

УДК 621.311.22

## Методика прогнозирования значений pH воды, выработанной деаэраторами атмосферного давления

Г.В. Ледуховский, С.Д. Горшенин, В.Н. Виноградов, А.А. Коротков  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: lgv83@yandex.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** При проектировании деаэрационных установок и их режимной наладке требуется определять значения pH деаэрированной воды в том или ином режиме работы деаэратора. В настоящее время математические модели, обеспечивающие решение этой задачи, отсутствуют. Однако известна модель, описывающая химическое равновесие в деаэрированной воде, предназначенная для оценки эффективности декарбонизации воды по результатам измерения общей щелочности и pH исходной воды и pH деаэрированной воды. Опубликованы также экспериментальные значения константы скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах и методика расчета кинетических характеристик этого процесса с учетом гидродинамической обстановки в системе. Синтез этих моделей позволит решить актуальную задачу разработки методики прогнозирования значений pH воды, вырабатываемой деаэраторами атмосферного давления.

**Методы и материалы:** Используются методы химической статики и кинетики, математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, а также результаты экспериментальных исследований.

**Результаты:** Предлагается методика расчета значений pH воды, вырабатываемой деаэраторами атмосферного давления, по заданным конструктивным характеристикам деаэратора и теплотехническим показателям режима его работы, а также значениям общей щелочности и pH исходной воды. Выполнена статистическая оценка результатов практического использования предложенной методики.

**Выводы:** Полученная методика прогнозирования значений pH деаэрированной воды характеризуется точностью, сопоставимой с погрешностью инструментального определения pH воды в теплоэнергетике, что позволяет рекомендовать ее к использованию при обосновании проектных решений и режимной наладке деаэрационных установок.

**Ключевые слова:** деаэрация, декарбонизация, угольная кислота, математическая модель, константа скорости реакции, химическое равновесие.

## Method of predicting pH values of water produced by atmospheric deaerators

G.V. Ledukhovsky, S.D. Gorshenin, V.N. Vinogradov, A.A. Korotkov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: lgv83@yandex.ru

### Abstract

**Background:** An important parameter that should be taken into account while designing and adjusting operating modes of deaeration plants is pH of deaerated water in particular modes. There are no mathematical models that can be used to solve this problem. However, there is a model describing chemical balance in deaerated water and designed to assess the effectiveness of water decarbonization by measuring total alkalinity and pH of source and deaerated water. There is also published data about the experimental values of the rate constant of hydrocarbon thermal decomposition in deaerators and a method of calculating kinetic characteristics of this process accounting for the system hydrodynamic conditions. Synthesis of these models will solve the urgent problem of developing methods of forecasting pH values of the water produced by atmospheric deaerators.

**Materials and methods:** Methods of chemical statics and kinetics, mathematical modeling, probability theory and mathematical statistics, and the results of experimental studies.

**Results:** A method has been developed to calculate pH values of the water produced by atmospheric deaerators based on preset design characteristics and thermal performance of deaerator operation mode, as well as the values of total alkalinity and pH of the source water. The results of practical application of the proposed method have been statistically evaluated.

**Conclusions:** The developed method of forecasting pH of deaerated water has the accuracy comparable to that of instrumental determination of water pH in heat power engineering, which makes it applicable to design decisions justification and regime adjustment of deaeration plants.

**Key words:** deaeration, decarbonization, carbonic acid, mathematical model, reaction rate constant, chemical equilibrium.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.005-009

Водородный показатель pH деаэрированной воды является нормируемым химическим показателем ее качества [1, 2]. В общем случае целесообразно организовывать режим термической деаэрации таким образом, чтобы получать воду с заданными значениями pH (для условий атмосферной деаэрации обычно не менее 8,3). Это обусловлено тем, что такой режим соответствует относительно большим значениям степени термического разложения гидрокарбонатов и, соответственно, сравнительно большой эффективности деаэратора по удалению из воды химически связанных форм угольной кислоты. В этом случае при дальнейшем (после деаэратора) нагреве воды в бойлерах, водогрейных котлах (деаэрация подпиточной воды теплосети) или паровых котлах (деаэрация добавочной воды паровых котлов) выход свободного диоксида углерода в процессах термического разложения гидрокарбонатов уменьшается, что благоприятно сказывается на эффективности защиты металлов энергетического оборудования от коррозии [2].

Потребность в расчетной оценке pH деаэрированной воды по заданным конструктивным характеристикам деаэратора и теплотехническим показателям режима его работы, а также заданным химическим параметрам качества исходной воды [1, 3] возникает в процессе проектирования деаэрационных установок и в ходе их эксплуатации при решении задач режимной наладки. Наличие соответствующей методики расчета позволило бы существенно повысить степень обоснованности проектных решений, а также уменьшить эксплуатационные затраты на проведение режимно-наладочных работ. В настоящее время указанные методики прогнозирования pH деаэрированной воды отсутствуют.

Таким образом, задача разработки методики прогнозирования pH воды, вырабатываемой термическими деаэраторами, является актуальной для энергетической отрасли.

Собственно эффективность удаления из воды различных форм угольной кислоты в деаэраторе определяется значениями многих конструктивных и режимных параметров [3–7]. В Ивановском государственном энергетическом университете под руководством профессора Б.М. Ларина разработана методика оценки эффективности декарбонизации воды деаэраторами атмосферного давления на основе измерений общей щелочности и pH исходной воды и pH деаэрированной воды [6, 7]. Апробация методики выполнена ее авторами на основе результатов проведенных нами экспериментальных исследований на деаэраторах ДСА-300 с одним и двумя струйными отсеками в деаэрационной колонке, а также на деаэраторе ДА-300м. Методика базируется на следующих основных уравнениях, описывающих химическое равновесие в пробе деаэрированной воде при температуре 25 °С [6, 7]:

$$1,78C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{Д}} \cdot f_{\text{II}} = C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{Д}} \cdot f_{\text{I}} 10^{\text{pH}_\text{Д} - 10}; \quad (1)$$

$$C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{Д}} = 0,5\Delta C_{\text{HCO}_3^-} - x; \quad (2)$$

$$C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{Д}} = \text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} 10^{-3} - \Delta C_{\text{HCO}_3^-} + x; \quad (3)$$

$$x = 10^{\text{pH}_\text{Д} - 14} + 10^{-\text{pH}_{\text{ХОВ}}} - 10^{\text{pH}_\text{Д}}, \quad (4)$$

где  $C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{Д}}$ ,  $C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{Д}}$  – концентрации карбонатов и гидрокарбонатов в охлажденной пробе деаэрированной воды, моль/дм<sup>3</sup>;  $f_{\text{II}}$ ,  $f_{\text{I}}$  – коэффициенты активности, которые для условий деаэрации химочищенной воды могут быть приняты равными 0,95 и 0,85 соответственно;  $\text{pH}_\text{Д}$  и  $\text{pH}_{\text{ХОВ}}$  – значения pH в охлажденных пробах деаэрированной и химически очищенной (исходной) воды соответственно;  $\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$  – общая щелочность химически очищенной (исходной) воды, мг-экв/дм<sup>3</sup>;  $\Delta C_{\text{HCO}_3^-}$  – изменение концентрации гидрокарбонатов при термоллизе, моль/дм<sup>3</sup>;  $x$  – концентрация гидролизовавшихся карбонат-ионов, моль/дм<sup>3</sup>.

Необходимо отметить, что приведенные выражения получены без учета разбавления воды в деаэраторе конденсатом греющего пара. Кроме того, предполагается глубокое удаление в деаэраторе свободной уголекислоты, содержащейся в исходной воде. Последнее подтверждается многочисленными экспериментальными данными [4, 5].

Решая систему уравнений (1)–(4), авторы методики [6, 7] получили, в частности, следующие соотношения:

$$C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{Д}} = \frac{5,62 \left( \frac{\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} 10^{-3} - 10^{\text{pH}_\text{Д} - 14}}{-10^{-\text{pH}_{\text{ХОВ}}} + 10^{-\text{pH}_\text{Д}}} \right)}{\frac{f_{\text{II}}}{f_{\text{I}}} 10^{11 - \text{pH}_\text{Д}} + 11,24}; \quad (5)$$

$$C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{Д}} = \text{Щ}_0^{\text{ХОВ}} 10^{-3} - 2C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{Д}} - 10^{\text{pH}_\text{Д} - 14} - 10^{-\text{pH}_{\text{ХОВ}}} + 10^{-\text{pH}_\text{Д}}. \quad (6)$$

В рассматриваемой авторами [6, 7] постановке задачи известны результаты измерения  $\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$ ,  $\text{pH}_\text{Д}$  и  $\text{pH}_{\text{ХОВ}}$  и требуется рассчитать общий эффект декарбонизации воды в деаэраторе. В нашем же случае решается задача прогнозирования значений pH деаэрированной воды при заданных значениях  $\text{Щ}_0^{\text{ХОВ}}$  и  $\text{pH}_{\text{ХОВ}}$ , известной конструкции деаэратора и значениях режимных параметров. Для решения этой задачи используем выражения (5) и (6), систему которых разрешим относительно  $10^{\text{pH}_\text{Д}}$ . В результате приходим к квадратному уравнению вида

$$a \left( 10^{\text{pH}_\text{Д}} \right)^2 + b \cdot 10^{\text{pH}_\text{Д}} + c = 0, \quad (7)$$

где

$$a = C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{Д}} + \frac{1}{11,24} \frac{f_{\text{II}}}{f_{\text{I}}} \cdot 10^{-3}; \quad (8)$$

$$b = \frac{1}{11,24} \frac{f_{II}}{f_I} \cdot 10^{11} \times \quad (9)$$

$$\times \left( C_{\text{HCO}_3^-}^D - \text{Щ}_0^{\text{XOB}} \cdot 10^{-3} + 10^{-\text{pH}_{\text{XOB}}} \right);$$

$$c = -\frac{1}{11,24} \frac{f_{II}}{f_I} \cdot 10^{11}. \quad (10)$$

Решение полученного уравнения позволяет найти искомое значение  $\text{pH}_D$ . Итоговое расчетное выражение при этом выглядит следующим образом:

$$\text{pH}_D = \lg \left( \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right). \quad (11)$$

Для расчета  $\text{pH}_D$  по уравнению (11) с учетом выражений (8)–(10) необходимо определить концентрацию гидрокарбонатов  $C_{\text{HCO}_3^-}^D$ . Для этого используем предложенную нами ранее модель процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах [4, 5]. Рассмотрим эту модель подробнее.

Результирующий процесс, включающий стадии химических преобразований, диффузионного и дисперсного выделения газа, моделируется кинетическим уравнением реакции вида  $dC/d\tau = -KC^n$ , (12) где  $C$  – массовая концентрация гидрокарбонатов в воде;  $K$  – константа скорости реакции;  $\tau$  – время;  $n$  – порядок реакции, равный 1 или 2.

Значения константы  $K$ , учитывающей не только показатели химической кинетики, но и гидродинамические и теплофизические условия протекания всех стадий процесса, определены нами по результатам специальных экспериментальных исследований [4, 5]. При этом выявлено существенное влияние гидродинамических условий в деаэраторном баке на скорость результирующего процесса термического разложения гидрокарбонатов. По результатам исследований предложен метод обработки результатов испытаний деаэраторов, позволяющий вычислять значения константы скорости реакции  $K$  с учетом характеристик гидродинамической обстановки в деаэраторном баке. Основные положения метода состоят в следующем:

А. С помощью CAD-комплексов трехмерного проектирования разрабатывается геометрическая модель деаэраторного бака для проведения численных экспериментов в программном комплексе FlowVision<sup>1</sup>.

Б. Для условий каждого опыта натуральных испытаний в программном комплексе FlowVision рассчитывается распределение скоростей воды в деаэраторном баке.

В. После получения решения в п. Б входной поток воды деаэраторного бака в компью-

терной модели условно разбивается на  $m$  линий тока (в ходе специальных расчетных исследований выбрано значение  $m = 1000$  [4]). Для каждой из линий тока определяется время  $\tau_i$ , затрачиваемое соответствующим элементарным объемом воды на прохождение деаэраторного бака.

Г. Значение  $K$  в уравнении (12) определяется с учетом того, что оно должно быть одинаковым для всех линий тока. При этом справедливы следующие соотношения:

$$C_i^{n=1} = C_0 \exp(-K_{n=1}\tau_i); \quad (13)$$

$$C_i^{n=2} = \left[ (C_0)^{-1} + K_{n=2}\tau_i \right]^{-1}; \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_i, \quad (15)$$

где  $C_i$  – концентрация гидрокарбонатов в  $i$ -м объеме воды на выходе бака, мг-экв/дм<sup>3</sup>; индексы  $n = 1$  и  $n = 2$  указывают на первый или второй порядок реакции соответственно;  $C_0$  – концентрация гидрокарбонатов в воде на входе в бак, мг-экв/дм<sup>3</sup>;  $K$  – константа скорости реакции, 1/с ( $n = 1$ ) или кг/(мг-экв·с) ( $n = 2$ );  $\tau_i$  – время пребывания в баке  $i$ -го объема воды, с;  $C$  – расчетное значение концентрации гидрокарбонатов в воде в выходном сечении бака, мг-экв/дм<sup>3</sup>.

Значение  $K$  для условий каждого опыта определяется подбором по условию совпадения расчетного и экспериментального значений  $C$ .

В ходе проведенных по указанному алгоритму расчетов с использованием результатов экспериментальных исследований, реализованных на нескольких деаэраторах различных конструкций, определены диапазоны изменения общей щелочности исходной воды  $\text{Щ}_0^{\text{XOB}}$ , в которых можно полагать протекание итогового процесса как реакции первого ( $n = 1$ ) или второго ( $n = 2$ ) порядка, а также соответствующие значения  $K$  в уравнении (12). Для практических расчетов могут быть рекомендованы следующие данные:

1) для деаэраторов без парового барботажа в баке:

- при  $\text{Щ}_0^{\text{XOB}} < 2,3$  мг-экв/дм<sup>3</sup>  $n = 1$  и  $K = (0,65 \pm 0,14) \cdot 10^{-4}$  1/с;

- при  $\text{Щ}_0^{\text{XOB}} \geq 2,3$  мг-экв/дм<sup>3</sup>  $n = 2$  и  $K = (0,32 \pm 0,06) \cdot 10^{-7}$  кг/(мг-экв·с);

2) для деаэраторов с паровым барботажем в баке (при имеющихся экспериментальных данных не выявлена смена порядка реакции):

- при  $\text{Щ}_0^{\text{XOB}} \geq 1,25$  мг-экв/дм<sup>3</sup>  $n = 2$  и  $K = (1,89 \pm 0,31) \cdot 10^{-7}$  кг/(мг-экв·с).

Используя полученные значения констант скорости реакции  $K$  и приведенный выше алгоритм расчета по пп. А–Г, для деаэратора заданной конструкции, полагая  $C_0 \approx \text{Щ}_0^{\text{XOB}} \cdot 10^3$ , можно рассчитать значения концентрации гидрокарбонатов в деаэрированной воде  $C$ .

<sup>1</sup> 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.

Далее для выражений (8) и (9) следует использовать значение  $C_{\text{НСО}_3}^D = C \cdot 10^{-6}$ . Теперь по уравнению (11) с учетом выражений (8)–(10) можно рассчитать прогнозное значение pH деаэрированной воды.

Методика может быть применена в упрощенном виде, если не учитывать зависимость полученных нами значений  $K$  от гидродинамической обстановки в деаэрационном баке. В таком случае следует использовать другой комплекс значений  $K$  (до его уточнения по указанному алгоритму), приведенный в [4, 5], который, однако, характеризуется существенно большим разбросом значений относительно среднего, чем указанные выше данные. При расчете по упрощенной методике время пребывания воды в баке  $\tau_{\Sigma}$  определяется как время для реактора вытеснения путем деления водяного объема деаэратора на объемный расход воды через него. Значение  $C$  вычисляется по уравнениям, аналогичным (13) и (14) при замене  $\tau_i$  на  $\tau_{\Sigma}$ .

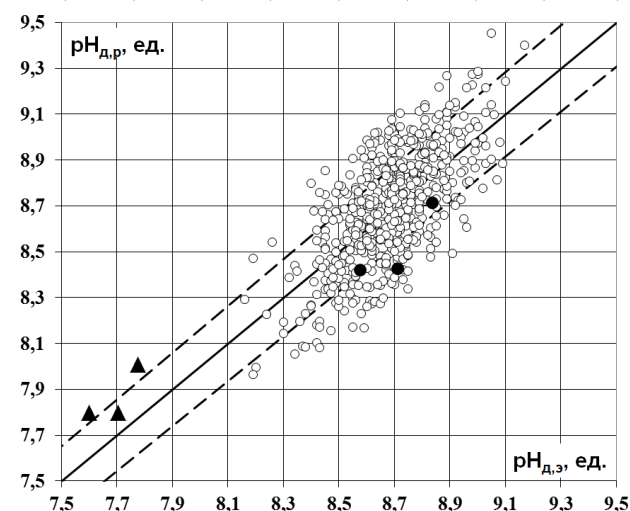
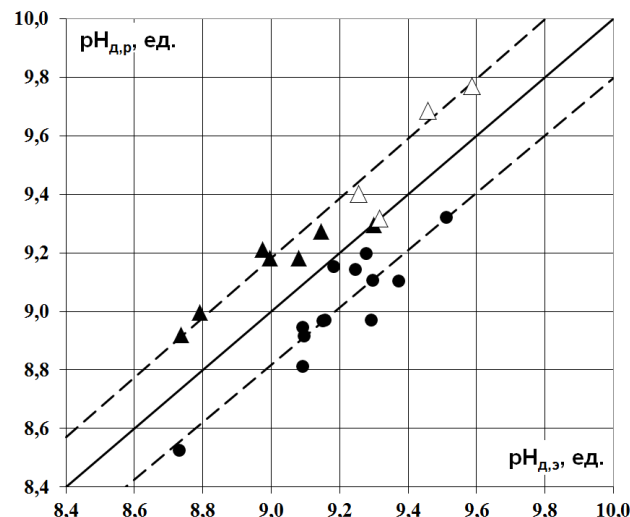
Далее рассмотрим результаты практической реализации полученной методики прогнозирования pH деаэрированной воды. Для этого сопоставим результаты расчета  $\text{pH}_d$  по (8)–(11), (13)–(15) с экспериментальными данными, полученные нами в ходе натурных испытаний деаэраторов различных конструкций (см. рисунок).

Относительные средние квадратичные отклонения расчетных значений pH от экспериментальных составили: 2,0 % – для деаэраторов с паровым барботажем в баке; 2,1 % – для деаэраторов без барботажа в баке. Отметим при этом, что использование описанной выше упрощенной методики, не учитывающей зависимость значений константы скорости реакции  $K$  от гидродинамической обстановки в деаэрационном баке, приводит к снижению точности модели практически вдвое (относительное среднее квадратичное отклонение составляет около 4 %).

Адекватность полученной методики расчета pH деаэрированной воды докажем с использованием критерия Фишера [8, 9]. Для выборки по деаэраторам без парового барботажа в баке остаточная дисперсия составила  $3,11 \cdot 10^{-2}$ , дисперсия относительно среднего – 0,31; соответственно, критерий Фишера равен 9,9 при критическом (табличном) значении 1,1 (уровень значимости здесь и далее 0,05). Для выборки по деаэраторам с паровым барботажем в баке результаты анализа следующие: остаточная дисперсия –  $3,45 \cdot 10^{-2}$ ; дисперсия относительно среднего – 3,70; критерий Фишера – 107,2; критическое значение критерия Фишера – 2,0.

Нормируемая погрешность инструментального определения pH воды потенциометрическим методом варьируется от 0,05 до 0,2 ед. pH, что при рассматриваемых диапазонах измерения pH в деаэраторе эквивалентно погрешности от 0,6 до 2,4 %. Таким образом, полученная методика прогнозирования значений pH деаэрированной воды характеризуется погрешностью,

практически совпадающей с метрологическими характеристиками средств измерения pH воды, что можно признать удовлетворительным результатом. Это позволяет рекомендовать методику к использованию при обосновании проектных решений и режимной наладке деаэрационных установок.



Сопоставление расчетных и экспериментальных значений pH деаэрированной воды для деаэраторов с паровым барботажем в баке (вверху) и без него (внизу):  $\text{pH}_{д,р}$  и  $\text{pH}_{д,э}$  – соответственно расчетные и экспериментальные значения pH деаэрированной воды; сплошные линии – совпадение расчетных и экспериментальных данных; пунктирные линии – среднее квадратичное отклонение  $\text{pH}_{д,р}$  от  $\text{pH}_{д,э}$ ; точки – результаты расчета в условиях отдельных опытов для деаэраторов разных моделей: ● – ДА-300м; ▲ – ДСА-300 (два струйных отсека в деаэрационной колонке); Δ – ДСА-300 (один струйный отсек в деаэрационной колонке); ○ – ДА-50

#### Список литературы

1. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы. – Ульяновск: Ульян. гос. техн. ун-т, 2003. – 560 с.
2. **Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В.** Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.
3. **Особенности декарбонизации воды термическими струйно-барботажными деаэраторами атмосферного давления / Е.В. Барочкин, А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов и др. // Теплоэнергетика. – 2012. – № 7. – С. 40–44.**
4. **Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Коротков А.А.** Уточнение механизма процесса и константного обеспечения модели термического разложения гидрокарбонатов в атмо-

сферных деаэраторах без парового барботажа в баке // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 3. – С. 9–15.

5. **Ледуховский Г.В., Горшенин С.Д., Коротков А.А.** Влияние парового барботажа в баке атмосферных деаэраторов на кинетику процесса термического разложения гидрокарбонатов // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 3. – С. 5–12.

6. **Ларин Б.М., Ларин А.Б.** Оценка эффективности декарбонизации добавочной воды атмосферными деаэраторами // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 77–80.

7. **Ларин Б.М., Ларин А.Б., Колегов А.В.** Измерения электропроводности и pH в системах мониторинга водного режима ТЭС. – Иваново, 2014. – 332 с.

8. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. В 2 кн. Кн. 1. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

9. **Heinhold I., Gaede K.W.** Ingenieur statistic. – München; Wien, Springer Verlag, 1964. – 352 p.

#### References

1. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ulyanovsk, Ulyanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2003. 560 p.

2. Kostrikin Yu.M., Meshcherskiy N.A., Korovina O.V. *Vodopodgotovka i vodnyy rezhim energoob'ektov nizkogo i srednego davleniya* [Water treatment and water regime of low and medium pressure power facilities]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 254 p.

3. Barochkin, E.V., Moshkarin, A.V., Vinogradov, V.N., Ledukhovskiy, G.V., Korotkov, A.A. *Teploenergetika*, 2012, no. 7, pp. 40–44.

4. Ledukhovskiy, G.V., Gorshenin, S.D., Korotkov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 3, pp. 9–15.

5. Ledukhovskiy, G.V., Gorshenin, S.D., Korotkov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 3, pp. 5–12.

6. Larin, B.M., Larin, A.B. *Teploenergetika*, 2015, no. 2, pp. 77–80.

7. Larin, B.M., Larin, A.B., Kolegov, A.V. *Izmereniya elektroprovodnosti i pH v sistemakh monitoringa vodnogo rezhima TES* [Measurements of water electrical conductivity and pH in regime monitoring systems of thermal power plants]. Ivanovo, 2014. 332 p.

8. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regressionnyy analiz 2 kn., kn. 1* [Applied Regression Analysis in 2 books, book 1]. Moscow, Finansy i statistika, 1986. 366 p.

9. Heinhold, I., Gaede, K.W. Ingenieur statistic. München; Wien, Springer Verlag, 1964. 352 p.

*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

*Горшенин Сергей Дмитриевич*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
соискатель, ассистент кафедры тепловых электрических станций,  
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

*Виноградов Владимир Николаевич*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике,  
телефон (4932) 38-57-83,  
e-mail: V.N.Vinogradov@mail.ru

*Коротков Александр Александрович*

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: admin@tes.ispu.ru