

## Оптимальное управление межфазной поверхностью в барботажной ступени атмосферных деаэраторов

Е.В. Барочкин<sup>1</sup>, В.П. Жуков<sup>1</sup>, А.Ю. Ненаездников<sup>2</sup>, А.Н. Беляков<sup>1</sup>, А.Н. Росляков<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:** Процессы движения газа, тепломассообмена и деаэрации в слое барботируемой жидкости традиционно рассматриваются раздельно, хотя их взаимное влияние весьма существенно.

**Методы и материалы:** Для совместного описания и оптимизации процессов тепломассообмена и деаэрации в барботажной ступени предложен подход, основанный на использовании кинетического уравнения Больцмана.

**Результаты:** На основе уравнения Больцмана разработана математическая модель процессов тепломассообмена и деаэрации воды в барботируемом слое, сформулирована и решена задача оптимального управления деаэрацией в барботажной ступени. Предложен новый подход к моделированию совмещенных процессов тепломассообмена и деаэрации в барботируемом слое жидкости, сформулирована и решена задача оптимального управления процессом.

**Выводы:** Полученные результаты могут быть использованы в целях обеспечения максимального энергосбережения в ступени деаэрации.

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

## Optimal control of interphase surface in bubbling stage of atmospheric deaerators

E.V. Barochkin<sup>1</sup>, V.P. Zhukov<sup>1</sup>, A.Y. Nenaezdnikov<sup>2</sup>, A.N. Belyakov<sup>1</sup>, A.N. Roslyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>2</sup>OSC «Severstal», Cherepovets, Russian Federation

E-mail: zhukov-home@yandex.ru

### Abstract

**Background:** The processes of gas flow motion, heat transfer and deaeration in a layer of bubbling liquid traditionally are considered separately, although their interference is of great significance.

**Materials and methods:** A new approach to combined description and optimization of heat and mass transfer and deaeration in a stage of bubbling based on the kinetic Boltzmann equation is proposed.

**Results:** A mathematical model of processes of heat and mass transfer and deaeration of water in a bubbling layer based on the Boltzmann equation is formulated, and the problem of optimal control of deaeration in bubbling stage is solved. A new approach to modeling combined processes of heat and mass transfer and deaeration is proposed.

**Conclusions:** The obtained results can be used to provide maximum energy saving in a stage of deaeration.

**Key words:** energy saving, deaeration, stage of bubbling, heat and mass transfer, the Boltzmann equation, optimal control, interphase surface.

**Введение.** Важную роль при деаэрации воды в барботажной ступени играет площадь межфазной поверхности, которая во многом обуславливает интенсивность тепло- и массообменных процессов [1, 2]. Нами ранее [3] рассмотрена задача движения и теплообмена между пузырьками пара и барботируемым слоем воды. Ниже сделана попытка развить подход для учета деаэрации воды в барботажной ступени. Актуальность совместного рассмотрения указанных процессов обуславливается их неразрывной связью. Известно, что чем меньше размер пузырьков, тем больше их удельная межфазная поверхность, приходящаяся на единицу массы пара, и тем интенсивней протекают тепломассообменные процессы в многофазной среде. Од-

нако при интенсивном теплообмене с водой мелкие паровые пузырьки могут «схлопываться», при этом уже абсорбированный при деаэрации газ возвращается в воду. Очевидно, существует какая-то оптимальная межфазная поверхность, которая обеспечивает наиболее эффективное совместное протекание процессов в барботажной ступени деаэратора. Поиск этой поверхности и методов ее организации является актуальной задачей для энергетики и смежных отраслей промышленности.

Объектом исследований является барботажная ступень атмосферного деаэратора с перфорированным паровым коллектором, погруженным в жидкость. Эскиз ступени с указанием основных потоков теплоносителей приведен

на рис. 1, а. Пар подается в слой жидкости снизу через 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.

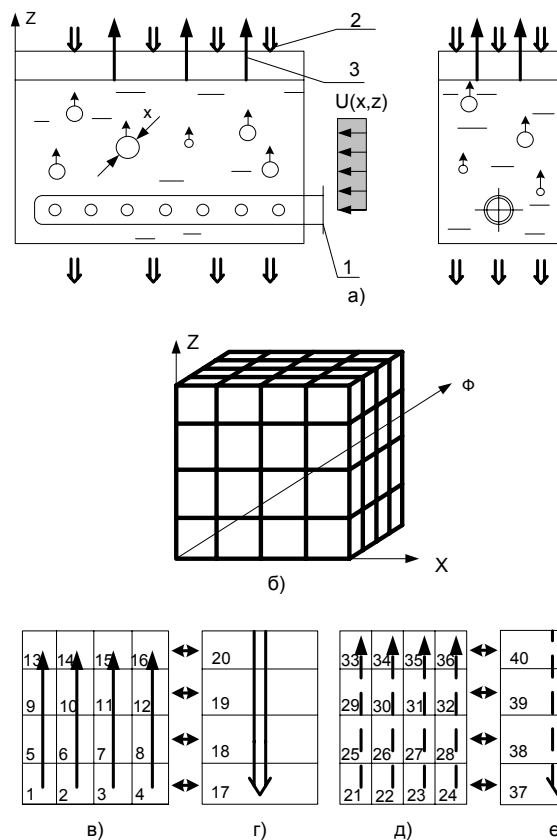


Рис. 1. Эскиз барботажной ступени деаэрации (а), расчетное фазовое пространство (б), схемы движения пара (в), воды (г), газа в паровой фазе (д) и газа в жидкой фазе (е)

Целью исследования является разработка энергосберегающих мероприятий при организации процесса деаэрации воды в барботажной ступени.

Для достижения цели последовательно выполняются следующие этапы:

- формулируется задача оптимального управления процессом деаэрации;
- разрабатывается математическая модель процесса деаэрации в барботажной ступени;
- находится решение оптимизационной задачи и анализируются полученные результаты.

**Постановка задачи оптимального управления процессом деаэрации.** Задача оптимального управления межфазной поверхностью в барботажной ступени формулируется в следующем виде: определить оптимальное распределение подачи пара в ступень по высоте слоя  $z$  и по размеру пузырьков  $x$   $U(x,z)$ , которое наилучшим образом обеспечивает протекание процесса деаэрации в барботажной ступени. В качестве критерия наилучшего протекания процесса выбирается минимальный расход пара (энергоносителя) на деаэрацию, при котором

обеспечивается заданное качество деаэрированной воды.

Математическая формулировка задачи записывается следующим образом:

$$Q_{10}(Y, U, \alpha) \Rightarrow \min_{U(x,z)}, \quad (1)$$

где  $Q_{10}$  – расход подаваемого в ступень пара;  $Y$  – вектор исходных данных;  $U(x,z)$  – искомое оптимальное управление процессом;  $\alpha$  – заданные ограничения, которые в нашем случае определяются требованиями к качеству воды. Целевая функция или критерий оптимизации определяется минимальным расходом пара, который соответствует наиболее эффективной с точки зрения энергосбережения организации процесса.

**Разработка математической модели деаэрации в барботажной ступени.** Для решения задачи оптимального управления разрабатывается модель теплообмена в барботажной ступени деаэратора, которая определяет связь между искомым управлением процессом, исходными данными и качеством деаэрированной воды.

В основу моделирования положено кинетическое уравнение Больцмана [4], которое позволяет описывать эволюцию плотности распределения вещества по выбранным фазовым координатам при совместном протекании двух и более процессов. В предлагаемом подходе искомой функцией является плотность распределения вещества по выбранному фазовому пространству. В качестве координат фазового пространства рассматриваются вертикальная геометрическая координата  $z$  и размер пузырька  $x$ . В качестве третьей координаты выбрана ось  $\Phi$ , вдоль которой откладываются дискретные значения, показывающие фазовое состояние и потоки теплоносителей: 1 – пар; 2 – вода; 3 – газ в паровой фазе; 4 – газ в жидкой фазе. Структура выбранного фазового пространства представлена на рис. 1,б.

Разработка модели на основе уравнения Больцмана заключается в разбиении рабочего объема аппарата на ячейки, в указании связей между ячейками и соответствующих этим связям вероятностей переходов. Если ячейка находится на границе рассматриваемого фазового пространства, то переходы за границу определяют соответствующими граничными условиями.

Проведенный ранее [3] расчетный анализ движения и теплообмена для одиночного пузырька показывает, что для атмосферных деаэраторов температура газа и скорость пузырька практически мгновенно (за время  $10^{-3}$  и  $10^{-4}$  с соответственно) достигают установившихся значений. Например, для перегретого пара в ходе теплообмена его температура быстро становится равной температуре насыщения. Дальнейший теплообмен между водой и пузырьком приводит к конденсации пара и, соответственно, к изменению размера парового пузырька. Скорость всплытия пузырька мгновенно становится равной равновесной скорости для пузырька установившегося раз-

мера [1]. В силу интенсивного перемешивания жидкости барботируемого слоя ее температура считается постоянной во всех точках.

Проведенный анализ позволяет при построении модели сделать следующие допущения:

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

Искомая плотность распределения вещества по ячейкам представляется при расчете одномерным вектором  $\mathbf{S} = \{S_i\}$ , где индекс  $i$  соответствует номеру ячейки согласно рис. 1. Алгоритм расчета искомого распределения  $\mathbf{S}$  в произвольные моменты времени включает следующие этапы. Сначала для каждой ячейки фазового пространства определяются номера ячеек, с которыми она может взаимодействовать. Затем составляются уравнения теплового и материального балансов для определения 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:

$$S_i^{k+1} = \sum_j S_j^k p_{ij}, \quad (2)$$

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

Для проведения расчетных исследований и численного решения уравнения Больцмана используются метод и программный пакет, на которые получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [5].

Для определения вероятностей переходов  $p_{ij}$  применяется метод конечных объемов [6], который при описании системы позволяет использовать аналитические решения частных задач для отдельных подсистем. В частности, при сделанных допущениях о постоянном значении температуры пара в состоянии насыщения температура воды в слое определяется из теплового баланса согласно выражения

$$t_2 = \frac{kFt_n + t_{20}c_2Q_{20}}{kF + c_2Q_{20}}, \quad (3)$$

где  $F = \sum_i S_i^k f_i$  – площадь межфазной поверхность;  $f_i$  – 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;  $c$  – теплоемкость воды.

Поток (или скорость) вероятности перехода массы вдоль оси  $\Phi$  при конденсации пара для

пузырьков  $i$ -й крупности находится из теплового баланса с учетом уравнения теплопередачи [2]

$$p'_{\Phi i} = \frac{k(t_n - t_2)f_i}{r}, \quad (4)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования.

Конденсация пара обуславливает уменьшение размера пузырька. Скорость дрейфа вдоль оси  $x$  определяется при этом из массового балансового соотношения в виде

$$p'_{xi} = \frac{1 - (1 - p'_{\Phi i})^{1/3}}{\Delta x_i / x_i}, \quad (5)$$

где  $\Delta x_i$  – размер ячейки вдоль оси  $x$ .

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

$$p'_{zi} = \frac{v_i}{\Delta z}, \quad (6)$$

где  $v$  – скорость пузырька, определяемая в работе согласно экспериментальным данным [1];  $\Delta z$  – размер ячейки вдоль оси  $z$ .

Считая значения скорости вероятностей переходов для ячейки за малое время  $\Delta t$  постоянными, составляется балансовое дифференциальное уравнение, описывающее изменение содержания ячейки, в виде [5]

$$\frac{dS}{S d\tau} = -(p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi}). \quad (7)$$

Решение полученного дифференциального уравнения позволяет определить вероятность вещества остаться в рассматриваемой ячейке следующим образом:

$$p_{oi} = \frac{S_i}{S_{oi}} = \exp(-(p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi})\Delta t). \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} p_{\Phi i} &= (1 - p_{oi}) \frac{p'_{\Phi i}}{p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi}}; \\ p_{xi} &= (1 - p_{oi}) \frac{p'_{xi}}{p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi}}; \\ p_{zi} &= (1 - p_{oi}) \frac{p'_{zi}}{p'_{\Phi i} + p'_{xi} + p'_{zi}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для самых мелких пузырьков считается, что их переход в более мелкий класс соответствует «схлопыванию» пузырьков и переходу их массы в жидкую фазу:

$$\tilde{p}_{\Phi 1} = p_{\Phi 1} + p_{x1}; \quad p_{x1} = 0. \quad (10)$$

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

$$\Delta G_g = k_m f (k_g S_{i5} / S_{i3} - S_{i4} / S_{i2}) \Delta t, \quad (11)$$

где  $\Delta G_g$  – массовый поток газов от воды к пару;  $i_2, i_3, i_4, i_5$  – индексы относятся к ячейкам воды,

пара, газа в воде и газа в паре соответственно (см. рис. 1);  $k_m$  – коэффициент массопереноса;  $k_g$  – параметр, аналогичный коэффициенту Генри.

Численный пример решения задачи выполнен для следующих исходных данных:  $Q_{20} = 100$  кг/с;  $t_{20} = 95$  °С;  $c_2 = 4180$  Дж/кг·К;  $r = 2452840$  Дж/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 40 ячеек, порядок нумерации которых показан на рис. 1: номера ячеек с 1 по 16 относятся к пару; с 17 по 20 – к воде; с 21 по 36 – к газу в паровой фазе; с 37 по 40 – к газу в жидкой фазе. Подача пара в ячейку с заданным номером одновременно показывает размер подаваемых пузырьков и геометрическую координату точки подачи, воздух в деаэрактор поступает с водой в верхние ячейки аппарата ( $i = 40$ )

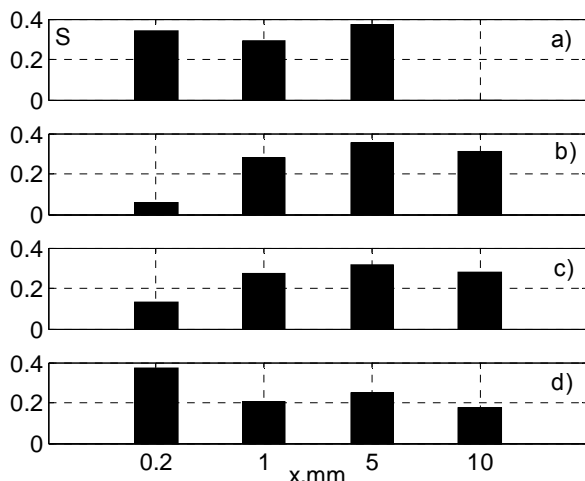


Рис. 2. Распределение пузырьков пара по размерам  $x$  и по высоте слоя  $z$ : а –  $z = 1$ , б –  $z = 0,75$ ; с –  $z = 0,5$ ; д –  $z = 0,25$  м

Полученные результаты расчета согласно модели (2)–(11) представлены на рис. 2 в виде установившегося распределения пузырьков по высоте слое и по крупности. Представленные распределения позволяют в каждой точке фазового пространства определить площадь межфазной поверхности, что, в свою очередь, позволяет рассчитать кинетику теплообменных процессов.

**Решение оптимизационной задачи.** Разработанная модель теплообмена с учетом деаэрации воды (2)–(11) позволяет перейти к решению сформулированной задачи оптимального управления (1). Данная задача относится к классу вариационных задач [7], в ходе решения которой определяется вид двумерного оптимального управления  $U(x, z)$ . В рассматриваемом тестовом примере решение задачи сводится к многомерной оптимизационной задаче, которая решается методом статистического программирования [7]. Решение задачи приведено на рис. 3 в виде зависимости содержания кислорода в деаэрированной воде от общего расхода пара, по-

даваемого в ступень. Каждая точка на графике соответствует известному варианту управления  $U(x, z)$ . Оптимальное решение, которому соответствует минимальный расход пара ( $Q_{10} = 2$  кг/с) при обеспечении заданного качества деаэрированной воды ( $c_2 = 10$  мкг/дм<sup>3</sup>), выделено кружком. Этой точке соответствует подача всего пара в ячейку фазового пространства с номером 2 ( $i = 2$ ) (см. рис. 1, в). Подача более мелких пузырьков вниз слоя ( $i = 1$ ) приводит к неустойчивой работе ступени.

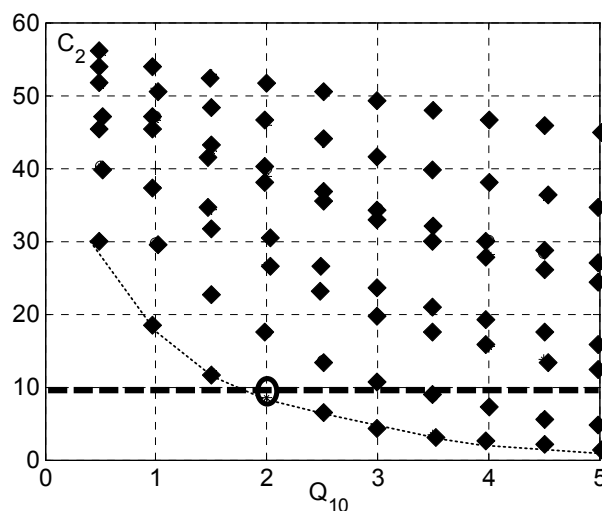


Рис. 3. Зависимости концентрации газов в деаэрированной воде  $C_2$ , мкг/дм<sup>3</sup>, от расхода пара на барботаж  $Q_{10}$ , кг/с, при различных условиях подачи пара: штриховая линия – ограничение по качеству деаэрированной воды; кружок – оптимальное решение (подача пара вниз слоя пузырьками размера 1 мм)

Таким образом, построенная модель деаэрации в барботажном слое позволила сформулировать и решить задачу оптимального управления межфазной поверхностью для барботажной ступени. Дальнейшее развитие работы предполагается проводить в направлении поиска оптимальных решений в диапазоне реальных режимов работы аппаратов с учетом струйных отсеков деаэраторов и с использованием более совершенных методов решения задачи оптимального управления [7].

#### Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газо-жидкостных систем. – М.: Энергоиздат, 1958. – 232 с.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел В.А. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
3. Жуков В.П. Эволюция межфазной поверхности теплообмена в барботируемом слое // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4.
4. Вулис Л.А. Теория и расчет магнитогазодинамических течений в каналах. – М.: Атомиздат, 1971. – 384 с.
5. 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.

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

7. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.

#### References

1. Kutateladze, S.S., Styrikovich, M.A. *Gidrodinamika gazo-zhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow, Energoizdat, 1958. 232 p.

2. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, V.A. *Teplotperedacha* [Heat transmission]. Moscow, Energoatomizdat, 1981. 416 p.

3. Zhukov, V.P. Evolyutsiya mezhfaznoy poverkhnosti teplomassoobmena v barbotiruемом слое [Development of phase contacting area of heat transfer in bubbling layer]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 3.

4. Vulis, L.A. *Teoriya i raschet magnitogazodinamicheskikh techeniy v kanalakh* [Theory and computing magnet-gas dynamical streams in channels]. Moscow, Atomizdat, 1971. 384 p.

5. Belyakov, A.N., Zhukov, V.P., Vlasyuk, A.A., Barochkin, A.E. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM «Raschet mnogomernykh sovmeshchennykh protsessov izmel'cheniya, klassifikatsii v syuchikh sredakh»* [Certificate of State Registration of computer program «Calculation of multidimensional combined process of breaking, classification of loose medium»], no. 2010612671, 2010.

6. Royak, M.E., Soloveychik, Yu.G., Shurina, E.P. *Setochnye metody resheniya kraevykh zadach matematicheskoy fiziki* [Net solution method of boundary value problems in mathematical physics]. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 1998. 120 p.

7. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsiipy, metodologiya* [Operations research: problems, principles, methodology]. Moscow, Drofa, 2004. 207 p.

*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

*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,*

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.

*Росляков Антон Николаевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры тепловых электрических станций,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,  
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31.