

УДК 621.311.22

## Комбинаторный подход к моделированию формирования межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревых деаэраторах<sup>1</sup>

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

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** При расчете процессов теплообмена и массообмена в деаэрационных установках межфазная поверхность и коэффициенты тепло- и массообмена обычно не разделяются в ходе расчета, а рассматриваются в виде единого комплекса. Такой подход положен в основу существующих методов расчета, базирующихся на теории подобия. К недостаткам подхода можно отнести применимость полученных результатов только для исследованных конструкций деаэраторов. Независимое или раздельное определение межфазной поверхности и коэффициентов переноса открывает новые возможности для оптимального управления совмещенными процессами тепло- и массообмена, поскольку позволяет раздельно учитывать влияние отдельных конструктивных или режимных параметров. В связи с этим актуальным является проведение теоретических исследований формирования площади межфазной поверхности для центробежно-вихревых деаэраторов в целях определения оптимальных конструкций и эффективных режимов их работы.

**Методы и материалы:** Описание процесса формирования межфазной поверхности в центробежно-вихревом деаэраторе проводится на основе используемого при математическом моделировании процессов фракционирования комбинаторного подхода. При этом используется аналогия между процессами фракционирования и парообразования.

**Результаты:** Разработан метод определения межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревых деаэраторах. Проведены численные эксперименты. Показана непротиворечивость результатов моделирования условиями предельных переходов и известным литературным данным.

**Выводы:** На основе предложенного метода определения площади межфазной поверхности в центробежной ступени вихревого деаэратора появилась возможность решения задач по совершенствованию конструкций и режимов работы центробежно-вихревых деаэраторов.

**Ключевые слова:** площадь межфазной поверхности, комбинаторный подход, центробежный поток, вихревой поток, двухфазная среда, предельные переходы.

## A combinatorial approach to modeling of interfacial surface formation in a superheated liquid in centrifugal-vortex deaerators

A.N. Roslyakov, V.P. Zhukov, G.V. Ledukhovsky, E.V. Barochkin  
<sup>1</sup>Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

### Abstract

**Background:** In calculations of heat and mass transfer in deaeration units, the interfacial surface and heat and mass transfer coefficients are not usually separated and are considered as a single complex. This approach is the basis of the existing calculation methods based on the similarity theory. One of the approach disadvantages is that its results can only be applied to the investigated structures of deaerators. An independent or separate determination of interfacial surface and transport coefficients offers new opportunities for the optimal control of heat and mass transfer combined processes as it enables independent consideration of separate design and mode parameters. Therefore, it is urgent to conduct desk studies of interfacial area formation in centrifugal-vortex deaerators in order to determine their optimal constructions and effective operation modes.

**Methods and materials:** The interfacial area formation in the centrifugal-vortex deaerator is described according to a combinatorial approach used in mathematical modeling of fractionation. It employs an analogy between the processes of fractionation and evaporation.

**Results:** The authors have developed a method of interfacial surface determination in the superheated liquid of centrifugal-vortex deaerators, conducted numerical experiments, and confirmed the correspondence between the simulation results and the conditions of limiting transitions and the published data.

**Conclusions:** Based on the proposed method of determining the interfacial area in the centrifugal stage of the vortex deaerator, the authors found a solution to the problems of centrifugal-vortex deaerator design and operation mode improvement.

**Key words:** interfacial area, combinatorial approach, centrifugal flow, vortex flow, two-phase medium, limiting transitions.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №15-08-01684.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.064-069

Наряду с традиционными струйными, барботажными, пленочными деаэрационными установками [1–3] центробежно-вихревые деаэрационные установки [6] широко используются на тепловых электрических станциях и в котельных для предотвращения коррозии энергетического оборудования путем удаления из воды коррозионно-активных газов. В настоящее время все большую популярность приобретает центробежно-вихревой деаэратор (ДЦВ) конструкции Б.А. Зимина [6], в котором удалось существенно интенсифицировать процесс массообмена за счет вихревой организации потока в рабочей зоне. Выбор типоразмера и технологических режимов таких аппаратов происходит обычно на основе экспериментальных исследований или обобщения опыта эксплуатации существующих установок. Экспериментальные исследования процессов деаэрации в этих аппаратах, несмотря на свои очевидные преимущества, связаны с существенными временными и ресурсными затратами. В связи с этим проведение теоретических исследований процессов тепломассопереноса в центробежно-вихревых деаэраторах в целях определения эффективных режимов их эксплуатации является актуальным. Одним из направлений теоретических исследований процесса деаэрации является независимое определение площади межфазной поверхности и коэффициентов переноса тепловой энергии и вещества между жидкостью и газом [4, 5]. В традиционных методах расчета, применяемых в энергетике и химической промышленности, используется обычно комплекс из указанных параметров. Раздельное определение этих параметров позволяет формулировать и решать задачи по оптимальному управлению процессами переноса в деаэраторах и задачи выбора оптимального режима эксплуатации деаэрационных установок.

Целью исследования является разработка метода расчета межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревом деаэраторе для постановки и решения задач повышения эффективности его работы.

Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- определение на основе комбинаторного подхода распределения капель (фрагментов) жидкости по размерам в перегретой жидкости в центробежно-вихревом деаэраторе;

- разработка и тестирование метода определения площади межфазной поверхности в центробежно-вихревом деаэраторе.

Объектом исследования является центробежно-вихревой деаэратор конструкции Б.А. Зимина, в который для дегазации подается перегретая вода [6]. Предметом исследования являются процессы формирования межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревом деаэраторе.

Принципиальная схема центробежно-вихревого деаэратора приведена на рис. 1. Деаэратор состоит из корпуса 1, встроенного в центробежный сепаратор 2. Через центральное отверстие в верхней крышке 3 корпуса 1 проходит труба для отвода пара 4. В части корпуса 1, встроенной в центробежный сепаратор 2, имеются окна 5, расположенные над днищем 6 корпуса. Направляемая на деаэрацию вода, перегретая относительно температуры насыщения при давлении в паровом пространстве деаэратора, подается через тангенциальные подводные патрубки 7. Благодаря тангенциальному подводу, поток воды приобретает вращательное движение внутри корпуса. Для организации вихревого потока воды имеется кольцевая перегородка 8, разделяющая входной и выходной отсеки корпуса 1. Из выходного отсека корпуса 1 через окна 5 вода поступает в центробежный сепаратор 2. Для предотвращения гашения вихря воды вместо окон 5 могут быть использованы короткие тангенциальные патрубки. Отвод воды из центробежного сепаратора 2 осуществляется через специальные тангенциальные патрубки.

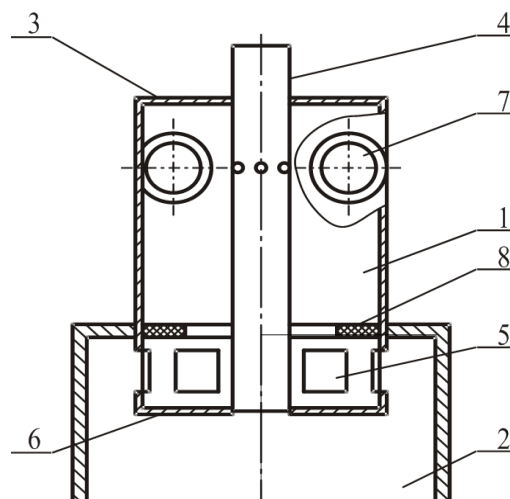


Рис. 1. Конструктивная схема центробежно-вихревого деаэратора: 1 – корпус; 2 – центробежный сепаратор; 3 – верхняя торцевая крышка корпуса; 4 – трубопровод отвода пара; 5 – окна для отвода воды из корпуса; 6 – днище корпуса; 7 – подводные тангенциальные патрубки; 8 – кольцевая перегородка (шайба)

При попадании перегретой жидкости в деаэратор с пониженным давлением среды происходит мгновенное ее вскипание, при этом часть жидкости переходит в пар.

Известно [7], что у воды межмолекулярные энергетические связи, по сравнению с аналогичными связями между молекулами пара, значительно сильнее. В термодинамике [7] для характеристики энергии, которую нужно затратить на испарение порции жидкости единичной массы, используется понятие удельной теплоты парообразования [7]. Перегретое состояние воды харак-

теризуется повышением ее температуры по сравнению с температурой насыщения. Вода в перегретом состоянии обладает, по сравнению с водой в состоянии насыщения, избыточной энергией, которая приводит к разрыву межмолекулярных связей, однако пузырьки пара при этом не всегда успевают образоваться. При построении модели формирования межфазной поверхности считаем, что в перегретом состоянии избыточная энергия расходуется на разрыв части межмолекулярных связей между молекулами воды. Другими словами, часть молекул перегретой воды за счет подвода энергии освобождается от межмолекулярных связей с другими молекулами воды.

При подводе энергии, достаточной для разрыва всех связей, вся жидкость переходит в пар. При подводе меньшего количества энергии только часть воды переходит в пар. Доля образовавшегося пара из перегретой жидкости определяется отношением энергии перегрева к теплоте парообразования согласно выражению

$$x = \frac{c\Delta T}{r} = \frac{1}{Ku}, \quad (1)$$

где  $x$  – степень сухости или доля пара в смеси;  $c$  – удельная теплоемкость воды;  $r$  – удельная теплота парообразования;  $Ku$  – критерий Кутателадзе;  $\Delta T$  – перегрев воды относительно температуры насыщения при данном давлении.

Ранее нами [8] в рамках комбинаторного подхода была решена задача фракционирования – определения распределения фрагментов по размерам при разрушении за счет внешнего подвода энергии. В силу выявленной аналогии между процессами фракционирования и парообразования целесообразно использовать расчетные комбинаторные зависимости [8] для решения задачи по распределению капель (фрагментов) жидкости при парообразовании. Суть указанной аналогии и используемые при этом обозначения иллюстрирует табл. 1.

Таблица 1. Аналогии в постановке задач фракционирования и парообразования в перегретой воде при заданном подводе энергии

Обозначение	Задача фракционирования [6]	Задача парообразования
$N$	Число элементов минимального размера в порции вещества единичной массы	Число молекул в порции воды единичной массы
$e$	Единичная энергия, достаточная для отделения одного элемента минимального размера	Единичная энергия, достаточная для перехода молекулы из жидкой фазы в пар
$K$	Число единиц подведенной энергии	Число единиц подведенной энергии
$i$	Размер наблюдаемого фрагмента, измеряемый числом содержащихся в нем элементов минимального размера	Размер капли (фрагмента) воды, измеряемый числом содержащихся в ней молекул воды
$f'_i$	Искомое массовое распределение фрагментов (осколков) по размерам	Искомое массовое распределение капель воды по размерам или числу содержащихся в них молекул

Выявленная аналогия между процессами фракционирования и парообразования позволяет воспользоваться известным решением задачи фракционирования [8] для описания процесса парообразования в перегретой воде. При этом задача описания процесса парообразования может быть сформулирована следующим образом: определить распределение капель воды по размерам при заданном подводе энергии. Для решения задачи парообразования введем, согласно табл. 1, следующие обозначения. Обозначим через  $N$  число молекул в порции воды единичной массы, через  $K$  – число единиц подведенной энергии, каждая из которых приводит к переходу одной молекулы из жидкости в пар. Полученное ранее [8] решение задачи фракционирования с учетом введенных обозначений позволяет для определения распределения капель воды по размеру использовать следующую формулу:

$$f'_i = \frac{(N-i-1)!(N-K-1)!}{(N-i-K)!N!} iK(K+1), \quad (2)$$

где  $N$  – число молекул в порции воды единичной массы;  $i$  – число молекул воды в капле;  $K$  – число единиц подведенной энергии.

Число единиц подведенной энергии при заданной величине перегрева воды  $\Delta T$  находится через отношение подведенной энергии к энергии, необходимой для перехода в паровую фазу одной молекулы:

$$K = \frac{c\Delta T}{e}.$$

Единичная энергия, необходимая для перехода одной молекулы из жидкой фазы в паровую фазу, определяется отношением удельной теплоты парообразования  $r$  к числу молекул в порции воды единичной массы:

$$e = \frac{r}{N}. \quad (3)$$

Очевидно, что при отсутствии подвода энергии ( $K = 0$ ) система остается в жидком состоянии, а при подводе энергии, достаточной для разрыва всех связей ( $K = N - 1$ ), все молекулы из жидкой фазы переходят в пар.

Если капля воды содержит одну молекулу ( $i = 1$ ), то такое состояние соответствует ее переходу в пар. В этом случае доля несвязанных (свободных) молекул пара в пароводяной смеси определяется с учетом (2) в виде

$$f'_1 = \frac{K(K+1)}{N(N-1)}. \quad (4)$$

Если в капле воды содержится две молекулы ( $i = 2$ ), то выражение (2) записывается в виде

$$f'_2 = \frac{K(K+1)}{N(N-1)} \frac{2(N-K-1)}{(N-2)} = f'_1 \frac{2(N-K-1)}{(N-2)}. \quad (5)$$

Анализ выражений (2), (4) и (5) показывает, что массовая доля капель воды произвольного размера  $i$  молекул может быть найдена из ре-

куррентного соотношения по известной массовой доле капель более мелкого ( $i - 1$ ) размера в виде

$$f'_i = f'_{i-1} \frac{i}{(i-1)} \frac{(N-K-i+1)}{(N-i)}. \quad (6)$$

Результаты расчетного анализа, проведенного согласно зависимостям (1)–(6), представлены на рис. 2, где вдоль оси абсцисс отложено отношение числа разорванных связей к максимальному числу связей ( $K(N - 1)$ ), вдоль оси ординат – доля образовавшегося при этом пара (при  $i = 1$ ) и доля капель более крупных размеров (при  $i = 2, 3, 4, 10$ ).

Для линейной структуры межмолекулярных связей без снижения общности подхода массовая доля молекул, которые находятся на межфазной поверхности, может быть определена через отношение соответствующих массовых долей к числу молекул в капле. Обоснование этого положения для молекул линейной структуры иллюстрирует табл. 2. Черным цветом в таблице условно показаны молекулы пара, белым – молекулы воды, а серым цветом закрашены молекулы, которые находятся на границе раздела фаз, т. е. образуют межфазную поверхность.

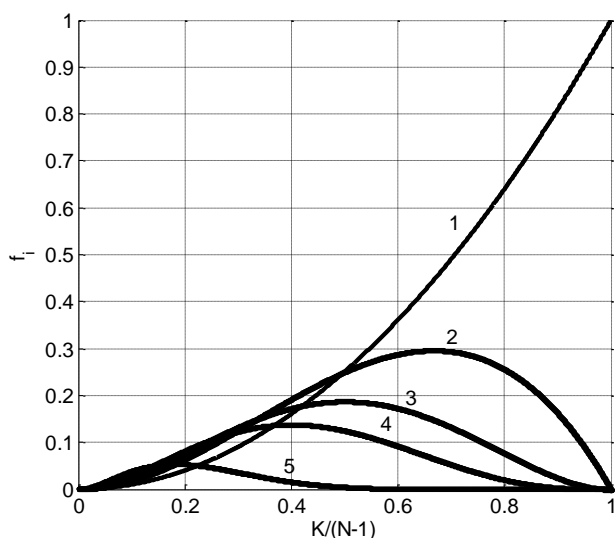


Рис. 2. Расчетные зависимости массовой доли капель воды разного размера от подведенной энергии: 1 –  $i = 1$  (пар); 2 –  $i = 2$ ; 3 –  $i = 3$ ; 4 –  $i = 3$ ; 5 –  $i = 10$

Таблица 2. К моделированию формирования межфазной поверхности

Модельное представление фрагмента жидкости линейной структуры	Число молекул в капле	Массовая доля молекул пара на поверхности
	$i=1$	$\frac{f'_1}{1}$
	$i=2$	$\frac{f'_2}{2}$
	$i=3$	$\frac{f'_3}{3}$
	$i$	$\frac{f'_i}{i}$

Свободная молекула с полностью разорванными межмолекулярными связями ( $i = 1$ ) принадлежит к молекулам пара. Для капли из двух молекул ( $i = 2$ ) обе молекулы принадлежат межфазной поверхности, а между самими этими молекулами внутрифазовая связь не разорвана. Каждая из этих молекул с точки зрения энергетических затрат наполовину принадлежит пару, а наполовину воде. На основании этого положения считается, что к паровой фазе принадлежит половина молекул, находящихся на поверхности капель этого размера. Для фрагмента (капли) из трех молекул ( $i = 3$ ) две молекулы, каждая из которых имеет по половине необходимой для перехода в пар энергии, находятся на границе, а их массовая доля определяется как одна треть массовой доли фрагментов этого размера. Аналогичные рассуждения определяют массовую долю молекул пара, находящихся на межфазной поверхности, для капель произвольного размера, через отношение массовой доли капель к числу молекул в этой капле  $f'_i/i$ . Общая массовая доля связанных молекул пара  $f_s$ , принадлежащих межфазной поверхности, определяется суммой массовых долей молекул, находящихся на поверхности соответствующих фрагментов:

$$f_s = \sum_i \frac{f'_i}{i}. \quad (7)$$

Массовая доля свободных молекул пара с полностью разорванными межмолекулярными межфазными связями  $f_v$ , которые не принадлежат к межфазной поверхности, определяется долей капель, состоящих из одной молекулы:

$$f_v = f'_1. \quad (8)$$

Общая доля пара в смеси определяется суммой массовых долей свободных и связанных молекул пара. Общая, суммарная доля пара, в технической термодинамике обозначаемая как степень сухости [7, 9], может быть представлена в виде

$$x = f_v + f_s. \quad (9)$$

Для тестирования предложенной модели формирования межфазной поверхности проведены специальные расчетные исследования. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 3 в виде зависимостей доли пара от подведенной энергии: кривая 1 соответствует доле свободных молекул пара согласно (4); кривая 2 – доле связанных молекул пара межфазной поверхности согласно (7); кривая 3 – суммарной доле свободных и связанных молекул пара согласно (9).

Линейная зависимость степени сухости от подведенной энергии (кривая 3) подтверждает обоснованность и достоверность полученных результатов, так как совпадает с известными термодинамическими соотношениями [7, 9].

Результаты, приведенные на рис. 2, 3, удовлетворяют условию предельных переходов с точки зрения подведенной энергии. При отсутствии подвода энергии доля пара, или степень

сухости, равна нулю, а при полностью разрушенных межмолекулярных связях – вся жидкость переходит в пар. При этом массовая доля молекул межфазной поверхности имеет максимум при разрыве примерно половины всех связей. Данный результат может рассматриваться как подтверждение обоснованности и непротиворечивости предложенного подхода к определению площади межфазной поверхности.

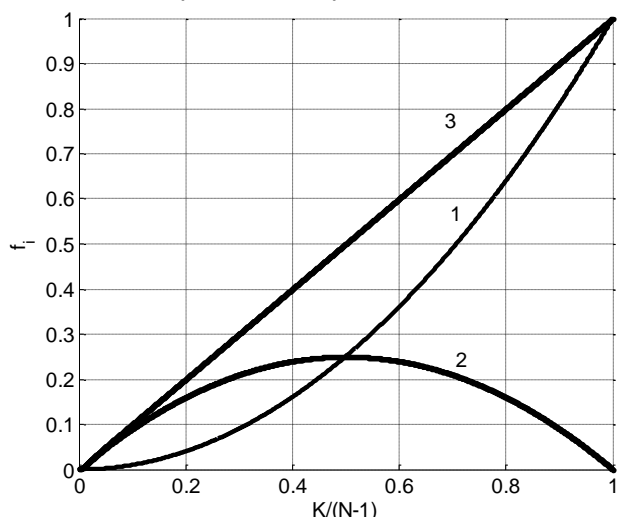


Рис. 3. Расчетные зависимости доли пара от доли подведенной энергии на парообразование: 1 – доля свободных молекул пара согласно (4); 2 – доля связанных молекул пара согласно (7); 3 – суммарная доля свободных и связанных молекул пара согласно (7)

Площадь межфазной поверхности  $S$  определяется произведением числа молекул в порции единичной массы  $N$ , массовой доли молекул межфазной поверхности  $f_s$  и эффективной площади сечения одной молекулы  $S_0$ :

$$S = N f_s S_0. \quad (10)$$

Результаты расчетного анализа площади межфазной поверхности для условий, характерных для центробежно-вихревого деаэратора, представлены на рис. 4.

Полученные результаты позволяют по заданной величине перегрева жидкости однозначно определить площадь межфазной поверхности и по экспериментальным данным вычислить коэффициенты переноса тепловой энергии и вещества в перегретой жидкости в условиях центробежно-вихревого деаэратора. Дальнейшее развитие предложенного подхода позволит формулировать и решать задачи по независимому управлению межфазной поверхностью для повышения эффективности процессов деаэрации в перегретой жидкости в условиях, характерных для центробежно-вихревых деаэраторов.

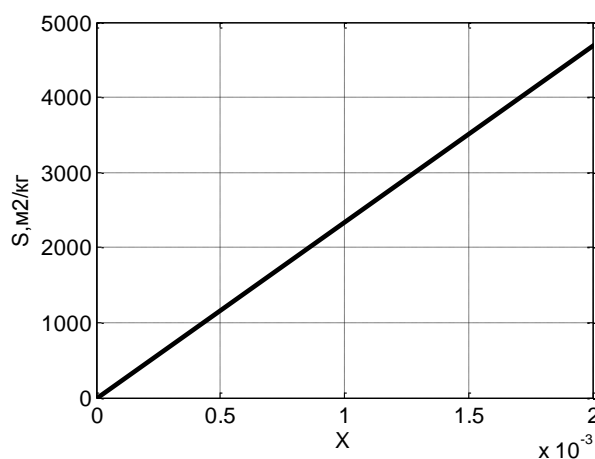


Рис. 4. Зависимость площади межфазной поверхности от обратной величины критерия Кутателадзе или степени сухости для условий потока в центробежно-вихревом деаэраторе

#### Список литературы

1. Шаратов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 560 с.
2. Шаратов В.И. Деаэрация воды в теплогенерирующих установках малой мощности // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 5. – С. 16–22.
3. Модернизация термических деаэраторов на ТЭЦ / А.Г. Лаптев, И.Ю. Силов, А.Н. Долгов, М.М. Фарахов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 2. – С. 12–14.
4. Эволюция межфазной поверхности теплообмена в барботируемом слое / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, А.Ю. Ненаезников и др. // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 12–16.
5. Оптимальное управление межфазной поверхностью в барботажной ступени атмосферных деаэраторов / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, А.Ю. Ненаезников и др. // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 58–62.
6. Пат. 2131555 Российская Федерация F22D1/50, C02F1/20, B01D19/00. Деаэратор / Зимин Б.А.; заявитель и патентообладатель Зимин Б.А. № 97121266/06; заявл. 09.12.1997; опубл. 10.06.1999, Бюл. № 22 (I ч.). – 4 с.
7. Коновалов В.И. Техническая термодинамика. – Иваново, 2005. – 620 с.
8. Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S. Simulation of Grinding: New Approaches. – Ivanovo, 1997. – 108 p.
9. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

#### References

1. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ulyanovsk, UIGTU, 2003. 560 p.
2. Sharapov, V.I. *Novosti teplosnabzheniya*, 2007, issue 5, pp. 16–22.
3. Laptev, A.G., Silov, I.Yu., Dolgov, A.N., Farakhov, M.M. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2013, issue 2, pp. 12–14.
4. Barochkin, E.V., Zhukov, V.P., Nenaezdnikov, A.Yu., Belyakov, A.N., Roslyakov, A.N. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 12–16.
5. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Nenaezdnikov, A.Yu., Belyakov, A.N., Roslyakov, A.N. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 58–62.
6. Zimin, B.A. *Deaerator* [Deaerator]. Patent RF, no. 2131555, 1999.
7. Kononov, V.I. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical Thermodynamics]. Ivanovo, 2005. 620 p.
8. Mizonov, V., Zhukov, V., Bernotat, S. Simulation of Grinding: New Approaches. Ivanovo, 1997. 108 p.
9. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow, Khimiya, 1971. 784 p.

*Росляков Антон Николаевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант,  
телефоны: (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, зав. кафедрой прикладной математики,  
телефон (4932) 26-97-45,  
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

*Ледуховский Григорий Васильевич,*  
ФГБОУВПО «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,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций,  
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru