

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ И pH В СИСТЕМАХ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВОДНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ¹

© 2023 г. А. Б. Ларин^а *, С. В. Киет^б, К. В. Зотова^а, Е. Г. Ухалова^а

^аИвановский государственный энергетический университет,
Рабфаковская ул., д. 34, г. Иваново, 153003 Россия

^бООО НПП “Техноприбор”, Октябрьский просп., д. 112, корп. 4,
г. Люберцы, Московская обл., 140002 Россия

*e-mail: yaandy_81@mail.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022 г.

После доработки 06.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

При переходе к новым технологиям на ТЭС и АЭС повышается эффективность работы энергоблоков, но при этом ужесточаются требования к качеству водного теплоносителя. Зарубежные и отечественные нормативные документы дополняются показателями качества теплоносителя, в частности удельной электрической проводимостью прямой χ и Н-катионированной $\chi_{\text{Н}}$ проб всех потоков воды и пара, концентрацией хлоридов и органических веществ в питательной воде и паре при $\chi_{\text{Н}} = 0.2\text{--}0.3$ мкСм/см. Непрерывные автоматические измерения в этих условиях достаточно надежно обеспечиваются кондуктометрами и отчасти рН-метрами, а развитие информационных технологий позволяет реализовать методики расчета некоторых показателей качества по результатам измерений. Приведены аналитические выражения для расчета рН и концентраций органических кислот в конденсате и питательной воде, фосфатов и натрия в котловой воде, хлоридов, бикарбонатов и удельной электрической проводимости дегазированной пробы в паре. Показана возможность использования вычислительных алгоритмов для анализа состояния водно-химического режима (ВХР), приведена система уравнений математической модели ионных равновесий, использованная в отечественном анализаторе качества питательной воды энергетических котлов.

Ключевые слова: автоматический химический контроль, водно-химический режим, расчет показателей качества теплоносителя, анализатор качества питательной воды и конденсата пара, водородный показатель, удельная электрическая проводимость, солесодержание, углекислота

DOI: 10.56304/S0040363623060073

Качество теплоносителя энергоблоков ТЭС нормируется во всех потоках воды и пара (два–пять показателей качества в каждом потоке) [1–3]. При этом наиболее востребованным и надежным показателем является удельная электрическая проводимость охлажденных проб. Измерения удельной электрической проводимости выполняются кондуктометрическими приборами в прямых и Н-катионированных пробах теплоносителя с приведением значений показателей к температуре 25°C. В питательной воде энергоблоков χ характеризует концентрацию подщелачивающего реагента — аммиака или амина, $\chi_{\text{Н}}$ — концентрацию солевых компонентов, обычно относимую к NaCl и норми-

руемую на уровне не более 0.3 мкСм/см. Наряду с удельной электрической проводимостью наиболее важным показателем автоматического химического контроля является рН (нормируемый или диагностический), определяющий коррозионную агрессивность среды по отношению к различным конструкционным материалам и измеряемый в охлажденных пробах теплоносителя [4, 5].

В отличие от удельной электрической проводимости, результаты измерения рН в “чистой” воде (конденсат пара, добавочная обессоленная и питательная вода при малых количествах или отсутствии подщелачивающих реагентов при рН = 6.0–8.0) малонадежны даже при измерениях в пробах, защищенных от контакта с окружающей средой — атмосферным воздухом. В этих случаях значение рН может определяться косвенным способом, например по результатам измерения χ

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00432).

и χ_H [6, 7]. При дозировании в питательную воду аммиака рН можно вычислить по формуле

$$\text{pH} = 8 + \lg(3.068\chi - 1.2\chi_H - 1.9\chi_H^2). \quad (1)$$

По этому выражению можно рассчитать рН охлажденных проб питательной воды котлов-утилизаторов энергоблоков ПГУ, а также паровых барабанных котлов давлением 13.8 МПа и прямоточных котлов давлением 23.0 МПа, питаемых глубоко обессоленной добавочной водой при погрешности измерения значений χ и χ_H равной 3%.

При современном развитии информационных технологий открываются большие возможности использования результатов измерения удельной электрической проводимости и рН для повышения информативности расчета по показателям качества теплоносителя, в том числе концентраций неорганических и некоторых органических веществ [8–10]. Так, концентрацию фосфатов в котловой воде барабанных котлов $C_{\text{PO}_4^{3-}}$, мг/дм³, можно рассчитать по данным измерений удельной электрической проводимости Н-катионированной пробы питательной воды ($\chi_{\text{Н.п.в}}$) и котловой воды солевого отсека ($\chi_{\text{Н.с.о}}$), мкСм/см [8, 11], используя выражение

$$C_{\text{PO}_4^{3-}} = 0.246\chi_{\text{Н.с.о}} - 1.62\chi_{\text{Н.п.в}}. \quad (2)$$

Зная результаты измерения $\chi_{\text{с.о}}$, $\chi_{\text{Н.с.о}}$ и водородного показателя рН_{с.о} в охлажденной пробе котловой воды солевого отсека, можно определить концентрацию катионов натрия в солевом отсеке по формуле

$$C_{\text{Na}^+\text{с.о}} = 0.193\chi_{\text{с.о}} + 0.012\chi_{\text{Н.с.о}} - 0.102\chi_{\text{Н.п.в}} - 0.025 \times 10^{\text{pH}_{\text{с.о}}-8}. \quad (3)$$

Таким образом, увеличение электрической проводимости котловой воды солевого отсека еще не означает повышенную дозировку фосфатов, а может быть связано с ухудшением качества добавочной воды или присосами в конденсаторе паровой турбины.

Концентрация потенциально кислых органических примесей питательной воды прямоточных котлов сверхкритического (СКД) и суперсверхкритического (ССКД) давления может быть рассчитана по результатам измерений удельной электрической проводимости Н-катионированных проб питательной воды и конденсата пара в пересчете на концентрацию уксусной кислоты $C_{\text{у.к}}$, мкмоль/дм³ [12]:

$$C_{\text{у.к}} = 1000(\chi_{\text{Н.с.п}} - \chi_{\text{Н.п.в}}) / (\lambda_{\text{H}^+} + \lambda_{\text{CH}_3\text{COO}^-}), \quad (4)$$

или в микрограммах на кубический дециметр

$$C_{\text{у.к}} = 153.6(\chi_{\text{Н.с.п}} - \chi_{\text{Н.п.в}}),$$

где $\chi_{\text{Н.с.п}}$ – удельная электрическая проводимость Н-катионированных проб свежего пара; λ_{H^+} , $\lambda_{\text{CH}_3\text{COO}^-}$ – эквивалентная электрическая проводимость ионов H^+ и CH_3COO^- , См · см²/моль.

Концентрации в паре подщелачивающего агента и уголекислоты, рН и солесодержание могут быть определены по результатам измерения χ , χ_H и рН в охлажденных пробах теплоносителя по методике, изложенной в [9]. В частности, для конденсата пара технологических паровых котлов и котлов-утилизаторов при рН < 8 и $\chi_H > 1$ мкСм/см удельная электрическая проводимость $\chi_{\text{п}}$, мкСм/см, может быть рассчитана по выражению

$$\chi_{\text{п}} = 0.1265 C_{\text{Cl}^-} + 0.2484 \times 10^{\text{pH}-8} + 0.2997 \times 10^{6-\text{pH}} + 0.1181 C_{\text{HCO}_3^-}, \quad (5)$$

где

$$C_{\text{Cl}^-} = \frac{1000\chi_H}{426.2(1+n) - 31.9n} \quad (6)$$

– концентрация хлоридов, мкмоль/дм³;

$$C_{\text{HCO}_3^-} = C_{\text{Cl}^-} n \frac{0.45 + 2.345\chi_H}{0.45 + 10^{6-\text{pH}}} \quad (7)$$

– концентрация гидрокарбонатов, мкмоль/дм³; n – эмпирический параметр, представляющий собой отношение концентрации гидрокарбонатов к концентрации хлоридов в Н-катионированной пробе.

При измерении в охлажденных пробах χ , χ_H и рН (с приведением к 25°C) значение эмпирического параметра n может быть уточнено и далее определены концентрации свободной и связанной уголекислоты, аммиака и NaCl (табл. 1).

Результаты измерений χ и рН используются также при расчете удельной электрической проводимости дегазированной пробы конденсата пара ($\chi_{\text{Н.дег}}$). Такая задача особенно актуальна для энергоблоков ПГУ малой и средней мощности (до 150 МВт) в связи с высоким содержанием уголекислоты в питательной воде и паре, увеличивающим χ_H сверх нормативного значения. Высокое содержание уголекислоты приводит к ухудшению качества пара технологических котлов давлением 4 МПа. Поэтому важной задачей становится вычисление истинного солесодержания пара и концентрации коррозионно-опасной уголекислоты по значению $\chi_{\text{Н.дег}}$. Расчет $\chi_{\text{Н.дег}}$ в паровом потоке может быть выполнен согласно [13].

Возможность определения упомянутых ранее показателей качества водного теплоносителя энергетических котлов и парогенераторов базируется на решении системы алгебраических уравнений, описывающих ионные равновесия в раз-

Таблица 1. Результаты измерений и расчета нормируемых и диагностических показателей качества водного теплоносителя ($n = 1$)

Место контроля	Измерения				Расчет				
					рН	концентрация, мкг/дм ³			
	χ , мкСм/см	χ_N , мкСм/см	рН	C_{NH_3} , мкг/дм ³		C_{Cl^-} усл	$C_{HCO_3^-}$	$C_{NH_4^+}$	C_{CO_2}
Питательная вода									
Петрозаводская ТЭЦ, барабанный котел (13.8 МПа)	4.60	0.225	9.20	587	9.22	9.585	35.99	567	—
Северо-Западная ТЭЦ, ПГУ 450 МВт	8.04	0.190	9.47	1400	9.47	8.165	28.06	1330	20.2
Перегретый пар энергоблока ПГУ высокого давления (ППВД)									
Прегольская ТЭС, ПГУ 60 МВт	2.80	0.860	8.83	—	8.87	37.275	350.14	337	252
Уренгойская ГРЭС, ПГУ 450 МВт	4.48	0.410	9.29	—	9.20	17.750	95.77	557	69
Насыщенный пар котла Е-220-3.9-440 ДКГ									
АО «Фосагро» (г. Череповец)	2.82	2.340	6.20	330	6.20	74.550	1226.10	342	2128

Примечание. C_{Cl^-} усл — суммарная концентрации анионов хлоридов, сульфатов и нитратов в пересчете на концентрацию хлоридов.

личных потоках воды и пара [14, 15]. Достоверность результатов расчета рН, концентрации аммиака, фосфатов и других показателей оценивалась в экспериментах, проведенных на лабораторном стенде [16] и действующем энергетическом оборудовании. Отдельные результаты измерений и расчетов приведены в табл. 1. Данные этой таблицы подтверждают возможность косвенного определения некоторых важных показателей качества водного теплоносителя в режиме оперативного химического контроля, что позволяет обнаружить и своевременно устранить возникшие нарушения водно-химического режима.

Таким образом, благодаря расчету некоторых (основных) показателей качества водного теплоносителя возможно диагностировать состояние ВХР водопарового тракта при измерении χ , χ_N и рН. Так, для питательной воды энергоблока ПГУ при $\chi_{Н.п.в} = 2.5$ мкСм/см значение рН в зависимости от χ_N изменяется согласно рис. 1.

На рис. 1 видно, что при увеличении χ_N от 0.1 до 1.0 мкСм/см рН снижается в пределах 0.2 ед. при всех значениях n , тогда как повышение χ_N до 1.5 мкСм/см приводит к резкому уменьшению рН от 8.8 до 8.15 уже при увеличении n с 0.1 до 1.0 и далее к уменьшению до 7.35 при $n = 1.5$.

Другим примером может служить расчет удельной электрической проводимости дегазированной

ванной пробы $\chi_{Н.дег}$. Эффективность дегазации пробы конденсированного пара зависит от конструкции дегазатора и состава примесей в анализируемой пробе. Конструкция анализатора AMI Deltacon DG фирмы SWAN предполагает возможность изменения расхода барботажного азота для дегазации пробы, поэтому степень удаления свободной углекислоты $\alpha_{дег}$ может быть принята равной 0.90–0.99.

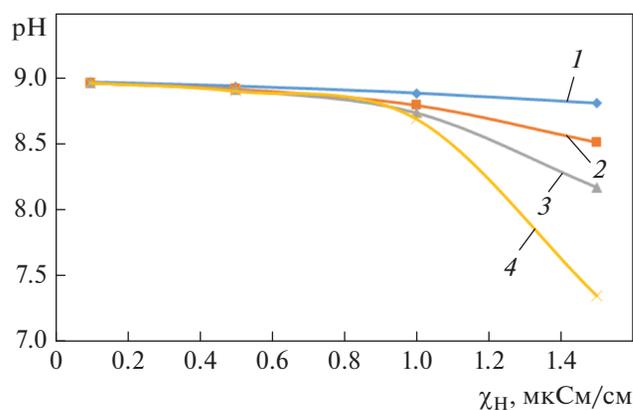


Рис. 1. Расчетная зависимость рН предельно разбавленного водного раствора ($\chi_{Н.п.в} = 2.5$ мкСм/см) от χ_N .
 n : 1 — 0.1; 2 — 0.55; 3 — 1.0; 4 — 1.5

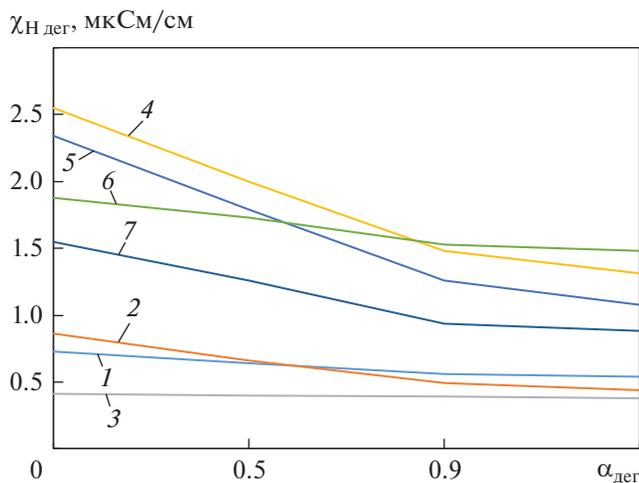


Рис. 2. Расчетные зависимости удельной электрической проводимости конденсированной дегазированной Н-катионированной пробы пара некоторых котлов. Котел, установленный на ТЭС: 1, 2 – Прегольской; 3 – Уренгойской; 4, 5 – котел-утилизатор Е-220-3.9-440 ДКГ; 6, 7 – барабанный котел (9.8 МПа) АО “Северсталь”

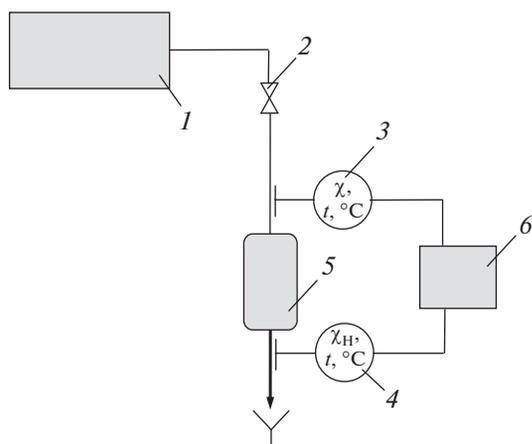


Рис. 3. Схема устройства калибровки рН-метра. 1 – устройство подготовки пробы; 2 – регулирующий вентиль; 3, 4 – датчик измерения удельной электрической проводимости; 5 – Н-катионитный фильтр; 6 – блок обработки результатов измерений

Расчеты показателей качества пара некоторых котлов приведены в табл. 1. На рис. 2 показаны расчетные зависимости $\chi_{Н\text{дег}}$ от степени удаления свободной углекислоты.

Возможность расчета концентрации преобладающих ионных примесей водного теплоносителя по измерениям удельной электрической проводимости и рН в охлажденных пробах дает основание для создания автоматических анализаторов качества воды и пара. В тепловой и атомной энер-

гетике получили распространение зарубежные анализаторы фирмы SWAN, такие как FAM Deltacon рН для расчета рН и AMI Deltacon Power для расчета рН и концентрации аммиака по результатам измерения $\chi_{п.в}$ и $\chi_{Н\text{ п.в}}$. Известны анализаторы фосфатов и общего органического углерода, основанные также на измерениях χ охлажденных проб [14]. Предпринимаются попытки создания анализаторов аминокислотных реагентов с использованием результатов фотоколориметрических измерений [17].

Не отстают от зарубежных и отечественные производители приборов химического контроля, представленные фирмами НПП “Техноприбор” (Москва) и “Взор” (г. Нижний Новгород), освоившими выпуск комплекта приборов автоматического химического контроля, включая устройства подготовки пробы. Так, НПП “Техноприбор” производит “линейку” анализаторов под общим названием “Лидер”, среди которых выделяется анализатор качества конденсата и питательной воды “Лидер АПК”, превосходящий зарубежные аналоги как по диапазону измерений, так и по перечню определяемых параметров, а также по способу калибровки измерений рН непосредственно в рабочих условиях анализатора [6]. Схема реализации способа показана на рис. 3. По измеренным значениям χ и $\chi_{Н}$ рассчитывается значение рН, которое устанавливается на калибруемом рН-метре.

Значение рН можно определить путем решения системы следующих уравнений ионных равновесий:

уравнения диссоциации слабых электролитов

$$C_{H^+}C_{HCO_3^-} = K_1C_{H_2CO_3}; \quad C_{H^+}C_{CO_3^{2-}} = K_{II}C_{HCO_3^-};$$

$$C_{NH_4^+}C_{OH^-} = K_{NH_4OH}C_{NH_4OH};$$

уравнение электронейтральности для анализируемой воды

$$C_{H^+} + C_{Na^+_{\text{усл}}} + C_{NH_4^+} =$$

$$= C_{OH^-} + C_{HCO_3^-} + 2C_{CO_3^{2-}} + C_{Cl^-_{\text{усл}}};$$

уравнение электрической проводимости для анализируемой воды

$$1000\chi = \lambda_{H^+}C_{H^+} + \lambda_{Na^+}C_{Na^+_{\text{усл}}} + \lambda_{NH_4^+}C_{NH_4^+} +$$

$$+ \lambda_{OH^-}C_{OH^-} + \lambda_{HCO_3^-}C_{HCO_3^-} + 2\lambda_{CO_3^{2-}} + \lambda_{Cl^-}C_{Cl^-_{\text{усл}}};$$

уравнения, описывающие диссоциацию слабых электролитов в фильтрате Н-катионитного фильтра,

$$C_{H^+}C_{OH^-} = K_w; \quad C_{H^+}C_{HCO_3H} = K_1C_{H_2CO_3H};$$

уравнение электронейтральности для фильтрата Н-катионитного фильтра

$$C_{H^+H} + C_{Na^+H} = C_{HCO_3^-} + C_{Cl^-_{\text{усл}}};$$

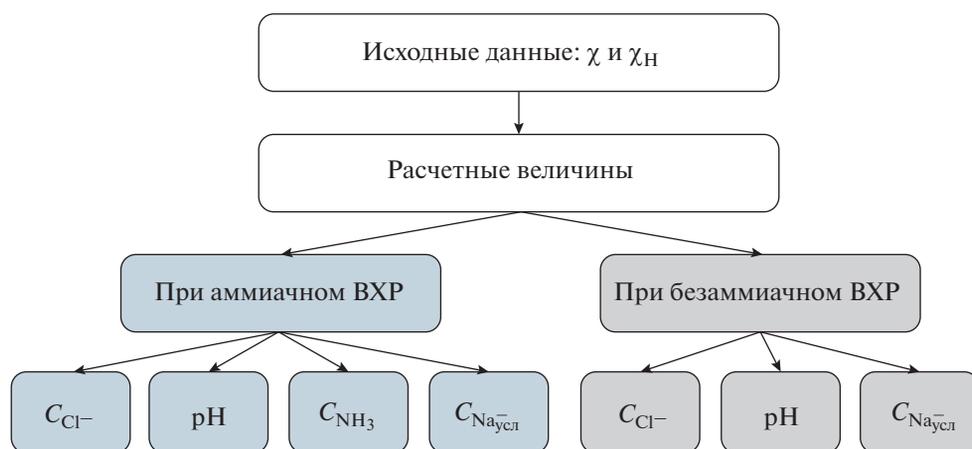
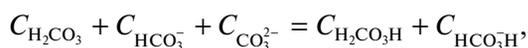


Рис. 4. Схема разработанного алгоритма расчета

уравнение удельной электрической проводимости для фильтрата Н-катионитного фильтра

$$1000\chi = \lambda_{\text{H}^+} C_{\text{H}^+\text{H}} + \lambda_{\text{Na}^+} C_{\text{Na}^+\text{H}} + \lambda_{\text{HCO}_3^-} C_{\text{HCO}_3^-\text{H}} + \lambda_{\text{Cl}^-} C_{\text{Cl}^-\text{усл}};$$

балансовое уравнение форм состояния углекислоты



где C_{H^+} , $C_{\text{NH}_4^+}$, $C_{\text{HCO}_3^-}$, $C_{\text{CO}_3^{2-}}$, C_{OH^-} – концентрации соответствующих ионов, моль/дм³; $C_{\text{Na}^+\text{усл}}$ – суммарная концентрация ионов натрия, кальция и магния в анализируемой пробе в пересчете на концентрацию ионов натрия, моль/дм³; $C_{\text{H}^+\text{H}}$, $C_{\text{Na}^+\text{H}}$, $C_{\text{HCO}_3^-\text{H}}$, $C_{\text{CO}_3^{2-}\text{H}}$, $C_{\text{OH}^-\text{H}}$ – концентрации соответствующих ионов в фильтрате Н-катионитного фильтра, моль/дм³; K_w , K_I , K_{II} , $K_{\text{NH}_4\text{OH}}$ – концентрационные константы ионных равновесий воды, углекислоты по первой и второй ступеням и аммиака; λ_{H^+} , λ_{Na^+} , $\lambda_{\text{HCO}_3^-}$, λ_{Cl^-} – эквивалентная

электрическая проводимость соответствующего иона, См · см²/г-эquiv.

Решение системы уравнений реализуется на базе результатов измерения χ , χ_{H} как в случае присутствия аммиака в пробе воды, так и при его отсутствии (рис. 4). В обоих случаях (аммиачный и безаммиачный ВХР) получение численного результата обеспечивается вводом эмпирического параметра n , определяемого из условий работы Н-катионитного фильтра, качества конденсата и питательной воды энергетических котлов [7–9].

В табл. 2 представлены результаты измерений и расчета рН водных растворов как с дозированием аммиака (номера проб 1–3), так и без него (номера проб 4–7). Данные апробации способа измерений и расчета показателей качества питательной воды для прямоточных котлов СКД энергоблоков различных ТЭС приведены в табл. 3.

Концентрация ионов натрия при расчете по предложенному методу определяется как суммарная концентрация катионов Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} в питательной воде или конденсате в пересчете на натрий и потому отличается от нормируемого

Таблица 2. Результаты измерений и расчетов контролируемых показателей качества воды в условиях лабораторного стенда

Номер пробы	Измерения				Расчет	
	χ , мкСм/см	χ_{H} , мкСм/см	рН	C_{NH_3} , мкг/дм ³	рН	C_{NH_3} , мкг/дм ³
1	8.040	0.190	9.47	1400	9.47	1397
2	5.420	0.900	9.20	700	9.24	744
3	2.850	0.900	9.00	318	8.90	300
4	0.280	0.270	7.80	–	7.87	–
5	0.270	0.152	7.90	–	7.93	–
6	0.164	0.204	6.80	–	6.77	–
7	0.142	0.189	6.52	–	6.58	–

Таблица 3. Результаты измерений и расчетов контролируемых показателей качества питательной воды для прямоточных котлов СКД

ГРЭС	Измерения			Расчет
	χ , мкСм/см	χ_H , мкСм/см	pH	pH
Конаковская	0.195	0.183	7.64	7.66
	0.453	0.212	8.16	8.13
Нижневартовская	0.560	0.085	8.25	8.29
	0.590	0.070	8.32	8.32
Пермская	0.280	0.080	7.99	7.97
	0.270	0.090	7.99	7.95

значения, однако в большей степени характеризует накипеобразующую способность примесей питательной воды. Расчет pH основан на результатах измерения удельной электрической проводимости, в отличие от измерений ЭДС пары электродов в pH-метре, что повышает точность и надежность данных, полученных для предельно разбавленных растворов,

Принятый подход отвечает требованиям СТО ВТИ-2009 [2] и зарубежных нормативных документов [3] и может использоваться для оперативного автоматического химического контроля качества питательной воды и пара барабанных и прямоточных энергетических котлов.

ВЫВОДЫ

1. Результатом проведенной работы является создание методов расчета некоторых нормируемых и диагностических показателей качества водного теплоносителя энергоблоков и технологических котлов.

2. Расчетные выражения представляют собой зависимости контролируемых параметров водно-химического режима от непрерывно измеряемых удельной электрической проводимости и pH в охлажденных пробах и могут использоваться для оперативного химического контроля на ТЭС.

3. Достоверность расчетных показателей концентраций некоторых примесей (аммиака, фосфатов), а также значения pH подтверждена результатами лабораторных опытов и промышленных испытаний, представленных в данной статье и других публикациях авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
- СТО 70238424.27.100.013-2009.** Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условие создания. Нормы и требования. Стандарт организации. М.: НП "ИнВЭЛ", 2009.
- European standart EN 12952-12:** 2003. Water-tube boilers and auxiliary installation – Part 12: Requirement for boiler feedwater and boiler water quality.
- Petrova T.I., Selivanov E.A.** Using of Pourbaix diagram for evaluation of water chemistry recommended for ultra-supercritical parameter of water coolant // Proc. of the Intern. Conf. "Problems of Thermal Physics and Power Engineering" (PTPPE-2017). Moscow, Russia, 9–11 Oct. 2017 // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. P. 012262.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012262>
- Ларин Б.М.** Химия водного теплоносителя: учеб. пособие. Иваново: ИГЭУ, 2021.
- Пат. РФ № 2659333.** Способ калибровки pH-метров / Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, В.Г. Киет, С.В. Киет. Заявл. 14.07.2017. Оpubл. 29.06.2018 // Б.И. 2018. № 19.
- Измерение pH** в условиях сверхчистой среды конденсата и питательной воды энергоблоков / А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, А.Я. Сорокина, С.В. Киет // Теплоэнергетика. 2018. № 11. С. 97–102.
<https://doi.org/10.1134/S004036361811005X>
- Ларин Б.М., Ларин А.Б., Бушуев Е.Н.** Определение концентрации солевых компонентов в котловой воде по результатам измерения удельной электрической проводимости и pH // Теплоэнергетика. 2019. № 8. С. 74–80.
<https://doi.org/10.1134/S0040363619080058>
- Ларин Б.М., Ларин А.Б., Савинов М.П.** Расчетное определение качества пара энергетических котлов по измерению удельной электрической проводимости и pH // Теплоэнергетика. 2021. № 5. С. 63–71.
<https://doi.org/10.1134/S0040363621040032>
- О поведении органических примесей** в тракте тепловой электростанции с барабанными котлами / Т.И. Петрова, О.С. Ермаков, Б.Ф. Ивин, Э.Г. Амосова, Н.Б. Мотовилова // Теплоэнергетика. 1995. № 7. С. 20–24.
- Пат. РФ № 2389014.** Способ определения концентрации фосфатов в котловой воде барабанных энергетических котлов / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, А.Б. Ларин, Н.А. Еремина. Зарег. 10.05.2010 // Б.И. 2010. № 13.
- Пат. РФ № 2329500. МПК G01N33/18, G01N27/06.** Способ определения концентрации кислых продуктов термолитиза органических примесей в паре прямоточных энергетических котлов / Б.М. Ла-

- рин, Е.Н. Бушуев, М.К.Л. Бати, А.Б. Ларин. Заявл. 19.03.2007. Оpubл. 20.07.2008 // Б.И. 2008. № 20.
13. **Свид. РФ № 2022680268** о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета удельной электропроводности дегазированной пробы конденсата водяного пара / А.Б. Ларин, Е.Н. Бушуев, С.В. Кьет, М.П. Савинов. Дата публ. 28.10.2022 // Б.И. 2022. № 11.
 14. **Ларин А.Б.** Разработка метода химического контроля на основе измерений электропроводности и рН и совершенствование систем обеспечения водно-химического режима на ТЭС: дис. ... докт. техн. наук. Иваново: ИГЭУ, 2017.
 15. **Иванова А.Я.** Совершенствование химического контроля водного теплоносителя энергоблоков ПГУ на основе измерений электропроводности и рН: дис. канд. техн. наук. Иваново: ИГЭУ, 2019.
 16. **Пат. РФ № 2658020. МПК C02F1/44, C02F9/00, G01N1/10, G01N35/08, G01N33/18, G09B23/24.** Лабораторная установка обратного осмоса и химического обессоливания / А.Б. Ларин, Д.С. Трухин, А.Я. Сорокина (Иванова), Н.В. Власов. Заявл. № 2016147131 от 24.03.2016. Оpubл. 19.06.2018 // Б.И. 2018. № 17.
 17. **Stansfield H.** Online analysis of film forming amines // Power Plant Chem. 2021. V. 2. P. 86–93.

Prediction Methods Based on Electrical Conductivity and pH Measurements in Water Coolant Chemical-Monitoring Systems

A. B. Larin^{a, *}, S. V. Kiet^b, K. V. Zotova^a, and E. G. Ukhalova^a

^a Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo 153003 Russia

^b OOO NPP Tekhnopribor, Lyubertsy, Moscow oblast, 140002 Russia

*e-mail: yaandy_81@mail.ru

Abstract—A shift for applying new technologies at thermal and nuclear power plants makes it possible to achieve more efficient operation of power units; in this case, however, more stringent requirements are posed to the water-coolant quality. Foreign and Russian national regulatory documents are supplemented with coolant quality indicators, in particular, the electrical conductivity of direct χ and H-cationized χ_H samples of all water and steam flows and the concentrations of chlorides and organic substances in feed water and steam at $\chi_H = 0.2\text{--}0.3 \mu\text{S/cm}$. Continuous automatic measurements are supported under these conditions with sufficient reliability by conductivity meters and partially by pH meters, and the progress in the development of information technologies opens the possibility to implement procedures for predicting certain quality indicators based on measurement results. The article presents analytical expressions for predicting the pH value and concentrations of organic acids in condensate and feed water, phosphates and sodium in boiler water, chlorides, bicarbonates, and electrical conductivity of a degassed steam sample. The possibility of using computation algorithms for analyzing the water chemistry (WC) state is shown, and the system of equations for the ionic equilibria mathematical model that is used in the domestically produced instrument for analyzing the feed-water quality of power-generating boilers is given.

Keywords: automatic chemical monitoring, water chemistry, prediction of coolant quality indicators, feed water and steam condensate quality analyzer, hydrogen ion exponent (pH value), electrical conductivity, salt content, carbonic acid