

УДК 621.187.11

## Методика расчета pH и концентраций ионных примесей питательной воды на ТЭС по измерениям удельной электропроводности

А.Б. Ларин, А.Я. Сорокина  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская федерация  
E-mail: yaandy\_81@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Ужесточение норм, предъявляемых к качеству водного теплоносителя ТЭС, и развитие автоматических систем химического мониторинга за водно-химическим режимом требуют расширения диагностических возможностей систем мониторинга ТЭС. Использование наиболее точных измерений показателей качества теплоносителя, таких как удельная электрическая проводимость и pH, повышает надежность работы котельных установок и позволяет проводить диагностику состояния водного режима. Такое направление принято и в энергетике западных стран. В частности, фирмой Swan (Швейцария) разработаны и представлены на энергетическом рынке России автоматические анализаторы FAM Deltacon pH и AMI Deltacon Power. В связи с этим необходима разработка методик косвенных измерений и приборов автоматического химического контроля, не уступающих по техническому уровню лучшим мировым образцам.

**Материалы и методы:** Методики получены на основании глубоких исследований в области теории растворов электролитов, теории и практики ионных равновесий в водных растворах с использованием инновационных стендов кафедры ХХТЭ. Подобные методики и стенды впервые созданы в ИГЭУ и не имеют аналогов в других вузах России.

**Результаты:** Рассмотрены три варианта расчетной методики косвенного определения показателя pH и концентрации аммиака, основанные на измерениях удельной электропроводности охлажденных проб. Расчетные методики основаны на частных решениях обобщенной математической модели ионных равновесий в условиях качества питательной воды котельных установок. Представлены результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний новых методик косвенного определения нормативных показателей качества воды на ТЭС. Выбран расчетный алгоритм для промышленных систем автоматического химического контроля.

**Выводы:** Предложенные методики и алгоритмы проверены в условиях промышленной эксплуатации на ТЭС и частично реализованы в разработках новых приборов и систем автоматического химического контроля. Научная ценность результатов состоит в получении и обосновании расчетных методик, пригодных для практического использования на ТЭС.

**Ключевые слова:** расчетная методика, питательная вода паровых котлов, показатель pH, математическая модель, удельная электропроводность, автоматический химический контроль, водно-химический режим ТЭС, нормы качества теплоносителя.

## Methods of calculating pH and concentrations of feed water ionic impurities at heat power stations by measuring specific water conductivity

A.B. Larin, A.Ya. Sorokina  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: yaandy\_81@mail.ru

### Abstract

**Background:** Tightening standards for the quality of thermal power plants water coolants and development of automatic chemical monitoring systems for water-chemical regime make it necessary to extend the diagnostic capacity of thermal power plant monitoring systems. Use of the most accurate measurement of coolant quality parameters, such as specific electrical conductivity and pH, increases boiler systems reliability and enables water regime diagnostics. This direction is adopted in power engineering in Western countries. In particular, the Swan firm (Switzerland) has developed and introduced to the Russian energy market its automatic analyzers «FAM Deltacon pH» and «AMI Deltacon Power». The purpose of our research is to develop techniques of indirect measurements and devices of automatic chemical control which are technologically not inferior to the best world samples.

**Materials and methods:** The developed techniques are the result of in-depth studies conducted in the field of the electrolyte solutions theory, the theory and practice of ionic balance in water solutions by using the innovative stands of the Department of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering. Similar techniques and stands were for the first time designed at ISPEU and have no analogs in other higher education institutions of Russia.

**Results:** The study deals with three variants of calculating indirect determination of pH and ammonia concentration based on specific conductivity measurements of refrigerated samples. The calculation techniques are based on specific solutions to the generalized mathematical model of ionic equilibria in conditions of good-quality feed water in boiler installations. The paper represents the results of laboratory research into and industrial testing of the new techniques of indirect determination of water quality standard values at heat power stations. An algorithm has been selected to calculate parameters of industrial systems of automatic chemical control.

**Conclusions:** The suggested techniques and algorithms have been tested in industrial environments at heat power plants and partly implemented in developing new devices and automatic chemical control systems. The scientific value of the results obtained consists in receiving and justification of the calculation techniques suitable for practical use at heat power plants.

**Key words:** calculation technique, feed water in steam boilers, pH indicator, mathematical model, specific conductivity, automatic chemical control, heat power plant water-chemical mode, coolant quality standards.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2016.5.010-015

**Состояние вопроса.** Надежность, экономичность и безопасность работы энергоблоков ТЭС в значительной степени зависят от состояния водно-химического режима (ВХР), регламентируемого правилами технической эксплуатации<sup>1</sup> и нормативными документами<sup>2</sup>. Нарушения ВХР, вызванные повышенными присосами охлаждающей воды в конденсаторах паровых турбин или сетевой воды в сетевых подогревателях, ухудшением качества добавочной воды или режима дозирования реагентов, например аммиака или фосфатов, способны быстро вывести качество водного теплоносителя за нормируемые границы. Такие нарушения ВХР должны отслеживаться непрерывно приборами автоматического химического контроля (АХК) по всему пароводяному тракту энергоблока. Различить отдельные виды нарушений ВХР по показателям основных приборов АХК (кондуктометров и рН-метров) можно с использованием алгоритма расчета концентраций ионных компонентов водного теплоносителя.

Для комплексного решения проблемы контроля состояния и ведения водно-химического режима (ВХР) энергетических котлов на ТЭС в последнее десятилетие широко используются системы химико-технологического мониторинга (СХТМ), основу которых составляют приборы АХК. Наиболее надежными приборами АХК в промышленной эксплуатации являются кондуктометры и рН-метры, диагностический потенциал которых используется не в полном объеме [1–3].

**Материалы и методы.** Методы математического моделирования на основе измерений величины рН, удельной электропроводности прямой и Н-катионированной пробы позволяют расширить спектр функциональных возможностей СХТМ, раскрыть приборный потенциал и, следовательно, достаточно эффективно выявлять недостатки и быстротекущие нарушения ВХР [4, 5].

Таким образом, контроль состояния, диагностика нарушений и ведение ВХР в рамках СХТМ остаются одними из наиболее сложных задач, решение которых следует искать в направлении повышения информативности приборов и систем АХК на базе простых и надежных измерений, а также в разработке новых расчетных методик, адаптированных к условиям промышленной эксплуатации.

В настоящее время ведется практическая реализация алгоритмов и программ, созданных на основе частных решений обобщенной математической модели (ММ). Разрабатываемые алгоритмы и методики используются для создания новых систем мониторинга водного режима энергетических котлов ТЭС, в том числе блоков ПГУ. Появление на рынке высокотехнологичных приборов дает возможность измерения и расчета нескольких показателей качества при уменьшении количества устанавливаемых приборов на точку контроля [6]. Это направление отвечает мировой тенденции развития химического контроля на ТЭС и АЭС<sup>3</sup>.

В связи с этим основной задачей является разработка и промышленная адаптация вычислительных алгоритмов нормируемых и диагностических показателей качества питательной воды барабанных и прямоточных котлов при дозировании аммиака на основе измерений электропроводности.

**Результаты исследования.** Рассматриваются три варианта расчетной методики косвенного определения показателя рН и концентрации аммиака, основанные на измерениях удельной электропроводности охлажденных проб питательной воды, прямой ( $\chi$ ) и Н-катионированной ( $\chi_H$ ). Способ основан на решении общей ММ ионных равновесий вод типа конденсата в граничных условиях качества питательной воды [7].

Обработку измеренных значений электропроводности проводят следующим образом. Приводят к температуре 25 °С, как требуют нормы контроля рабочей среды энергетических котлов [6], согласно следующим уравнениям:

$$\chi = \chi_{\text{изм}} / (1 + 0,02(t - 25)); \quad (1)$$

$$\chi_H = \chi_{H,\text{изм}} / (1 + 0,015(t - 25)). \quad (2)$$

<sup>1</sup> СО 153-34.20.501-2003 (РД 34.20.501-95). Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Минэнерго России. – М.: СПО ОРГРЭС, 2003.

<sup>2</sup> СТО 70238424.27.100.013-2009. Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условие создания. Нормы и требования. Стандарт организации. – М.: НП «ИнВЭЛ», 2009. – 93 с.

<sup>3</sup> European standart EN 12952-12: 2003. Water – tube boilers and auxiliary installation – part 12: Requirement for boiler feed water and boiler water quality.

Проверяют достоверность результатов измерений на соответствие максимальному диапазону изменения величины удельной электропроводности, мкСм/см:

$$0,056 < \chi < 10;$$

$$0,056 < \chi_H < 10.$$

Находят разность значений ( $\chi - \chi_H$ ) и определяют реакцию среды контролируемой пробы по следующему критерию:

– если  $\chi - \chi_H \geq 0$ , то  $pH \geq 7$  в присутствии подщелачивающего агента или без него;

– если  $\chi - \chi_H < 0$ , то  $pH < 7$  в присутствии подкисляющего агента.

Таким образом, определяют однозначную зависимость между удельной электропроводностью и величиной pH малобufferного предельно разбавленного водного раствора (рис. 1).

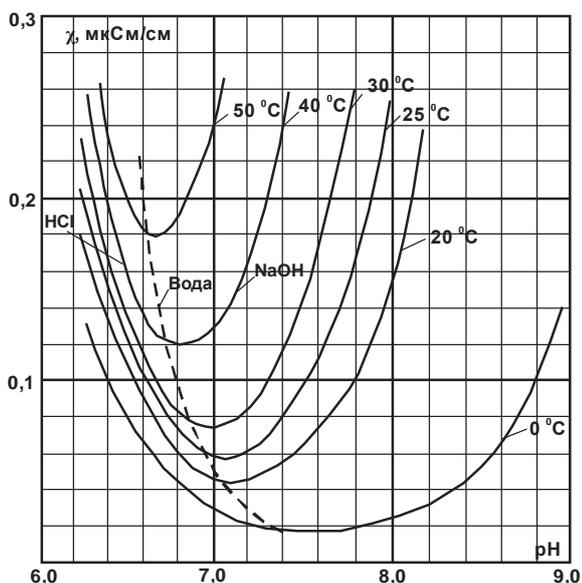


Рис. 1. Кривые, отвечающие значениям удельной электропроводности и pH при изменении концентрации водных растворов NaOH ( $C = 1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$  моль(экв)/дм<sup>3</sup>) и HCl ( $C = 1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-7}$  моль(экв)/дм<sup>3</sup>) для различных температур

Для чистой воды при температуре 25 °C удельная электропроводность связана с концентрацией ионов водорода, определяющих значение pH, следующим выражением:

$$\chi_{H_2O} = 0,548 \cdot C_{H^+}, \quad (3)$$

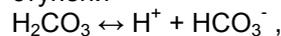
где  $\chi_{H_2O}$  измерена в мкСм/см, а концентрация ионов водорода ( $C_{H^+}$ ) в мкмоль/дм<sup>3</sup>.

На рис. 1 виден характер зависимости  $\chi - pH$  как для чистой воды, так и для чистой воды при добавлении малых количеств кислоты или щелочи. Питательная вода энергетических блоков ТЭС и АЭС является чистой водой, содержащей очень малые количества примесей, обычно угольной кислоты и подщелачивающего агента, как правило аммиака в форме гидроксида аммония.

1. Первый вариант расчетной методики предполагает анализ ионных равновесий питательной воды при отсутствии солевых примесей, когда в воде есть только угольная кислота

и аммиак. Рассматриваются равновесия как в фильтрате Н-катионитовой колонки, так и в пробе воды до Н-колонки.

Предположим, что в фильтрате Н-колонки может быть только угольная кислота. Тогда, согласно уравнению диссоциации по первой ступени



имеем:

• уравнение, описывающее диссоциацию угольной кислоты в Н-фильтрате:

$$K_I = 4,5 \cdot 10^{-7} = \frac{C_{H^+} \cdot C_{HCO_3^-}}{C_{H_2CO_3}}; \quad (4)$$

• уравнение электропроводности для Н-фильтрата:

$$\chi_H \cdot 10^{-3} = (\lambda_{H^+} + \lambda_{HCO_3^-}) \cdot C_{H^+} = 394,3 \cdot C_{H^+}; \quad (5)$$

• уравнение электронейтральности для Н-фильтрата:

$$C_{H^+} = C_{HCO_3^-}. \quad (6)$$

Из (4)–(6) следует:

$$(C_{H^+})_H = 2,536 \cdot \chi_H \cdot 10^{-6}, \text{ моль/дм}^3; \quad (7)$$

$$(C_{HCO_3^-})_H = 2,536 \cdot \chi_H \cdot 10^{-6}, \text{ моль/дм}^3; \quad (8)$$

$$(C_{H_2CO_3})_H = 14,3 \cdot \chi_H^2 \cdot 10^{-6}, \text{ моль/дм}^3. \quad (9)$$

Обозначим  $(C_{HCO_3^-})_H + (C_{H_2CO_3})_H = A$ .

Запишем систему уравнений ионных равновесий для прямой пробы воды (до Н-колонки) с учетом равенства суммы форм угольной кислоты до- и после Н-колонки:

• уравнение электронейтральности для анализируемой воды:

$$C_{NH_4^+} = C_{OH^-} + C_{HCO_3^-} + 2C_{CO_3^{2-}}; \quad (10)$$

• балансовое уравнение форм состояния углекислоты:

$$C_{HCO_3^-} + C_{CO_3^{2-}} = (C_{H_2CO_3})_H + (C_{HCO_3^-})_H = A; \quad (11)$$

• уравнения, описывающие диссоциацию слабых электролитов в анализируемой воде:

а) гидрокарбоната:

$$K_{II} = 4,8 \cdot 10^{-11} = \frac{C_{H^+} \cdot C_{CO_3^{2-}}}{C_{HCO_3^-}}; \quad (12)$$

б) воды:

$$K_W = 1 \cdot 10^{-14} = C_{H^+} \cdot C_{OH^-}; \quad (13)$$

• уравнение электропроводности для анализируемой воды:

$$\begin{aligned} \chi \cdot 10^{-3} &= \lambda_{NH_4^+} C_{NH_4^+} + \lambda_{OH^-} C_{OH^-} + \lambda_{HCO_3^-} C_{HCO_3^-} + \\ &+ 2 \cdot \lambda_{CO_3^{2-}} C_{CO_3^{2-}} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \chi \cdot 10^{-3} &= 73,6 \cdot C_{NH_4^+} + 198,3 \cdot C_{OH^-} + \\ &+ 44,5 \cdot C_{HCO_3^-} + 2 \cdot 69,3 \cdot C_{CO_3^{2-}} \end{aligned} \quad (14)$$

при  $\lambda_i = \lambda_{0,i}$ ,

где  $\lambda_{0,i}$  – предельная подвижность ионов при бесконечном разбавлении.

В уравнения (4)–(14) входят следующие величины:

• входные данные – показатели приборов АХК:

$\chi$ ,  $\chi_H$  – измеряемые удельные электропроводности в анализируемой воде и Н-фильтрате соответственно, мкСм/см, приведенные к 25 °С;

• выходные данные – искомые концентрации ионов в анализируемой воде:

$C_{H^+}$ ,  $C_{NH_4^+}$ ,  $C_{HCO_3^-}$ ,  $C_{CO_3^{2-}}$ ,  $C_{OH^-}$  – концентрации соответствующих ионов в анализируемой воде, моль/дм<sup>3</sup>;  $(C_{H^+})_H$ ,  $(C_{HCO_3^-})_H$ ,  $(C_{OH^-})_H$  – концентрации соответствующих ионов в фильтрате Н-фильтра, моль/дм<sup>3</sup>;

• параметры (внутренние характеристики математической модели):

$K_W$ ,  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{NH_4OH}$  – концентрационные константы ионных равновесий воды, уголекислоты по первой и второй ступеням и аммиака;  $\lambda_{H^+}$ ,  $\lambda_{NH_4^+}$

и т.д. – предельные подвижности (или эквивалентные электропроводности) соответствующих ионов, См·см<sup>2</sup>/г-экв.

Тогда расчетная система состоит из пяти уравнений (10)–(14), содержит пять неизвестных величин (не считая  $\chi$  и  $\chi_H$ ) и имеет одно решение. Решать можно методом подстановки или другим численным методом. Недостатком является большое различие численных значений определяемых величин, например  $C_{H^+} = 1 \cdot 10^{-9}$  при  $C_{NH_4^+} = 1 \cdot 10^{-5}$ , что может создавать значительные ошибки в определении рН или выводить решение за пределы допустимых значений, например получение отрицательных значений концентраций.

2. Второй вариант повторяет исходные данные первого варианта (угольная кислота и аммиак), но использует итерационный метод решения системы уравнений (10)–(14) с начальным заданием приближенного значения рН. При изменении рН в диапазоне от 8,5 до 9,5, что обычно имеет место для питательной воды энергетических котлов, задаемся средним значением  $pH_1 = 9,0$  лишь для преобразования уравнений (11) и (12).

Тогда из уравнения (12) получим

$$C_{CO_3^{2-}} = \frac{K_{II} \cdot C_{HCO_3^-}}{C_{H^+}} = \frac{4,8 \cdot 10^{-11}}{1 \cdot 10^{-9}} C_{HCO_3^-} = 0,048 \cdot C_{HCO_3^-}.$$

Подставляя выражение  $C_{CO_3^{2-}}$  в уравне-

ние (11), получим:

$$C_{HCO_3^-} (1 + 0,048) = A;$$

$$C_{HCO_3^-} = \frac{A}{1,048}.$$

Тогда

$$C_{CO_3^{2-}} = 0,048 \frac{A}{1,048} = 0,046 \cdot A,$$

а уравнение (10) будет иметь вид

$$C_{NH_4^+} = C_{OH^-} + \frac{A}{1,048} + 2 \cdot 0,046 \cdot A = 1,046 \cdot A + C_{OH^-}.$$

Далее, подставляя  $C_{NH_4^+}$ ,  $C_{HCO_3^-}$ ,  $C_{CO_3^{2-}}$  в

уравнение (14), получим:

$$\chi \cdot 10^{-3} = 73,6(1,046 \cdot A + C_{OH^-}) + 198,3 \cdot C_{OH^-} + 44,5 \frac{A}{1,048} + 2 \cdot 69,3 \cdot 0,046 \cdot A,$$

или

$$\chi \cdot 10^{-3} = 77 \cdot A + 73,6 \cdot C_{OH^-} + 198,3 \cdot C_{OH^-} + 48,84 \cdot A,$$

или

$$C_{OH^-} = \frac{\chi \cdot 10^{-3} - 125,84 \cdot A}{271,9} = \chi \cdot 3,68 \cdot 10^{-3} - 0,46 \cdot A,$$

моль/дм<sup>3</sup>, (15)

где  $\chi$  – измеряется в мкСм/см;

$A = (C_{H_2CO_3})_H + (C_{HCO_3^-})_H$ , моль/дм<sup>3</sup>.

Зная  $A$  и  $\chi$ , находим  $C_{OH^-}$  и рН в виде

$$pH_2 = -\lg \frac{1 \cdot 10^{-14}}{C_{OH^-}}.$$

Если расчетное значение рН отличается от принятого более чем на 0,1, что определяется нормативной точностью измерения рН, то повторяем расчет по методу 2 с заданием уточненного значения рН равному  $(pH_1 + pH_2)/2$ .

Далее находим концентрацию  $NH_4^+$  по уравнению (10) и концентрацию  $NH_3$ :

$$C_{NH_3} = C_{NH_4^+} \cdot 10^{-6} (1 + 5,32 \cdot 10^{-4} \cdot C_{OH^-}) \cdot 17, \text{ мкг/дм}^3. \quad (16)$$

Такой вариант привлекает простотой решения задачи с возможностью реализации в промышленных системах АХК.

3. Третий вариант (или оценочный метод) предполагает упрощение задачи путем исключения из исходных данных концентрации угольной кислоты. В абсолютно чистой воде растворен только  $NH_4OH$ . Тогда достаточно одного измерения удельной электропроводности ( $\chi$ ) без Н-колонки.

Рассчитываем ионное равновесие:



Уравнение диссоциации записывается следующим образом:

$$K_d = 1,76 \cdot 10^{-5} = \frac{C_{NH_4^+} \cdot C_{OH^-}}{C_{NH_4OH}}. \quad (17)$$

Уравнение электропроводности имеет следующий вид:

$$\chi \cdot 10^{-3} = (\lambda_{NH_4^+} + \lambda_{OH^-}) C_{NH_4^+} = 271,9 \cdot C_{NH_4^+} \quad (18)$$

или

$$C_{NH_4^+} = C_{OH^-} = 3,68 \cdot \chi \cdot 10^{-6}, \text{ моль/дм}^3. \quad (19)$$

Уравнение диссоциации воды можно представить в виде

$$K_w = 1 \cdot 10^{-14} = C_{H^+} \cdot C_{OH^-} \quad (20)$$

Из уравнений (17)–(20) следует:

$$pH = -\lg\left(\frac{2,72}{\chi} \cdot 10^{-9}\right), \quad (21)$$

где  $\chi$  – измеряется в мкСм/см, и, подставляя выражение (19) в выражение (16), получим

$$C_{NH_3} = 62,56 \cdot \chi + 13,07 \cdot \chi^2, \text{ мкг/дм}^3. \quad (22)$$

В данном варианте расчетной методики будет получаться максимальное значение pH, так как при наличии углекислоты часть ионов  $OH^-$  будет расходоваться на связывание  $H^+$  от диссоциации  $H_2CO_3$ , и pH будет уменьшаться. Это может служить проверкой измеряемых значений pH в условиях сверхчистой питательной воды прямоточных котлов СКД и ССКП.

В таблице приведены результаты измеренных и расчетных значений по трем вариантам расчетной методики.

**Выводы.** При больших дозировках  $NH_3$  (больше 100 мкг/дм<sup>3</sup>) результаты расчета pH достоверны в пределах паспортной ошибки измерения прибора pH-метра, концентрации  $NH_3$  отличаются на 5–10 %.

Для предельно разбавленных водных растворов, типа питательной воды прямоточных котлов с  $\chi_H < 0,2$  мкСм/см и  $\chi < 1$  мкСм/см, приближенные методы расчета, включая и вариант 1, могут давать отклонения значений pH от измеренных, превышающие паспортную ошибку прибора  $\pm 0,05$ . Концентрация  $NH_3$  в этих случаях обычно не измеряется, так как в этих условиях химический анализ на  $NH_3$  не дает достоверных результатов. Тогда практически единственным методом остается расчетное определение  $NH_3$ .

### Результаты измеренных и расчетных значений pH и концентрации аммиака в питательной воде парового котла на энергетическом предприятии

Энергетическое предприятие	Исходные данные		Результаты измерений		Результаты расчета					
	$\chi$ , мкСм/см	$\chi_H$ , мкСм/см	pH	$C_{NH_3}$ , мкг/дм <sup>3</sup>	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
					pH	$C_{NH_3}$ , мкг/дм <sup>3</sup>	pH	$C_{NH_3}$ , мкг/дм <sup>3</sup>	pH	$C_{NH_3}$ , мкг/дм <sup>3</sup>
Петрозаводская ТЭЦ	4,6	0,225	9,22	587	9,21	559,16	9,19	563,77	9,23	564,34
	4,13	0,238	9,17	499	9,16	480,88	9,14	444,78	9,18	481,31
Северо-Западная ТЭЦ	8,04	0,19	9,47	1400	9,46	1303,22	9,46	1305,87	9,47	1347,85
Конаковская ГРЭС	0,196	0,187	7,62	–	7,44	21,56	7,47	21,96	7,86	12,76
	0,453	0,212	8,16	–	7,76	30,69	8,06	42,12	8,22	32,02
Костромская ГРЭС	0,686	0,108	8,0	–	8,37	52,95	8,37	53,00	8,4	49,07

Для питательной воды котлов СКД и ССКП возникает другая проблема, связанная с точностью измерений pH в сверхчистых средах. Сравнительный анализ измеренных значений  $\chi$  и pH (табл. 1) показывает, что измеренные значения  $\chi$  питательной воды блока Конаковской ГРЭС ( $\chi = 0,453$  мкСм/см) меньше, чем аналогичная величина блока Костромской ГРЭС ( $\chi = 0,686$  мкСм/см), а измеренное значение pH (pH = 8,16) больше аналогичного значения Костромской ГРЭС (pH = 8,0), чего не может быть. Поэтому расчетное значение pH = 8,37 более достоверное, по сравнению с измеренной величиной. Для условий питательной воды энергоблоков СКД и ССКП требуется разработка специальной методики калибровки pH-метров.

Представленные варианты расчетной методики базируются на штатных измерениях в системах химического контроля и не требуют сколько-нибудь существенных изменений и дополнений в системы АХК. Основу предложенных расчетных методик составляет сочетание частных решений обобщенной ММ ионных равновесий и измерений удельной электропроводности прямой и H-катионированной

проб водного теплоносителя. Предложенные расчетные методики проверены в условиях промышленной эксплуатации на ТЭС и частично реализованы в разработках новых приборов и систем автоматического химического контроля.

### Список литературы

1. **Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Проблемы организации водно-химических режимов на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. – 2002. – № 7. – С. 2–7.
2. **Богачев А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б.** Особенности эксплуатации и повреждаемость котлов-утилизаторов бинарных парогазовых установок. – М.: Энергоатомиздат. – 2008. – С. 232.
3. **Егошина О.В., Воронов В.П., Назаренко М.П.** Современное состояние систем химико-технологического мониторинга на тепловых станциях на основе опыта МЭИ – ООО НИЦ «Элемент» // Теплоэнергетика. – 2013. – № 7.
4. **Расчетный метод определения потенциально кислых веществ в питательной воде прямоточных котлов / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, А.Б. Ларин и др.** // Теплоэнергетика. – 2008. – № 4. – С. 38–41.
5. **Определение концентрации фосфатов в котловой воде путем измерения электропроводности.**

сти / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, Ю.Ю. Тихомирова, С.В. Кьет // Теплоэнергетика. – 2008. – № 7. – С. 21–27.

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

7. **Бушуев Е.Н.** Математическое моделирование ионных равновесий водного теплоносителя с использованием измерения электропроводности и pH // Теплоэнергетика. – 2009. – №7. – С. 13–18.

#### References

1. Voronov, V.N., Petrova, T.I. Problemy organizatsii vodno-khimicheskikh rezhimov na teplovykh elektrostantsiyakh [Problems of organizing water-chemical modes at thermal power plants]. *Teploenergetika*, 2002, no. 7, pp. 2–7.

2. Bogachev, A.F., Radin, Yu.A., Gerasimenko, O.B. *Osobennosti ekspluatatsii i povrezhdaemost' kotlov-utilizatorov binarnykh parogazovykh ustanovok* [Operation and damageability of heat recovery boilers in combined-cycle power plants]. Moscow, Energoatomizdat, 2008, p. 232.

3. Egoshina, O.V., Voronov, V.P., Nazarenko, M.P. *Sovremennoe sostoyanie sistem khimiko-tehnologicheskogo monitoringa na teplovykh stantsiyakh na osnove opyta MEI – OOO NITs «Element»* [State-of-the-art of chemical and technological monitor-

ing systems at heat power stations based on the experience of MEI – LLC Research Center Element]. *Teploenergetika*, 2013, no. 7.

4. Larin, B.M., Bushuev, E.N., Larin, A.B., Batti, M.K.L., Vinogradov, V.N., Kiet, S.V. *Raschetnyy metod opredeleniya potentsial'no kislykh veshchestv v pitatel'noy vode pryamotoknykh kotlov* [A calculation technique of identifying potentially sour substances in feedwater of non-circulation boilers]. *Teploenergetika*, 2008, no. 4, pp. 38–41.

5. Larin, B.M., Bushuev, E.N., Tikhomirova, Yu.Yu., Kiet, S.V. *Opredelenie kontsentratsii fosfatov v kotlovoy vode putem izmereniya elektroprovodnosti* [Determining of phosphates concentration in boiler water through conductivity measurement]. *Teploenergetika*, 2008, no. 7, pp. 21–27.

6. Larin, B.M., Larin, A.B., Kolegov, A.V. *Izmereniya elektroprovodnosti i pH v sistemakh monitoringa vodnogo rezhima TES* [Measurements of conductivity and pH in heat power plant water mode monitoring systems]. Ivanovo, 2014. 332 p.

7. Bushuev, E.N. *Matematicheskoe modelirovaniye ionnykh ravnesiy vodnogo teponositelya s ispol'zovaniem izmereniya elektroprovodnosti i pH* [Mathematical modeling of ionic balances of the water heat carrier by measuring conductivity and pH]. *Teploenergetika*, 2009, no. 7, pp. 13–18.

*Ларин Андрей Борисович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, e-mail: yaandy\_81@mail.ru

*Сорокина Анастасия Ярославовна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», инженер кафедры химии и химических технологий в энергетике, e-mail: nasy\_0307@mail.ru