

## Обоснование использования эмпирических параметров и алгоритма расчета математической модели котловой воды

А.Б. Ларин, А.В. Колегов  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
Иваново, Российская Федерация  
E-mail: admin@xxte.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Необходимость оптимизации химического контроля водного теплоносителя энергоблоков ТЭС, в том числе, с барабанными котлами, снижение объема ручного оперативного контроля и повышение достоверности и информативности наиболее надежных автоматических приборов, таких как кондуктометры и рН-метры, являются актуальными проблемами в энергетике. Разработку нового метода автоматического химического контроля обеспечивает решение упрощенной математической модели ионных равновесий.

**Материалы и методы:** Для подтверждения точности расчетов математической модели ионных равновесий котловой воды солевого отсека барабанного котла сверхвысокого давления проведены лабораторный и промышленный эксперименты.

**Результаты:** Представлено обоснование использования эмпирических параметров и алгоритма расчета математической модели котловой воды барабанных котлов сверхвысокого давления. Приведена блок-схема алгоритма расчета концентраций ионных примесей питательной и котловой вод. Произведена оценка влияния эмпирических параметров на расчет концентрации фосфатов котловой воды солевого отсека.

**Выводы:** Разработанный алгоритм позволяет по измерениям удельной электропроводности охлажденных Н-катионированных проб питательной воды и котловой воды солевого отсека рассчитывать концентрацию фосфатов в котловой воде в пределах допустимой ошибки.

**Ключевые слова:** питательная вода, котловая вода, электропроводность, фосфаты, автоматический контроль, алгоритм, математическая модель.

## Grounds for using empirical parameters and calculation algorithm of mathematical model of boiler water

A.B. Larin, A.V. Kolegov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: admin@xxte.ispu.ru

### Abstract

**Background:** The necessities of optimizing chemical control of water heat carrier of power-generating unit at thermal power-stations, including stations with drum boilers, decreasing the volume of human operational monitoring and increasing integrity and information capacity of the most reliable automatic devices such as conductometer and ph-meters, are the most urgent problems in power engineering. The development of a new method of automatic chemical monitoring is carried out by means of the simplified mathematical model of ion equilibria.

**Materials and Methods:** Laboratory and full-scale experiment were carried out to prove out the calculation accuracy of the mathematical model of ion equilibria of boiler water in salt box of extreme pressure drum boiler.

**Results:** Grounds for using empirical parameters and calculation algorithm of mathematical model of boiler water of extreme pressure drum boiler were presented. Block scheme of the calculation algorithm of ionic contaminant concentration of feed and boiler water was presented. The estimation of empirical parameters influence on the calculation of phosphates concentration of boiler water in salt box was made.

**Conclusions:** The developed algorithm allows to calculate the concentration of phosphates in boiler water within the limits of tolerate error according to the measurements of specific conductivity of the cooled hydrogen ion polishing samples of feed water and boiler water of salt box.

**Key words:** feed water, boiler water, electroconductivity, phosphates, automatic monitoring, algorithm, mathematical model.

Разработанная математическая модель ионных равновесий охлажденных проб котловой воды с давлением в котле 13,8 МПа [1–3] реализуется при минимальном числе приборных измерений и содержит несколько эмпирических параметров.

Таковыми параметрами являются:

•  $n$  – отношение концентрации бикарбонатов и суммарной концентрации анионов сильных

кислот, выраженной в пересчете на хлорид ионы в Н-катионированной пробе питательной воды (диапазон изменения  $n = 0, 1-1, 0$ );

•  $K_k$  – коэффициент концентрирования примесей питательной воды до концентрации в солевом отсеке барабана котла ( $K_k = 5-15$ );

•  $b$  – щелочной коэффициент, зависящий от присутствия щелочи в добавляемом в котел рас-

творе тринатрий фосфата  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  ( $b = 1,0-5$ ) или присутствия кислой соли  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  ( $b = 0,5-1,0$ ).

Представленное в [1] решение системы уравнений при минимальном наборе автоматических измерений выполнено при средних значениях параметров:  $n = 0,55$ ,  $K_k = 10$ . Значение коэффициента  $b$  рассчитывается в процессе решения системы уравнений, описывающих математическую модель.

Посредством коэффициента  $b$  учитывается положительный вклад в концентрацию гидроксильных ионов в котловой воде со стороны избытка  $\text{NaOH}$  ( $\alpha$ ) или отрицательный вклад со стороны  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  ( $\beta$ ). И тот и другой «привязаны» к концентрации дозируемых в котловую воду фосфатов в виде выражения

$$[\text{OH}]_{\text{со, ф}} = [\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{со}} + \alpha[\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{со}} - \beta[\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{со}} = (1 + \alpha - \beta)[\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{со}} = b[\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{со}}.$$

При этом суммарная концентрация составляет  $[\text{OH}]_{\text{со}} = [\text{OH}]_{\text{со, фосфаты}} + [\text{OH}]_{\text{со, карбонаты}}$ .

Одновременное присутствие в дозируемом растворе  $\text{NaOH}$  и  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  исключено. Обычно имеет место избыток щелочи. Тогда  $\alpha = 0-4$  и  $\beta = 0$ . При этом  $b = 1-5$ .

Численное значение коэффициента  $b$  может быть определено в первом приближении по измеренному значению  $\text{pH}_{\text{со}}$  в виде  $b = 10^{(\text{pH}_{\text{со}} - 7) \cdot 14} / [\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{со}}$ , где числитель дроби отвечает вкладу в концентрацию  $[\text{OH}^-]_{\text{со}}$  со стороны фосфатов при  $\gamma = 0,10-0,15$ .

При расчете производится итерационное уточнение значения концентрации  $[\text{OH}^-]$  при заданном увеличении коэффициента  $b$  с окончанием расчета по условию превышения значения ( $\text{pH}_{\text{со}} - 0,2$ ). Увеличение коэффициента  $b$  можно задать от 1,0 через 0,25.

При отсутствии щелочи либо кислой соли в растворе тринатрий фосфата  $b = 1$  (режим чисто фосфатной щелочности).

Для практических целей важно знать величину ошибки расчетного определения концентрации фосфатов при отклонении от средних действительных значений параметров ( $n$ ,  $K_k$ ) в условиях промышленной эксплуатации. Такую оценку можно выполнить расчетным путем при помощи алгоритма косвенного определения концентраций ионных примесей питательной и котловой вод барабанных котлов сверхвысокого давления, изменяя значения параметров в реально возможном диапазоне.

Блок-схема алгоритма расчета концентраций ионных примесей питательной и котловой вод приведена на рис. 1. Согласно блок-схеме, исходными данными для расчета концентрации ионных примесей питательной и котловой вод являются: удельная электропроводность прямой пробы питательной воды, котловой воды солевого отсека; удельная электропроводность Н-катионированной пробы питательной воды, котловой воды солевого и чистого отсеков;  $\text{pH}$  питательной воды и котловой воды солевого отсека, а также температура пробы соответ-

ствующих потоков:  $\chi_{\text{пв}}$ ,  $\chi_{\text{со}}$ ,  $\chi_{\text{н, пв}}$ ,  $\chi_{\text{н, со}}$ ,  $\chi_{\text{н, чо}}$ ,  $\text{pH}_{\text{пв}}$ ,  $\text{pH}_{\text{со}}$ ,  $t$ , где  $\chi$  и  $\chi_{\text{н}}$  измеряются в мкСм/см.

Базу исходных данных дополняет константное обеспечение на основе справочных данных.

После проверки на достоверность исходных и измеренных данных производится расчет ионного состава питательной воды с учетом введения коэффициента  $n$ :

$$n = \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{н.пв}}}{[\text{Cl}^-]_{\text{н.пв}}}.$$

Полученные значения концентраций ионных примесей питательной воды используются в расчете ионных равновесий котловой воды солевого отсека.

Переход к расчетам ионного состава примесей котловой воды солевого отсека осуществляется с помощью коэффициента концентрирования анионов сильных кислот питательной воды  $K_k$  с учетом щелочного коэффициента  $b$ .

В результате расчета определяются концентрации фосфатов, анионов сильных кислот в пересчете на хлорид ионы, карбонатов, гидратов, натрия.

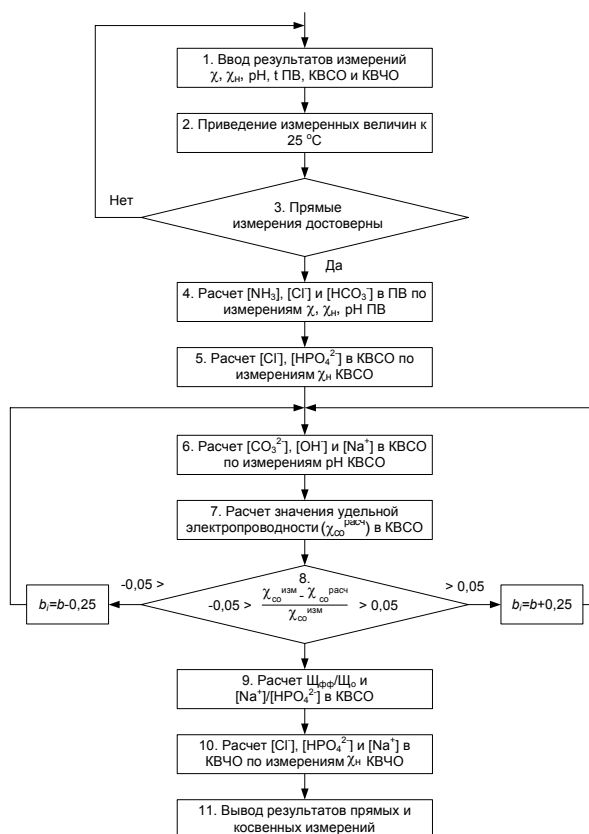


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета концентрации ионных примесей в котловой воде солевого и чистого отсеков барабанных котлов СВД:  $\chi$ ,  $\chi_{\text{н}}$ ,  $t$ ,  $\text{pH}$  – удельная электропроводность прямой пробы, удельная электропроводность Н-катионированной пробы, температура пробы; ПВ, КВСО, КВЧО – пробы питательной воды, котловой воды солевого отсека, котловой воды чистого отсека соответственно

Оценку влияния на результат расчета изменения параметров  $n$  и  $K_k$  определяем на при-

мере разового измерения и расчета при помощи разработанного алгоритма.

Для расчета выбираем минимальное, максимальное и среднее значения коэффициента  $n$  ( $n = 0,1; 0,55; 1,0$ ). Значения параметра  $K_k$  выбираем максимальное, минимальное, среднее, а также граничные значения, наиболее вероятные при нормальной работе котельного оборудования ( $K_k = 5; 8; 10; 12; 15$ ). Концентрация фосфатов рассчитывается для котловой воды солевого отсека.

Результаты расчета сведены в таблицу и представлены на рис. 2.

#### Результаты расчета концентрации фосфатов в котловой воде солевого отсека

Расчет при $n = 0,1$		Расчет при $n = 0,55$		Расчет при $n = 1,0$	
$K_k$	$PO_4^{3-}CO_3$ , мг/л	$K_k$	$PO_4^{3-}CO_3$ , мг/л	$K_k$	$PO_4^{3-}CO_3$ , мг/л
5	7,785	5	7,867	5	7,914
8	7,607	8	7,738	8	7,813
10	7,488	10	7,652	10	7,745
12	7,369	12	7,566	12	7,678
15	7,19	15	7,437	15	7,576

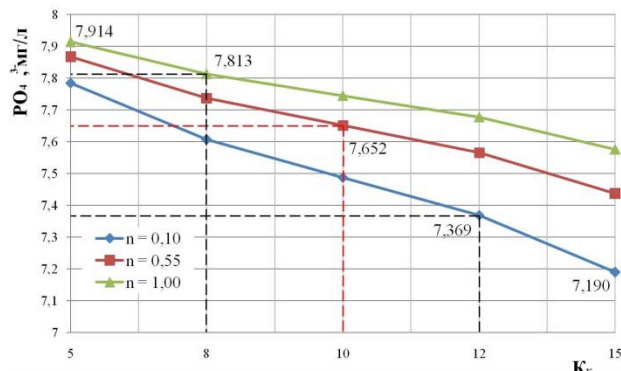


Рис. 2. Оценка влияния параметров  $n$  и  $K_k$  на результат расчета концентрации фосфатов в котловой воде солевого отсека

Анализ полученных результатов показал, что отклонение значения концентрации фосфатов при средних значениях параметров  $n = 0,55$  и  $K_k = 10$  от минимального значения концентрации фосфатов составляет 6,4 %, от максимального значения – 3,3 %. При значениях коэффициента концентрирования в пределах  $K_k = 8–12$ ,

*Ларин Андрей Борисович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. В, ауд. 430, телефон (4932) 38-57-83, e-mail: admin@xhte.ispu.ru

*Колегов Антон Валерьевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры химии и химических технологий в энергетике, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. В, ауд. 430, телефон (4932) 38-57-83, e-mail: admin@xhte.ispu.ru

соответствующих нормальной работе котельного агрегата, максимальное отклонение составляет 3,8 %.

## Заключение

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет по измерениям удельной электропроводности охлажденных Н-катионированных проб питательной воды и котловой воды солевого отсека рассчитывать концентрацию фосфатов в котловой воде солевого отсека в пределах ошибки до 10 % в широком диапазоне изменения качества питательной воды и режима работы котельного агрегата, что допустимо для оперативного автоматического химического контроля качества котловой воды барабанных котлов с давлением. В условиях стабильной работы барабанного котла с давлением 13,8 МПа расчетная ошибка определения концентрации фосфатов укладывается в 5%-ный интервал.

## Список литературы

1. Ларин А.Б. Математическая модель ионных равновесий барабанного котла // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 3.
2. Ларин Б.М., Ларин А.Б., Колегов А.В. Определение солевых примесей в котловой воде по измерению электропроводности и pH // Новое в Российской энергетике. – 2012. – № 4. – С. 33–40.
3. Патент РФ №2389014. Способ определения концентрации фосфатов в котловой воде барабанных энергетических котлов / Е.Н. Бушуев, Б.М. Ларин, Е.В. Козюлина, А.Б. Ларин; зарегистр. 10.05.2010.

## References

1. Larin, A.B. Matematicheskaya model' ionnykh ravnovesiy barabannogo kotla [Mathematical model of ion equilibria of drum boiler]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 3.
2. Larin, B.M., Larin, A.B., Kolegov, A.V. Opredelenie solevykh primesey v kotlovoy vode po izmereniyu elektroprovodnosti i pH [Evaluation of salt impurity in boiler water according to electric conductivity and pH measurements]. *Novoe v Rossiyskoy energetike*, 2012, no. 4, pp. 33–40.
3. Bushuev, E.N., Larin, B.M., Kozulina, E.V. Larin, A.B. *Sposob opredeleniya kontsentratsii fosfatov v kotlovoy vode barabannykh energeticheskikh kotlov* [Evaluation way of phosphates concentration in boiler water of drum power boiler]. Patent RF, no. 2389014, 2010.