару; с 33 по 40 – к воде; с 41 по 72 – к газу в паровой фазе; с 73 по 80 – к газу в жидкой фазе. Подача пара в ячейку с заданным номером одновременно показывает размер подаваемых пузырьков и геометрическую координату точки подачи, газ в деаэратор поступает с водой в верхние ячейки аппарата ( $i = 80$ ).

На рис. 3 приведены результаты предварительных расчетных исследований по расчетной стабилизации материальных потоков на выходе из ступени для воды и пара. Результаты расчета показывают, что стабилизация потоков пара происходит через 10 итераций, воды – через 300 итераций (временных шагов), что связано с более медленным, по сравнению с паром, движением воды в аппарате.

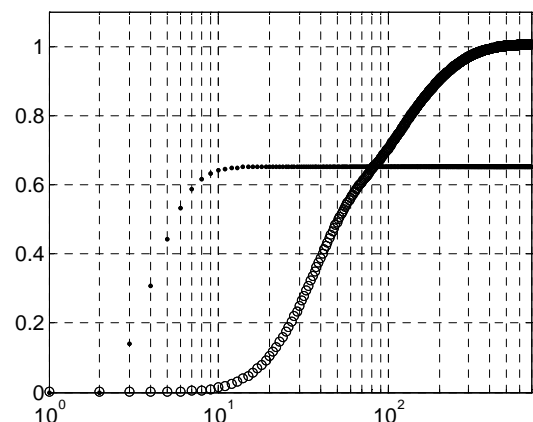


Рис. 3. Зависимость материальных потоков пара (точки) и воды (кружки) на выходе из ступени от числа итераций

Результаты расчетного исследования деаэрации воды в слое показаны на рис. 4. В качестве исследуемого параметра выбран коэффи-

циент  $K$ , равный отношению циркуляционной составляющей скорости к расходной скорости. Расход пара при этом оставался постоянным для всех вариантов расчета. На практике изменение параметра  $K$  может быть реализовано путем варьирования условий подачи пара в слой.

Разработанная модель движения жидкости в барботажном слое позволила развить модель деаэрации путем учета циркуляционной составляющей потока жидкости, что, в свою очередь, при наличии параметров идентификации модели позволяет проводить расчетные исследования влияния на эффективность деаэрации воды способов подачи барботажного пара и режимов парового барботажа в деаэрационных баках.

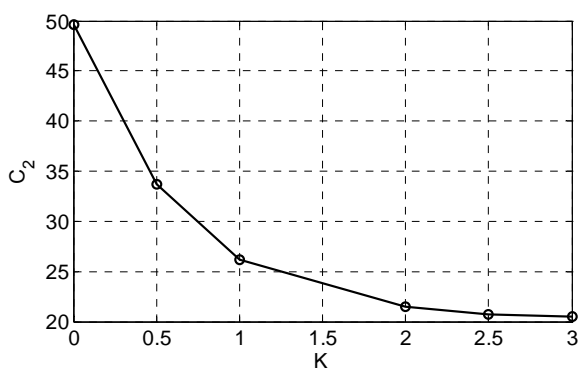


Рис. 4. Зависимость остаточного содержания газа в воде ( $C_2$ , мкг/кг) от относительной скорости циркуляции жидкости в потоке

#### Список литературы

1. **Эволюция** межфазной поверхности теплообмена в барботируемом слое / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, А.Ю. Ненаездников и др. // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 12–16.
2. **Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.** Гидродинамика газо-жидкостных систем. – М.: Энергоиздат, 1958. – 232 с.
3. **Кутателадзе С.С.** Теплопередача при конденсации и кипении. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1952. – 231 с.
4. **Ледуховский Г.В.** Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2008. – 226 с.

**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

**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

**Ненаездников Александр Юрьевич,**

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

**Беляков Антон Николаевич**

5. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы / Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003. – 560 с.

6. **Вулис Л.А.** Теория и расчет магнитогазодинамических течений в каналах. – М.: Атомиздат, 1971. – 384 с.

7. **Оптимальное** управление межфазной поверхностью в барботажной ступени атмосферных деаэраторов / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, А.Ю. Ненаездников и др. // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 58–61.

8. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет многомерных совмещенных процессов измельчения, классификации в сыпучих средах» №2010612671 от 19 апреля 2010 года / А.Н. Беляков, В.П. Жуков, А.А. Власюк, А.Е. Барочкин.

9. **Рояк М.Э., Соловейчик Ю.Г., Шурина Э.П.** Сеточные методы решения краевых задач математической физики. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 120 с.

#### References

1. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Nenaezdnikov, A.Yu., Belyakov, A.N., Roslyakov, A.N. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 3, pp. 12–16.
2. Kutateladze, S.S., Styrikovich, M.A. *Gidrodinamika gazo-zhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow, Energoizdat, 1958. 232 p.
3. Kutateladze, S.S. *Teploperedacha pri kondensatsii i kipenii* [Heat transfer in Condensation and Boiling Conditions]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury, 1952. 231 p.
4. Leduhovsky, G.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii desorbtsii kisloroda v struyno-barbotazhnykh deaeratorakh atmosferno davleniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Technological Development of Oxygen Desorption in Spray-bubble Atmospheric Deaerator. Thesis of Candidate of Engineering]. Ivanovo, 2008. 226 p.
5. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Thermal Deaerators]. Ulyanovsk, UGTU, 2003. 560 p.
6. Vulis, L.A. *Teoriya i raschet magnitogazodinamicheskikh techeniy v kanalakh* [Theory and Designing the Magnetic Gas Dynamic Flows in Channels]. Moscow, Atomizdat, 1971. 384 p.
7. Barochkin, E.V., Zhukov, V.P., Nenaezdnikov, A.Yu., Belyakov, A.N., Roslyakov, A.N. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 3, pp. 58–61.
8. Belyakov, A.N., Zhukov, V.P., Vlasjuk, A.A., Barochkin, A.E. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM «Raschet mnogomernykh sovmeshchennykh protsessov izmel'cheniya, klassifikatsii v sypuchikh sredakh»* [Certificate of State Registration of Computer Program «Calculation of Multidimensional Combined Process of Grinding, Classification in Granulated Solids»], no. 2010612671, 2010.
9. Royak, M.E., Soloveychik, Yu.G., Shurina, E.P. *Setochnye metody resheniya kraevykh zadach matematicheskoy fiziki* [Grid Solution Method of Boundary Problems in Mathematical Physics]. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 1998. 120 p.

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, докторант кафедры прикладной математики,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,  
телефон (4932) 26-97-45.

*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

*Зимин Артём Павлович*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
студент,  
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31.