

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

# МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ ПО ТРАКТУ ЭНЕРГБЛОКА В СИСТЕМАХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ (ОБЗОР)<sup>1</sup>

© 2023 г. О. В. Егошина<sup>а</sup>, \*, С. К. Звонарева<sup>а</sup>, Н. А. Большакова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: yegoshinaov@mpei.ru

Поступила в редакцию 05.09.2022 г.

После доработки 17.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Обеспечение надежной и безаварийной работы энергетического оборудования на тепловых электростанциях тесно связано с совершенствованием методов диагностики и прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблоков. Рассматриваются современное состояние и тенденции развития диагностики и прогнозирования поведения примесей с помощью систем химико-технологического мониторинга. Исследовано применение математических моделей в таких системах, с одной стороны, как способа отображения текущей информации о поведении примесей в тракте энергоблока, с другой – как способа прогнозирования их поведения. Рассмотрена возможность использовать математические модели при ухудшении качества воды, повышении концентрации гидрокарбонатов в тракте, а также при проведении анализа качества сверхчистых вод. Представлены модели на основе измерений удельной электрической проводимости пробы воды до Н-катионитного фильтра и после него, значений рН. Выполнен анализ возможности расчетным способом определять скорость коррозионных процессов по тракту энергоблока атомных электрических станций с помощью водородного числа, уравнений закона действующих масс, материального баланса и условий нормировки. Проанализированы модели прогнозирования поведения примесей с использованием нейронных сетей. Приведены основные типы математических моделей, базирующихся на ионном составе воды, материальном балансе и нейронных сетях, применяемых в системах химико-технологического мониторинга, отмечены их преимущества и недостатки, сформулированы текущие тенденции развития данных моделей.

*Ключевые слова:* тепловая электростанция, водно-химический режим, система химико-технологического мониторинга, прогнозирование, диагностика, качество воды и пара, водородный показатель, удельная электрическая проводимость, материальный баланс

DOI: 10.56304/S0040363623050016

В течение довольно длительного времени диагностика и прогнозирование состояния водно-химических режимов (ВХР) энергетического оборудования ТЭС практически не рассматривались как возможное развитие систем химико-технологического мониторинга (СХТМ) [1]. Однако в последние 20 лет интерес к ним неуклонно растет [2–4] вследствие неоспоримых достоинств полнофункциональных систем мониторинга качества воды и пара по сравнению с существующим на данный момент преимущественно информа-

ционным мониторингом. Более того, полнофункциональный химико-технологический мониторинг может иметь множество подсистем, и с его помощью можно оценивать условия эксплуатации, осуществлять управление дозированием корректирующих реагентов, вести косвенный расчет показателей качества воды и пара и т.д. [5, 6]. Немаловажное достоинство применения химико-технологического мониторинга на ТЭС – устойчивое поддержание показателей качества теплоносителя в пределах нормативных значений [7], недопущение нарушений ВХР и, как следствие, повышенная надежность работы оборудования. Кроме того, важной задачей в долгосрочной перспективе развития СХТМ является прогнозирование процессов коррозии и образования отло-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-20314 “Разработка имитационной модели прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблока в системах химико-технологического мониторинга на тепловых электростанциях”. <https://rscf.ru/project/22-29-20314/>).

жений на поверхностях нагрева энергетического оборудования [8].

Концепция безаварийности, базирующаяся, прежде всего, на анализе и учете причин повреждаемости поверхностей нагрева и достижении надежности оборудования благодаря применению физических и химических закономерностей, присущих теплоносителю, становится в настоящее время все более конкретной. В [8] сформулированы следующие основные вопросы, требующие решения в целях снижения или устранения рисков, связанных с повреждаемостью поверхностей нагрева:

учет и анализ причин повреждаемости поверхностей нагрева котлов, объективность и достаточность разрабатываемых мероприятий по повышению их надежности;

состояние водно-химического режима и зависящий от него уровень отложений на внутренних стенках труб поверхностей нагрева, а также эффективность мер, принимаемых для предотвращения отложений;

оснащенность тракта энергоблока и линий возврата конденсата средствами автоматизированного химического контроля и аварийной сигнализации;

поддержание режима горения и температурно-го режима;

контроль состояния металла поверхностей нагрева, анализ причин повреждения металла;

организация ремонтных работ;

принятие мер, направленных на исключение негативного воздействия персонала на состояние и ресурс металла поверхностей нагрева.

В [8] выполнен анализ оценок экспертной системы контроля условий эксплуатации котлов и отмечено, что не менее четырех ее пунктов являются задачами химико-технологического мониторинга. Таким образом, надежность работы энергетического оборудования во многом зависит от совершенствования методов измерения, создания новых устройств для отбора проб воды и пара и применения различных методов прогнозирования процессов и управления ими на ТЭС. Контроль состояния, диагностика нарушений и ведение водно-химического режима являются одними из наиболее сложных задач, для решения которых следует использовать системы автоматического химического контроля на базе простых и надежных измерений, а также расчетные методики, адаптированные к условиям промышленной эксплуатации [4, 9].

Развитие системы мониторинга осуществляется главным образом на основе базовых принципов и требований, сформулированных в руководящем документе [10], в котором упор сделан на необходимость использования математических моделей.

Применяемые на данный момент математические модели можно разделить на две группы: отображающие текущую информацию о состоянии водно-химического режима и прогнозирующие поведение примесей по тракту энергоблока. Среди перспективных рассматриваются модели на основе ионных равновесий, материального баланса и нейронных сетей [11–37].

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ИОННЫХ РАВНОВЕСИЙ

В последнее десятилетие широко используются алгоритмы расчета концентраций ионных компонентов в питательной и котловой воде по результатам измерений удельной электрической проводимости с помощью кондуктометров автоматического химического контроля. Основой алгоритмов подобных моделей служат следующие зависимости:

взаимосвязь удельной электрической проводимости воды  $\chi$ , См/м, и концентрации ионов, присутствующих в ней,

$$\chi = \sum \lambda_i C_i, \quad (1)$$

где  $\lambda_i$  – эквивалентная электрическая проводимость иона, См · м<sup>2</sup>/г-эquiv;  $C_i$  – концентрация  $i$ -го иона, г-эquiv/м<sup>3</sup>;

электронейтральность в воде до сильноокислотного катионита и после него

$$\sum_{i=1}^k C_i^{K_i} = \sum_{j=1}^n C_j^{A_n}, \quad (2)$$

где  $C_i^{K_i}$  – концентрация  $i$ -го катиона, моль/м<sup>3</sup>;  
 $C_j^{A_n}$  – концентрация  $j$ -го аниона, моль/м<sup>3</sup>;

выражения, характеризующие диссоциацию электролитов [4, 11–20],

$$C_{\text{H}^+} C_{\text{OH}^-} = K_w; \quad (3)$$

$$\frac{C_{\text{H}^+} C_{\text{CO}_3^{2-}}}{C_{\text{HCO}_3^-}} = K_{\text{II}}; \quad (4)$$

$$\frac{C_{\text{NH}_4^+} C_{\text{OH}^-}}{C_{\text{NH}_4\text{OH}}} = K_a, \quad (5)$$

где  $C_{\text{H}^+}$ ,  $C_{\text{OH}^-}$ ,  $C_{\text{NH}_4^+}$ ,  $C_{\text{CO}_3^{2-}}$ ,  $C_{\text{HCO}_3^-}$  – концентрация соответствующего иона, моль/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{NH}_4\text{OH}}$  – равновесная концентрация гидроксида аммония, моль/дм<sup>3</sup>;  $K_w$ ,  $K_{\text{II}}$ ,  $K_a$  – константа диссоциации воды, угольной кислоты по II ступени и аммиака.

Более 50 лет назад были разработаны номограммы [11], позволяющие по измеренным значениям удельной электрической проводимости и

pH охлажденной до 25°C пробы определить концентрации аммиака и уголекислоты. Однако номограмма дает значительную погрешность вблизи нейтральных значений pH, причем чем выше солесодержание в рабочей среде, тем больше погрешность определения.

В настоящее время используются автоматические кондуктометры с расчетом pH и концентрации аммиака на основе измерений удельной электрической проводимости прямой и H-катионированной проб воды. Началом внедрения алгоритма расчета pH послужили разработки [12, 13]. Для одновременного измерения удельной электрической проводимости используются два датчика, задается модель преобразования летучих веществ, например аммиака, морфолина, гидроксида натрия и др. В указанных работах были приняты следующие допущения: образец содержит только один подщелачивающий реагент, рабочая среда загрязнена хлоридом натрия, расчетная модель работает при pH = 7.5–10.5 (модель VGB). В дальнейшем были предприняты успешные попытки расчета pH с двумя подщелачивающими реагентами, что входит в расширенную модель расчета pH SWAN. Эта модель дает лучшие результаты в рабочих средах при pH < 8.5 по сравнению с моделью VGB [14, 15].

Авторы [4, 16–29] разработали и усовершенствовали частные математические модели на основе измерений удельной электрической проводимости прямой и H-катионированной проб воды и pH. Преимущества этих моделей заключаются в их высокой информативности, малой стоимости, а также удобстве, так как приборы для измерения показателей размещаются в разных точках конденсатопитательного тракта согласно [17].

В работе [16] усовершенствование методики расчета ионного состава путем учета влияния температуры и солесодержания позволило определять концентрацию аммиака, натрия, хлоридов и щелочи по результатам измерений удельной электрической проводимости и pH штатными автоматическими приборами. При последующей адаптации моделей для фосфатного и гидратного водно-химических режимов в барабане котла возникла необходимость учитывать особенности конструкции котлов-утилизаторов парогазовых установок, а также разработать методику косвенного определения pH для малобufferных растворов [18].

В настоящее время совершенствование алгоритмов моделей на основе ионного состава в целях их возможного применения в сверхчистой или, наоборот, в сильно загрязненной воде осуществляется благодаря разработке методик определения показателей качества пара (сверхчистая среда) по результатам измерений удельной электрической проводимости прямой и H-катионированной проб воды, а также значения pH пря-

мой охлажденной пробы на котлах среднего давления [19].

При создании моделей расчета произведения растворимости примесей теплоносителя ТЭС по данным кондуктометрического метода измерений выявлено, что эквивалентная электрическая проводимость адекватно отражает закономерности растворимости при высоких температурах и давлениях, а также указывает на взаимосвязь процессов диссоциации и кристаллизации веществ в растворе. Аналитическая зависимость, устанавливающая количественную взаимосвязь растворимости  $S$ , г-экв/м<sup>3</sup>, и электрической проводимости труднорастворимых в воде веществ выглядит следующим образом:

$$S = \frac{\chi_n}{\lambda^0}, \quad (6)$$

где  $\chi_n$  – удельная электрическая проводимость насыщенных растворов, См · м<sup>-1</sup>;  $\lambda^0$  – предельная эквивалентная электрическая проводимость при бесконечном разбавлении, См · м<sup>2</sup>/г-экв.

На основе данного отношения разработан электролитический метод прогнозирования начальных границ солесодержания в пароводяном тракте прямоточных котлов [29–31]. Предложенные температурные и концентрационные зависимости электрической проводимости Fe(OH)<sub>2</sub> позволяют оперативно оценивать и регулировать содержание железа в теплоносителе при разных температурных режимах. Благодаря возможности прогнозировать начальные границы отложений солей на участках пароводяного тракта прямоточных котлов сверхкритического давления повышается эффективность организации процесса генерации пара.

#### ОЦЕНКА СКОРОСТИ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ РАСТВОРЕННОГО ВОДОРОДА В ПЕРЕГРЕТОМ ПАРЕ

Одно из направлений прогнозирования ВХР – расчет скорости коррозионных процессов по тракту энергоблока. Начиная с 60-х годов прошлого века проводились исследования прогнозирования интенсивности протекания коррозии с использованием результатов измерений содержания растворенного водорода в паре. В работах [32–34] приведен алгоритм расчета на основе водородного числа, с помощью которого по природности содержания водорода в тракте можно определить скорость коррозии.

Водородное число  $\theta$ , мкг H<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> · ч), характеризует количество водорода, образовавшегося на 1 м<sup>2</sup> внутренней поверхности труб определенного

участка в течение 1 ч, и рассчитывается по выражению

$$\theta = \frac{\Delta C_{H_2} D}{F}, \quad (7)$$

где  $\Delta C_{H_2}$  – прирост содержания водорода, мкг/дм<sup>3</sup>;  $D$  – производительность котла или расход теплоносителя на данном участке, кг/ч;  $F$  – площадь внутренней поверхности труб рассматриваемого участка, м<sup>2</sup>.

Однако для того, чтобы модель работала с минимальной погрешностью, необходимо дополнительно учитывать поправки на диссоциацию водяного пара, диффузию водорода через стенки труб, состояние слоя оксидов на стенке металла.

Предложенная модель расчета концентрации водорода, выделившегося в результате коррозии, применима к ВХР АЭС с дозированием гидразина и аммиака в конденсатно-питательный тракт II контура. Она базируется на законе действующих масс и условиях нормировки:

$$\frac{C^c C^d}{C^a C^b} = K; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^k n_i = 1, \quad (9)$$

где  $K$  – константа равновесия реакции;  $C^a$ ,  $C^b$ ,  $C^c$ ,  $C^d$  – равновесные концентрации веществ, моль/дм<sup>3</sup>;  $n_i$  – мольные доли компонентов равновесной смеси.

Используя данную модель, возможно проводить оценку влияния каждого дозируемого реагента на концентрацию водорода в рабочей среде. Недостатки модели – сложность расчетных операций, отсутствие учета образования водорода при термоллизе органических примесей в воде, ограничение области применимости вследствие радиолитического разложения.

В настоящее время разработка моделей, описывающих массоперенос продуктов коррозии в трубопроводах конденсатно-питательного и парового трактов II контура атомных электростанций, занимает одну из передовых позиций. В [38] рассмотрен штатный режим эксплуатации энергоблока на номинальной мощности, разработана модель образования и прохождения продуктов коррозии по II контуру АЭС. В этой модели учитываются масса окисленного металла, скорость коррозии, скорость выноса продуктов коррозии с элементов II контура, концентрация продуктов коррозии железа в питательной воде, влияние корректирующих реагентов. Модель позволяет определить pH на различных участках II контура АЭС. Она прошла верификацию на данных, полученных в промышленных условиях, и может служить основой компьютерных кодов, предназначенных для расчета процессов коррозии. Дан-

ная модель также позволяет оценить накопление и перераспределение отложений продуктов коррозии на стадии проектирования энергоблока.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

Наряду с математическими моделями, основанными на ионном составе теплоносителя, возрастает интерес к моделям, базирующимся на материальном балансе. Математическая модель распределения концентрации примеси по тракту энергоблока представлена дифференциальными уравнениями в общем виде

$$M \frac{dC_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} = D_{\text{ВХ}} C_{\text{ВХ}}(t) - D_{\text{ВЫХ}} C_{\text{ВЫХ}}(t) \quad (10)$$

и для барабана котла

$$M_{\text{к}} \frac{dC_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} = D_{\text{ВХ}} C_{\text{ВХ}}(t) - (K_p + \omega) D_{\text{ВЫХ}} C_{\text{ВЫХ}}(t), \quad (11)$$

где  $M$ ,  $M_{\text{к}}$  – масса воды в сосредоточенной емкости (далее емкость) и барабане котла, кг;  $C_{\text{ВХ}}(t)$ ,  $C_{\text{ВЫХ}}(t)$  – концентрация примеси в потоке рабочей среды, поступающей в емкость и выходящей из нее, мкг/дм<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $D_{\text{ВХ}}$ ,  $D_{\text{ВЫХ}}$  – расход рабочей среды, поступающей в емкость и выходящей из нее, кг/с;  $K_p$  – коэффициент распределения примеси между водой и паром;  $\omega$  – влажность пара.

Авторы работ [23–31] вносят большой вклад в развитие методов диагностики и прогнозирования водно-химического режима с помощью систем мониторинга. В таблице указаны основные преимущества и недостатки моделей на основе ионного состава теплоносителя и материального баланса.

Математические модели, построенные на материальном балансе, позволяют определить текущую и ожидаемую концентрации примеси во всех точках теплосилового тракта. В математических моделях, базирующихся на аналитическом решении дифференциальных уравнений материального баланса, используются не только данные химического анализа, но и значения технологических параметров.

Следующий этап развития математических моделей на основе материального баланса – исследование при различных возмущениях, а также разработка моделей для всего тракта энергоблока в динамических условиях [28]. Большое количество допущений в таких моделях – их главный недостаток. В настоящее время в целях уменьшения количества допущений выполняются исследования неравномерного распределения концентрации примеси в объеме барабана котла, механического уноса примесей в пар и процесса образования отложений.

Преимущества и недостатки моделей на основе ионного состава теплоносителя и материального баланса

Модель	Преимущество	Недостаток
На основе ионного состава теплоносителя	Высокая информативность при малой стоимости. Удобство использования, так как приборы для измерения показателей размещаются в разных точках конденсатно-питательного тракта	Сложность прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблока. Возрастание погрешности вблизи нейтральных значений. Зависимость точности расчета от солесодержания
На основе материального баланса	Простота прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблока. Возможность определения времени наступления нарушения. Возможность прогнозирования поведения корректирующих реагентов по тракту котла	Большое количество принимаемых допущений при разработке моделей. Наличие обязательного объема измерений при теплотехническом контроле

Преимущество указанных моделей – возможность определить время наступления нарушения, при котором контролируемый параметр достигнет допустимого значения, а также одновременно установить текущие значения контролируемых показателей при различных продувках в барабане котла.

Изначально математические модели на основе материального баланса были разработаны применительно к атомным электростанциям. В работах [25–27] изложены методы определения динамических характеристик парогенераторов, рассмотрены случаи линейного и периодического изменений концентрации примеси, а также исследованы модели с учетом термолитиза и комплексообразования гидразина в парогенерирующих установках АЭС. Далее разработанные модели были перенесены в тепловую энергетику. В работах [25–28] были предложены модели для статических и динамических условий применительно к котловой воде и насыщенному пару, представлен анализ различных видов алгоритмов для поиска причин нарушений водно-химического режима энергоблока.

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Развитие интеллектуальных приложений для программных продуктов способствовало внедрению в модели прогнозирования параметров водно-химического режима с помощью искусственных нейронных сетей [35, 36]. Искусственный нейрон – взвешенная сумма у векторных значений входных элементов

$$y = W_0 X_0 + W_1 X_1 + \dots + W_{m-1} X_{m-1}, \quad (12)$$

где  $W_0, W_1, W_{m-1}$  – вес каждого элемента вектора;  $X_0, X_1, X_{m-1}$  – значения входного вектора.

Эта сумма передается на нелинейную функцию активации

$$z = f(y), \quad (13)$$

где  $z$  – результат применения функции активации.

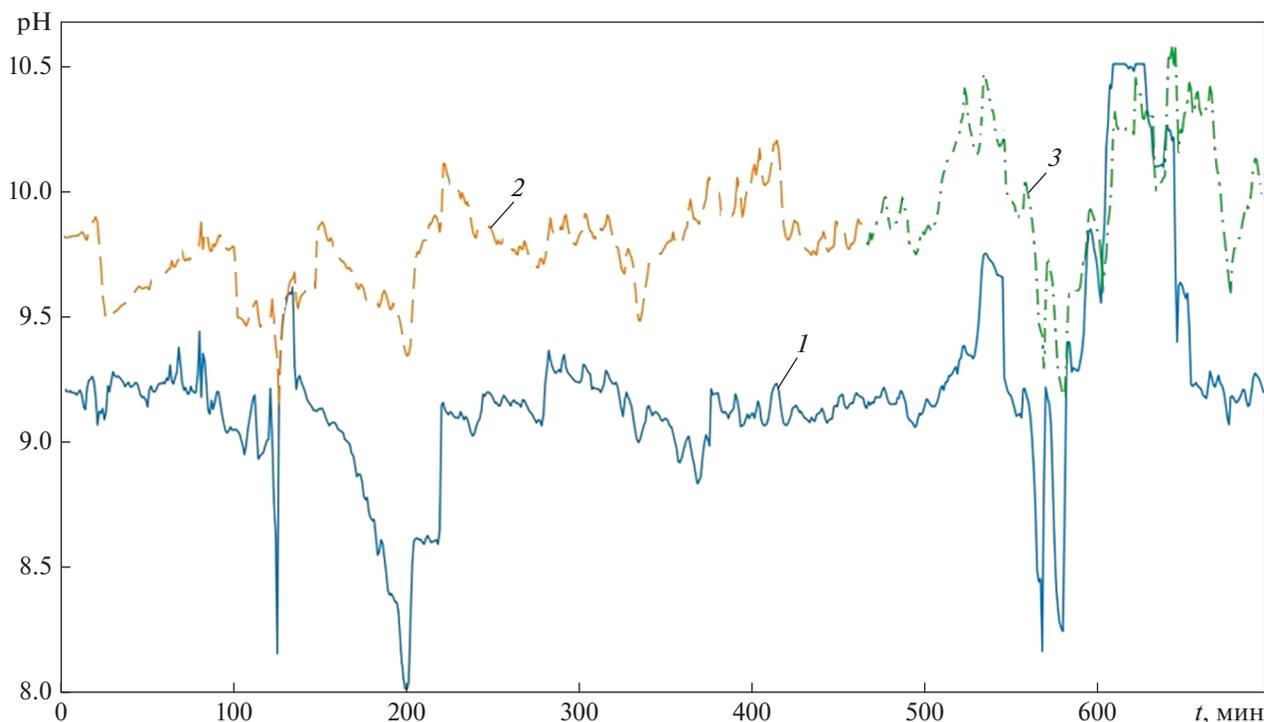
Обучение нейронных сетей базируется на определении весового коэффициента, который отражает значимость конкретного фактора в системе.

Применение таких методов для анализа физико-технологических процессов позволяет выявлять важность тех или иных измеряемых показателей, прогнозировать их поведение. В [37, 39] приводятся результаты исследований допустимости использования методов нейросетевого моделирования для контроля рН теплоносителя на АЭС, однако до настоящего времени их верификация на промышленных данных не проведена.

Перспективным направлением является использование нейронных сетей для прогнозирования поведения примесей. Рекуррентные нейронные сети нашли широкое применение при прогнозировании определенных параметров, так как используются методы исправления прогноза, если он был неверен. На рисунке показаны результаты прогнозирования рН питательной воды с помощью рекуррентных нейронных сетей. Как видно на рисунке, прогнозируемые значения довольно близки к исходным данным. Максимальная погрешность составляет 0.79, минимальная – 0.032.

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

В [40, 41] предложен усовершенствованный алгоритм оперативной оценки ведения водно-химического режима, который предоставляет объективную информацию о его состоянии и позво-



**Рис. 1.** Зависимость pH питательной воды от времени  $t$ .

1, 2, 3 – значения pH исходные, предсказанные нейронной сетью по исходным данным и предсказанные на 200 значений без исходных данных

ляет выявлять нарушения, оказывающие влияние на химико-технологические процессы. В расчет индексов качества (ИК) заложены следующие варианты изменения значений текущих параметров химического контроля, используемых при ведении ВХР:

значение параметра не должно превышать нормированное значение (например, жесткость питательной воды)

$$\text{ИК} = \frac{Z_i}{H_B}; \quad (14)$$

значение параметра должно быть не ниже нормированного значения (например, pH перегретого пара)

$$\text{ИК} = 1 + \frac{H_H - Z_i}{H_H}; \quad (15)$$

значение параметра ограничено и верхним и нижним нормируемыми значениями (например, pH питательной воды)

$$\text{ИК1} = 1 + \frac{Z_i - Z_{\text{опт}}}{H_B - Z_{\text{опт}}} \text{ при } Z_i \geq Z_{\text{опт}}; \quad (16)$$

$$\text{ИК2} = 1 + \frac{Z_{\text{опт}} - Z_i}{Z_{\text{опт}} - H_H} \text{ при } Z_i < Z_{\text{опт}}; \quad (17)$$

где  $Z_i$ ,  $Z_{\text{опт}}$  – значение исследуемого и оптимального параметров;  $H_B$ ,  $H_H$  – верхний и нижний пределы нормируемого значения.

На основе алгоритмов расчета индексов качества водно-химического режима разработан алгоритм прогнозирования времени наступления нарушения с помощью полиномиальной модели временного ряда. Прогнозирование значений показателей качества, реализованное путем вычисления ИК, позволяет предотвращать нарушения водно-химического режима на начальном этапе и не допускать развития нештатной ситуации. В настоящее время выполняются исследование и модернизация этих алгоритмов в целях применения их на энергетических объектах для прогнозирования концентрации примеси в различных частях пароводяного тракта независимо от его загрязненности и количества корректирующих реагентов. Для этого, например, можно использовать анализаторы SWAN, обеспечивающие минимальную погрешность измерений при дозировании двух подщелачивающих реагентов.

## ВЫВОДЫ

1. Применение современных математических моделей позволит снизить количество лабораторных анализов и увеличить объем химического контроля не измеряемых приборами показателей, включая скорость коррозии и образование отложений.

2. Дальнейшая интеграция математических моделей в системы химико-технологического мониторинга обеспечит возможность прогнозировать поведение примесей по тракту энергоблока и оперативно оценивать водно-химический режим на основе данных автоматического и лабораторного контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Живилова Л.М., Тарковский В.В.** Система и средства автоматизации контроля водно-химического режима тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 1998. № 7. С. 14–19.
2. **Сycle chemistry monitoring system as means of improving the reliability of the equipment at the power plants / V.N. Voronov, O.V. Yegoshina, N.A. Bolshakova, V.O. Yarovoy // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. P. 012270.**  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012270>
3. **Влияние нарушений водного режима на динамику систем дозирования корректирующих реагентов на тепловых электростанциях / В.Н. Воронов, О.В. Егошина, Н.А. Большакова, В.О. Яровой, АЙе Мин Латт // Теплоэнергетика. 2016. № 12. С. 75–80.**  
<https://doi.org/10.1134/S0040363616120092>
4. **Ларин А.Б.** Мониторинг водно-химического режима энергоблоков ТЭС с ПГУ // Вестник ИГЭУ. 2013. № 3. С. 14–18.
5. **Большакова Н.А.** Совершенствование системы автоматического дозирования корректирующих реагентов на тепловых электростанциях: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ МЭИ, 2021.
6. **Тет Вей Лин.** Разработка алгоритмов для диагностики ионного состава теплоносителя в системах химико-технологического мониторинга на ТЭС: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ МЭИ, 2021.
7. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Минэнерго России. М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
8. **Паули В.К.** Экспертная система контроля и оценки условий эксплуатации котлоагрегатов ТЭС // Теплоэнергетика. 1997. № 5. С. 38–43.
9. **Внедрение** системы автоматического химического контроля за водно-химическим режимом ТЭС / А.В. Колегов, Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, Е.В. Козюлина // Вестник ИГЭУ. 2011. № 4. С. 15–19.
10. **РД 153-34.1-37.532.4-2001.** Общие технические требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химических режимов тепловых электростанций. М.: НПЦ “Элемент”, 2001.
11. **Мостофин А.А.** Расчет значений рН и удельной электропроводности водных растворов  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  // Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках. 1966. Вып. 2. С. 178–187.
12. **Maurer H.** On-line pH-measurement by differential cation and specific conductivity // Intern. Chemistry On-Line Process Instrumentation Seminar. Clearwater Beach, FL, USA. 1997.
13. **Richtlinien** für die speisewasser, kesselwasser und dampfqualität für kraftwerke / Industriekraftwerke. VGB-R 450 L // VGB Power Tech. Essen, Deutschland, 2006.
14. **Sampling** and physic-chemical monitoring of water and steam cycles. Essen, Germany, VGB Power Tech. Service GmbH, 2012. VGB-006-00-2012-09-EN
15. **Lendi M., Wagner H., Wuhrmann P.** pH calculation by differential conductivity measurement in mixtures of alkalization agents // Power Plant Chem. 2014. V. 16. No. 1. P. 1–8.
16. **Ларин А.Б., Сорокина (Иванова) А.Я.** Методика расчета рН и концентраций ионных примесей питательной воды на ТЭС по измерениям удельной электропроводности // Вестник ИГЭУ. 2016. Вып. 5. С. 10–15.
17. **Козюлина Е.В., Ларин Б.М., Опарин М.Ю.** Промышленные испытания методики расчета примесей конденсата и питательной воды барабанного котла СВД // Вестник ИГЭУ. 2002. Вып. 1. С. 47–51.
18. **Ларин А.Б., Сорокина (Иванова) А.Я.** Расчет концентраций ионных примесей в предельно разбавленных водных растворах типа конденсата и питательной воды паровых котлов ( $p_6 > 10$  МПа) // Вестник ИГЭУ. 2017. Вып. 2. С. 13–17.
19. **Ларин А.Б., Ларин Б.М., Савинов М.П.** Расчетное определение качества пара на энергетических котлах по измерению удельной электропроводности и рН // Теплоэнергетика. 2021. № 5. С. 63–71.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363621040032>
20. **Сметанин Д.С.** Анализ различных видов алгоритмов поиска причин нарушений водно-химического режима ТЭС // Водочистка, водоподготовка, водоснабжение. 2008. № 1. С. 57–65.
21. **Воронов В.Н., Готовцев П.М.** Построение комплекса тестирования методов диагностики водно-химического режима на базе системы мониторинга экспериментального стенда // Теплоэнергетика. 2007. № 7. С. 2–5.
22. **Воронов В.Н., Краснорядцев И.М.** Проблемы математического моделирования теплогидравлических и водно-химических процессов в парогенераторах АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 1991. № 9. С. 78–80.
23. **Воронов В.Н., Назаренко П.Н., Шмелев А.Г.** Моделирование динамики развития нарушения водно-химического режима по ионогенным примесям для парогенераторов ПГВ-1000 // Теплоэнергетика. 1993. № 11. С. 37–42.
24. **Воронов В.Н., Назаренко П.Н., Чубукова И.К.** Термолиз и комплексобразование гидразина в парогенерирующих установках электростанций // Теплоэнергетика. 1996. № 8. С. 43–46.
25. **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.
26. **Воронов В.Н., Эндрухина О.В.** Математическое моделирование водно-химического режима ТЭС в нестационарных условиях // Теплоэнергетика. 2003. № 7. С. 63–66.
27. **Эндрухина О.В., Воронов В.Н., Назаренко П.Н.** Анализ эффективности использования системы химико-технологического мониторинга на примере Черепетской ГРЭС // Теплоэнергетика. 2006. № 8. С. 17–20.
28. **Воронов В.Н., Егошина О.В.** Математическая модель распределения примесей по тракту энергоблока для систем химико-технологического мони-

- торинга // Новое в российской электроэнергетике. 2008. № 10. С. 28–33.
29. Лукашов М.Ю. Электролитический метод прогнозирования зоны отложения примесей теплоносителя в парогенераторах ТЭС и АЭС // Безопасность жизнедеятельности. Охрана окружающей среды: Межвуз. сб. науч. тр. 2004. Вып. 8. С. 82–83.
  30. Лукашов М.Ю. Исследование взаимосвязи растворимости и электропроводности примесей теплоносителя ТЭС при высоких температурах и давлениях // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. 2005. № 1. С. 41–44.
  31. Лукашов М.Ю. Совершенствование методов расчета растворимости и прогнозирования границ отложений примесей теплоносителя в водопаровом тракте энергоблока: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2006.
  32. Зенкевич Ю.В., Кокоскин И.А. Оценка интенсивности коррозии котлов по концентрации водорода в воде и паре // Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках. 1972. Вып. 4. С. 163–168.
  33. Кокоскин И.А. Определение растворенного в воде водорода для контроля коррозии оборудования тепловых энергетических установок: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1968.
  34. Виноградов В.Н., Аван В.К. Водородометрия при диагностике водно-химических режимов котлов ТЭС // Вестник ИГЭУ. 2010. Вып. 2. С. 1–4.
  35. Hassoun M.H. Fundamentals of artificial neural networks. Cambridge, MA: MIT Press, 2005.
  36. Котенков В.Н., Тяпков В.Ф. Применение нейросетевого моделирования для непрерывного контроля pH теплоносителя АЭС // Теплоэнергетика. 2005. № 7. С. 36–40.
  37. Готовцев П.М., Воронов В.Н. Анализ состояния теплоносителя с помощью искусственных нейронных сетей // Теплоэнергетика. 2008. № 7. С. 15–20.
  38. Моделирование миграции продуктов коррозии во II контуре АЭС с ВВЭР-1200 / В.Г. Крицкий, И.Г. Березина, А.В. Гаврилов, Е.А. Моткова, Е.В. Зеленина, Н.А. Прохоров, С.П. Горбатенко, А.А. Цицер // Теплоэнергетика. 2016. № 4. С. 72–81.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363616040044>
  39. Gotovtsev P., Voronov V. Cycle chemistry monitoring systems // Power Plant Chem. 2012. V. 14. No. 3. P. 158–162.
  40. Сметанин Д.С. Оценка состояния водно-химического режима электростанций с помощью индекса качества водно-химического режима // Новое в российской энергетике. 2004. № 12. С. 3–5.
  41. Свид. № 2022660393 о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета универсального показателя ведения водно-химического режима – Индекса Качества / О.В. Егошина, С.К. Звонарева. 02.06.2022.

## Methods for Diagnosing and Predicting the Behavior of Impurities over the Power Unit Path in the Cycle Chemistry-Monitoring Systems at Thermal Power Plants (Review)

O. V. Egoshina<sup>a, \*</sup>, S. K. Zvonareva<sup>a</sup>, and N. A. Bol'shakova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

\*e-mail: yegoshinaov@mpei.ru

**Abstract**—Assurance of reliable and failure-free operation of power-generating equipment at thermal power plants is closely linked with improvement of methods for diagnosing and predicting the behavior of impurities over the process path of power units. The article discusses the current state and development prospects of techniques for diagnosing and predicting the behavior of impurities using cycle chemistry-monitoring systems. The application of mathematical models in such systems is studied, on the one hand, as a method for displaying the current information on the behavior of impurities over the power unit process path and, on the other hand, as a method for predicting their behavior. The possibility to use mathematical models when the water quality degrades, when the concentration of hydrocarbonates in the path increases, and also in analyzing the quality of ultrapure waters is examined. The article presents models based on the measurements of water sample conductivity upstream and downstream of the H-cation exchange filter, and pH values. The possibility to determine, by calculation, the rate of corrosion processes over the process path of a nuclear power plant unit using the hydrogen number, mass action law equations, material balance equations, and normalization conditions is analyzed. Impurity behavior prediction models based on neural networks are analyzed. The main types of mathematical models based on the water ionic composition, material balance, and neural networks that are used in cycle chemistry-monitoring systems are given; their advantages and drawbacks are pointed out, and current trends in the development of these models are formulated.

**Keywords:** thermal power plant, water chemistry, cycle chemistry-monitoring system, prediction, diagnostics, water and steam quality, hydrogen ion exponent, electrical conductivity, material balance