

# ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ, ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И АГРЕГАТЫ (05.14.14)

УДК 620.1.08

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-37-42

## Сравнительный анализ использования алгоритмов расчета pH и концентрации аммиака в системах химического контроля на тепловых электростанциях

О.В. Егошина, С.К. Звонарева, Тет Вей Лин

Надежность работы тепломеханического оборудования в значительной мере связана с внедрением систем химико-технологического мониторинга (СХТМ). Именно их эксплуатация существенно повышает надежность поддержания основных параметров в нормируемых диапазонах и приводит к снижению аварийности на станциях. Современные СХТМ используют в качестве входной информации данные автоматизированного (АХК) и лабораторного (ЛХК) химического контроля и теплотехнические параметры. Поскольку большой объем химического контроля, выполняемый с помощью анализаторов ЛХК, снижает надежность СХТМ, данная работа предназначена для оперативного персонала и сотрудников проектных организаций с целью сокращения объема ЛХК и уменьшения нагрузки по расходу пробы на пробоотборные точки.

Рассмотрена возможность использования косвенных алгоритмов для расчета наиболее востребованных показателей, таких как pH и концентрация аммиака на основе измерений удельной электропроводности прямой и H-катионированной пробы в системах АХК. Приведены результаты расчета по трем алгоритмам pH и концентрации аммиака для лабораторных и промышленных условий. Выполнено сравнение результатов по трем различным способам определения нормативных показателей на основе экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* тепловые электростанции, водно-химический режим, автоматический химический контроль.

*Для цитирования:* Егошина О.В., Звонарева С.К., Тет Вей Лин. Сравнительный анализ использования алгоритмов расчета pH и концентрации аммиака в системах химического контроля на тепловых электростанциях // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 37—42. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-37-42.

## A Comparative Analysis of Using the pH and Concentrations Ammonia Calculation Algorithms in the Chemical Monitoring Systems at Thermal Power Plants

O.V. Yegoshina, S.K. Zvonareva, Tet Wei Lin

The reliability of thermal and mechanical equipment is largely associated with the introduction of cycle chemistry monitoring systems (CCMS). It is the operation of these systems that helps maintain the main parameters within the standardized ranges in a significantly more reliable manner and decrease the failure rate at power plants. Modern CCMSs use, as input information, the data of automatic chemical monitoring, laboratory chemical control, and thermal process parameters. Unfortunately, the large volume of chemical monitoring performed with the help of laboratory chemical control analyzers is a factor that causes less reliable operation of CCMS. The present study is intended for operating staff and employees of design organizations with the aim to decrease the volume of laboratory chemical control and reduce the sampling points load in terms of sampling flowrate. The possibility of applying indirect algorithms for calculating the most widely used indicators, such as pH and ammonia concentration, based on electrical conductivity measurements of direct and H-cationated samples in automatic chemical monitoring systems is considered. The results of calculation carried out using three algorithms for pH and ammonia concentration for laboratory and field conditions are given. A comparison of the results obtained from using three different methods for calculating the standardized indicators proceeding from experimental data is carried out.

*Key words:* thermal power plants, water chemistry, automatic chemical monitoring.

*For citation:* Yegoshina O.V., Zvonareva S.K., Tet Wei Lin. A Comparative Analysis of Using the pH and Concentrations Ammonia Calculation Algorithms in the Chemical Monitoring Systems at Thermal Power Plants. Bulletin of MPEI. 2021;2:37—42. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-37-42.

## Введение

Эксплуатационная надежность и безопасность энергоблоков складывается из трех компонентов: схемных и конструктивных решений, конструкционных материалов и водно-химического режима [1 — 3]. Эксплуатационная надежность водно-химического режима невозможна без качественной системы химико-технологического мониторинга (СХТМ). Правильно спроектированная СХТМ позволяет контролировать качественный состав теплоносителя, управлять дозированием корректирующих реагентов, диагностировать и прогнозировать поведение примесей в тракте энергоблока [4]. Она включает в себя устройства отбора (УОП) и подготовки (УПП) проб, анализаторы автоматического (АХК) и лабораторного химического контроля (ЛХК) [5].

Большой объем химического контроля, выполняемый с помощью анализаторов ЛХК, снижает надежность СХТМ [6, 7]. С целью сокращения объема ЛХК и уменьшения нагрузки по расходу пробы на пробоотборные точки рассмотрены способы косвенного расчета наиболее востребованных показателей (рН и концентрация аммиака) на основе измерений удельной электропроводности прямой и *H*-катионированной проб [8].

В настоящее время на тепловых электростанциях используют алгоритмы косвенного определения нормируемых и диагностических показателей качества воды и пара, что позволяет усовершенствовать диагностику в системах химико-технологического мониторинга и, следовательно, ведения водно-химического режима котла [9].

Рассмотрим алгоритмы определения рН и концентрации аммиака анализируемой среды.

Первый вариант расчетных алгоритмов предполагает анализ ионных равновесий питательной воды при отсутствии солевых примесей, когда в воде есть только угольная кислота и аммиак [10].

Взяты ионные равновесия как в фильтрате *H*-катионитовой колонки, используемой для исключения влияния корректирующих реагентов на показания приборов, так и в пробе воды до *H*-колонки, учитывая, что в фильтрате *H*-колонки может быть только угольная кислота. Расчетная система состоит из пяти уравнений, основанных на уравнениях электропроводности и электронейтральности, а также уравнениях, описывающих диссоциацию угольной кислоты. Решить систему можно методом подстановки или любым другим численным методом.

Недостаток первого алгоритма расчета заключается в большом различии численных значений определяемых величин, поскольку концентрация ионов водорода в некоторых случаях на четыре порядка меньше концентрации аммиака, что и дает значительные погрешности в определении рН, или выводит решение за пределы допустимых значений (отрицательный результат концентраций).

Второй вариант расчетных алгоритмов повторяет исходные данные первого алгоритма, но использует итерационный метод решения системы уравнений [10]. Данный способ располагает простотой решения задачи, однако его недостаток — стабильность рассчитанных показаний, располагаемых только в диапазоне рН от 8,5 до 9,5, что обусловлено методикой решения.

Третий вариант является алгоритмом, реализованном в программном комплексе MathCad, на базе метода половинного деления [11]. Допущения, применяемые в нем, следующие:

- в обрабатываемой воде присутствуют только ионы водорода, гидроксила и формы диссоциации угольной кислоты;

- полная концентрация форм угольной кислоты в прямой и *H*-катионированной пробе равны;

- ионы аммония полностью удаляются в *H*-колонке.

Одно из основных преимуществ данного алгоритма — возможность обработки большого массива информации.

В таблице 1 дана краткая информация по всем описанным алгоритмам.

В «НИУ «МЭИ» на экспериментальной установке выполнен эксперимент с апробацией алгоритма определения рН и концентрации аммиака. Проведено сравнение результатов по трем различным способам определения нормативных показателей на базе экспериментальных данных по удельной электропроводности. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Следует добавить, что второй алгоритм расчета в связи с методом решения может давать отрицательные значения, что и подтверждает первая контрольная точка. Из данных табл. 2 видно, что сходимость значений рН выше, чем сходимость рассчитанных значений концентраций аммиака.

С целью сравнения полученных значений по трем алгоритмам установлены абсолютные погрешности (табл. 3).

Из данных табл. 3 можно сделать вывод, что наименьшую погрешность как по рН, так и по концентрации аммиака в лабораторных условиях имеет третий алгоритм. Погрешность определения значения рН по первому и второму алгоритмам выше в 4,5 и 6,3 раза абсолютной погрешности третьего алгоритма, а по

Таблица 1

### Краткое описание алгоритмов

Номер алгоритма	Ионный состав	Метод решения системы уравнений
Первый	$\text{HCO}_3^-; \text{H}^+; \text{OH}^-; \text{CO}_3^{2-}; \text{NH}_4^+$	Метод подстановки или другой численный метод
Второй		Итерационный метод с начальным заданием приближенного значения рН
Третий		Метод половинного деления

Таблица 2

## Результаты сравнения алгоритмов расчета рН на основе данных приборов АХК

Номер опыта	$\chi$	$\chi_{II}$	$pH_{изм}$	$NH_{3изм}, \text{ мг/л}$	Алгоритм					
					первый		второй		третий	
					$NH_3', \text{ мг/л}$	$pH'$	$NH_3'', \text{ мг/л}$	$pH''$	$NH_3''', \text{ мг/л}$	$pH'''$
1	1,35	0,88	8,4	0,11	0,12	8,54	—	—	0,13	8,35
2	2,21	0,88	8,7	0,20	0,17	8,82	0,28	8,49	0,22	8,73
3	2,84	0,88	8,9	0,34	0,21	8,95	0,34	8,78	0,30	8,88
4	3,37	0,88	9,0	0,43	0,24	9,03	0,38	8,94	0,38	8,98

Таблица 3

## Абсолютная средняя погрешность расчета для трех алгоритмов в лабораторных условиях

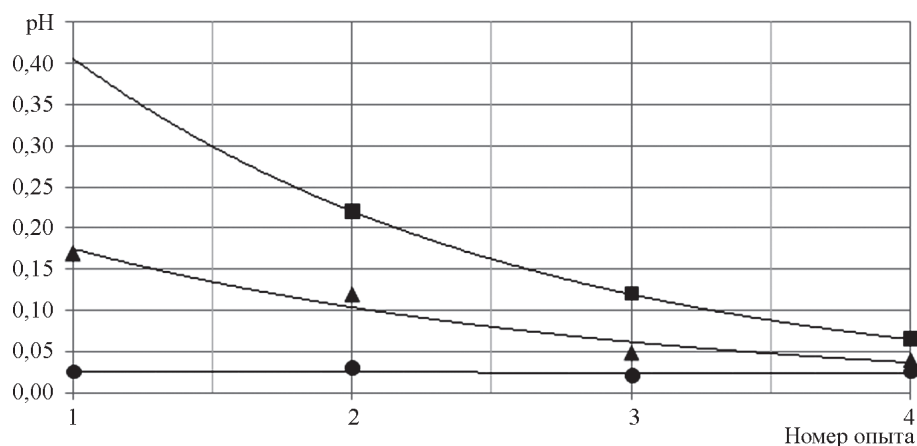
Показатель	Алгоритм		
	первый	второй	третий
$pH$	0,09	0,13	0,02
$NH_{3изм}, \text{ мг/л}$	0,09	0,04	0,03

грешность определения концентрации аммиака соответственно выше в 2,6 и 1,3 раза (сделано по усредненным абсолютным погрешностям). Зависимости абсолютной погрешности для трех алгоритмов изображены на рис. 1, 2.

Следует отметить, что кривая для третьего алгоритма не имеет резких спадов, в то время как кривые по первому и второму алгоритмам резко меняют характер зависимости после третьего опыта. Очевидно, что при более высоких значениях  $pH$  алгоритмы работают точнее. Данный факт связан с принятым ионным составом в тех алгоритмах, где не рассматривается присутствие углекислого газа в теплоносителе. Поскольку при  $pH$  менее 8,3, концентрация  $CO_3^{2-}$  сводится практически к нулю, и в теплоносителе присутствует углекислый газ, напрямую влияющий на  $pH$ , то при снижении водородного показателя абсолютная погрешность возрастает.

В случае с определением концентрации аммиака характер зависимостей противоположен характеру изменения значения  $pH$ . Если проследить тенденцию изменения абсолютной погрешности значения  $pH$  при его увеличении, то видно, что чем выше водородный показатель, тем ниже абсолютная погрешность. В случае с концентрацией аммиака тенденция изменения абсолютной погрешности при увеличении концентрации противоположная: с увеличением количества аммиака в исследуемой среде алгоритмы работают хуже, что связано с принятыми допущениями при их разработке. Наиболее стабильным является третий. При использовании первого при  $pH$  больше 9 абсолютная погрешность достигает 0,18 мг/л, что существенно при определении концентрации в промышленных условиях. Второй алгоритм носит скачкообразный характер зависимости, следовательно, однозначно сделать выводы об успешном его применении нельзя.

Для изучения работы алгоритмов в промышленных условиях взята выборка из 900 значений удельной электропроводности за месяц. Объектом исследования стал двухконтурный котел-утилизатор блока ПГУ мощностью 450 МВт. Исследуемый теплоноситель — конденсат за газовым подогревателем конденсата. На рисунке 3 продемонстрированы четыре кривые, характеризующие изменение  $pH$  конденсата за газовым подогревателем во времени.

Рис. 1. Абсолютные погрешности для первого (▲), второго (■) и третьего (●) алгоритмов по значению  $pH$

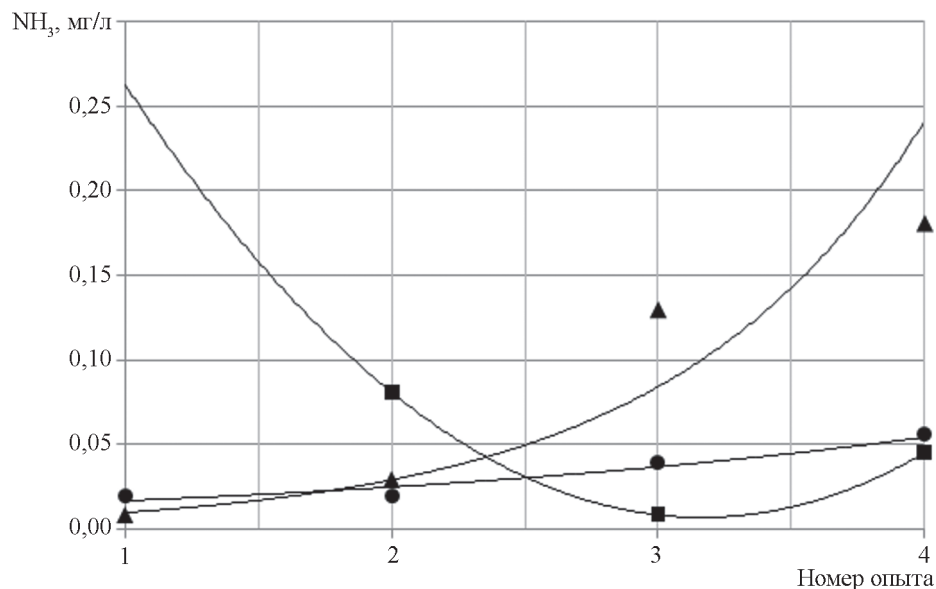


Рис. 2. Абсолютные погрешности для первого (▲), второго (■) и третьего (●) алгоритмов по концентрации аммиака  $\text{NH}_3$ , мг/л

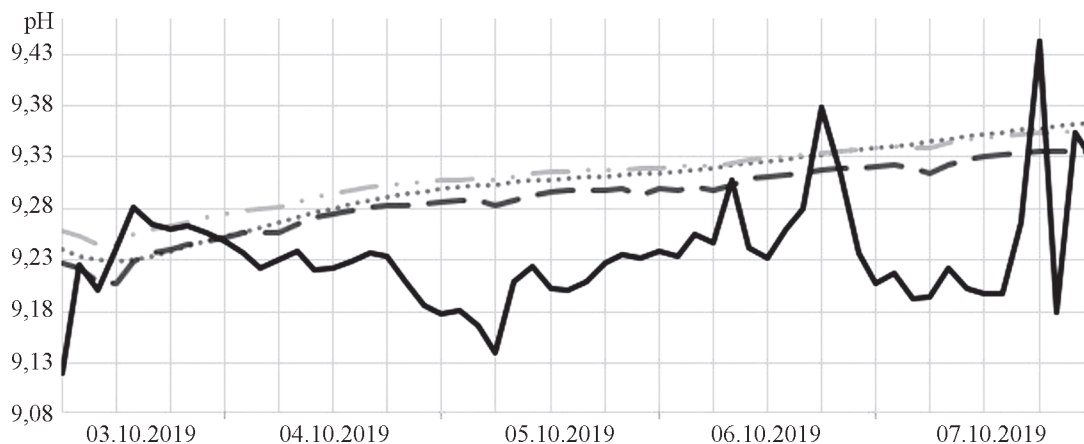


Рис. 3. Изменение pH конденсата за ГПК в котле-утилизаторе во времени:  
 --- — первый метод 1; ··· — второй метод; -·-· — третий метод; — — анализ

Отметим, что в промышленных условиях рассчитанные значения pH по всем алгоритмам имеют одинаково равномерный характер изменения, что свидетельствует об отсутствии принципиальных отличий в математическом описании. У первого алгоритма — наименьшая погрешность, равная 0,15 ед. pH, что в 3 раза превышает погрешность прибора. Исходя из этого, сделаем вывод, что алгоритмы расчета pH можно использовать в качестве оценочного средства на энергетических объектах.

### Заключение

Проведен комплекс исследований, направленных на изучение способов уменьшения нагрузки по расходу

пробы на пробоотборные точки. Одним из возможных способов стало использование измерений электропроводности для расчета pH и концентрации аммиака.

Разработан алгоритм косвенного определения pH и концентрации аммиака в программном комплексе Mathcad.

Выполнены исследования на лабораторном стенде для апробации трех алгоритмов определения pH и концентрации аммиака. Отмечено, что третий алгоритм в лабораторных условиях имеет наименьшую погрешность.

Рассмотрено поведение алгоритмов применительно к промышленным результатам. Все взятые алгоритмы имеют приблизительно одинаковый диапазон погрешности. Наименьшей погрешностью обладает первый алгоритм.

## Литература

## References

1. **Богачев А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б.** Особенности эксплуатации и повреждаемость котлоутилизаторов бинарных паровых установок. М.: Энергоатомиздат, 2008.

2. **Bursik A., Dooley B.** Organics a Retrospective Look at Fossil Plant Cycle Chemistry and the Possible Requirements for the Future // *Power Plant Chem.* 2005. No. 7(10). Pp. 593—598.

3. **Федосеев Б.С.** Современное состояние водоподготовительных установок и водно-химических режимов ТЭС // *Теплоэнергетика.* 2005. № 7. С. 2—9.

4. **Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Совершенствование водно-химических режимов и химконтроля на тепловых электростанциях // *Теплоэнергетика.* 2010. № 7. С. 2—6.

5. **РД 153-34.1-37.532.4—2001.** Общие технические требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химического режима тепловых электростанций.

6. **Ларин Б.М., Ларин А.Б.** Измерения электропроводности и pH в системах мониторинга водного режима ТЭС. Иваново: Изд-во Ивановского гос. энергетического ун-та им. В.И. Ленина, 2014.

7. **Воронов В.Н., Петрова Т.И., Назаренко П.Н.** Математические модели и их использование в системах химико-технологического мониторинга электростанций // *Теплоэнергетика.* 2005. № 4. С. 51—53.

8. **Ларин А.Б., Сорокина А.Я.** Методика расчета pH и концентраций ионных примесей питательной воды на ТЭС по измерениям удельной проводимости // *Вестник ИГЭУ.* 2017. № 2. С. 13—17.

9. **Ларин Б.М., Ларин А.Б.** Совершенствование химического контроля водно-химического режима ТЭС на основе измерений электрической проводимости и pH // *Теплоэнергетика.* 2016. № 5. С. 70—74.

10. **Иванова А.Я.** Совершенствование химического контроля водного теплоносителя энергоблоков ПГУ на основе измерений электропроводности и pH: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново: Изд-во Ивановского гос. энергетического ун-та им. В.И. Ленина, 2019.

11. **Егошина О.В., Яровой В.О., Назаренко М.П., Табаков И.А.** Исследование систем дозирования корректирующих реагентов с применением автоматических анализаторов химического контроля. М.: Изд-во МЭИ, 2017.

1. **Bogachev A.F., Radin Yu.A., Gerasimenko O.B.** Osobennosti Eksploatatsii i Povrezhdaemost' Kotlov-utilizatorov Binarykh Parovykh Ustanovok. M.: Energoatomizdat, 2008. (in Russian).

2. **Bursik A., Dooley B.** Organics a Retrospective Look at Fossil Plant Cycle Chemistry and the Possible Requirements for the Future. *Power Plant Chem.* 2005; 7(10):593—598.

3. **Fedoseev B.S.** Sovremennoe Sostoyanie Vodopodgotovitel'nykh Ustanovok i Vodno-khimicheskikh Rezhimov TES. *Teploenergetika.* 2005;7:2—9. (in Russian).

4. **Voronov V.N., Petrova T.I.** Sovershenstvovanie Vodno-khimicheskikh Rezhimov i Khimkontrolya na Teplovykh Elektrostantsiyakh. *Teploenergetika.* 2010;7:2—6. (in Russian).

5. **RD 153-34.1-37.532.4—2001.** Obshchie Tekhnicheskie Trebovaniya k Sistemam Khimiko-tehnologicheskogo Monitoringa Vodno-khimicheskogo Rezhima Teplovykh Elektrostantsiy. (in Russian).

6. **Larin B.M., Larin A.B.** Izmereniya Elektroprovodnosti i pH v Sistemakh Monitoringa Vodnogo Rezhima TES. Ivanovo: Izd-vo Ivanovskogo Gos. Energeticheskogo Un-ta im. V.I. Lenina, 2014. (in Russian).

7. **Voronov V.N., Petrova T.I., Nazarenko P.N.** Matematicheskie Modeli i Ikh Ispol'zovanie v Sistemakh Khimiko-tehnologicheskogo Monitoringa Elektrostantsiy. *Teploenergetika.* 2005;4:51—53. (in Russian).

8. **Larin A.B., Sorokina A.Ya.** Metodika Rascheta pH i Kونسentratsiy Ionnykh Primesey Pitatel'noy Vody na TES po Izmereniyam Udel'noy Provodimosti. *Vestnik IGEU.* 2017;2:13—17. (in Russian).

9. **Larin B.M., Larin A.B.** Sovershenstvovanie Khimicheskogo Kontrolya Vodno-khimicheskogo Rezhima TES na Osnove Izmereniy Elektricheskoy Provodimosti i pH. *Teploenergetika.* 2016;5:70—74. (in Russian).

10. **Ivanova A.Ya.** Sovershenstvovanie Khimicheskogo Kontrolya Vodnogo Teplonositelya Energeblovov PGU na Osnove Izmereniy Elektroprovodnosti i pH: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Ivanovo: Izd-Vo Ivanovskogo Gos. Energeticheskogo Un-ta im. V.I. Lenina, 2019. (in Russian).

11. **Egoshina O.V., Yarovoy V.O., Nazarenko M.P., Tabakov I.A.** Issledovanie Sistem Dozirovaniya Korrektiruyushchikh Reagentov s Primeneniem Avtomaticheskikh Analizatorov Khimicheskogo Kontrolya. M.: Izd-vo MEI, 2017. (in Russian).

## Сведения об авторах:

**Егошина Ольга Владимовна** — кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича НИУ «МЭИ», e-mail: yegoshinaov@gmail.com

**Звонарева Софья Константиновна** — студент (магистрант) кафедры теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича НИУ «МЭИ», e-mail: soft.zvonaрева@yandex.ru

**Тет Вей Лин** — аспирант кафедры теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича НИУ «МЭИ», e-mail: thetwailin52@gmail.com

**Information about authors:**

**Yegoshina Olga V.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Theoretical Bases of Heat Engineering named M.P. Vukalovich Dept., NRU MPEI, e-mail: yegoshinaov@gmail.com

**Zvonareva Sofiya K.** — Student (Master's student) of Theoretical Bases of Heat Engineering named M.P. Vukalovich Dept., NRU MPEI, e-mail: sof.zvonareva@yandex.ru

**Tet Wei Lin** — Ph.D.-student of Theoretical Bases of Heat Engineering named M.P. Vukalovich Dept., NRU MPEI, e-mail: thetwailin52@gmail.com

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 27.10.2020

**The article received to the editor:** 27.10.2020