

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ВОДЫ И ПАРА НА ТЭС¹

© 2024 г. О. В. Егошина^а, *, С. К. Лукутина^а

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: yegoshinaov@mpei.ru

Поступила в редакцию 05.12.2023 г.

После доработки 05.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Системы химико-технологического мониторинга предназначены для оперативного комплексного автоматизированного контроля, анализа, диагностики и прогнозирования водно-химического режима энергетического оборудования во всех режимах его работы, включая пуски и остановки, а также для дистанционного автоматизированного управления одним или несколькими технологическими процессами в обслуживаемом технологическом объекте. Сформулированы основные требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химического режима. Разработаны и исследованы математические модели, базирующиеся на материальном балансе, ионном составе теплоносителя и рекуррентных нейронных сетях, позволяющие прогнозировать концентрации примесей по тракту энергоблока для предотвращения нарушения водно-химического режима на начальном этапе. Разработан алгоритм оперативной оценки качества, основанный на безразмерных коэффициентах, которые позволяют предоставить объективную информацию о состоянии водно-химического режима, выявить нарушения, которые влияют на водно-химический режим. Имитационная модель с пользовательским интерфейсом разработана на основе набора алгоритмов с учетом требований, предъявляемых к системам химико-технологического мониторинга: визуализация, интерактивность, отчетность, настройка, масштабируемость, непрерывность и простота. Модель облегчает работу оперативного персонала электростанций в части принятия решений и недопущения нарушений водно-химического режима энергоблока, позволяет контролировать технологические параметры энергоблока в реальном времени, анализировать статистические данные, прогнозировать параметры на основе алгоритмов материального баланса, ионных равновесий и нейронных сетей. Составлено руководство для пользователя, которое поможет адаптироваться в интерфейсе программы. В руководстве имеется краткое описание структуры системы: информационных, диагностических функций, основных элементов мнемосхемы и набора управляющих кнопок.

Ключевые слова: тепловая электростанция, энергоблок, водно-химический режим, система химико-технологического мониторинга, прогнозирование, диагностика, качество воды и пара, концентрации примесей, насыщенный пар, индекс качества

DOI: 10.56304/S0040363624700255

В настоящее время для управления водно-химическим режимом (ВХР) теплоэнергетического оборудования используются системы химико-технологического мониторинга (СХТМ), в которые заложены математические модели, описывающие изменение концентраций примесей в пароводяном тракте. Структура системы химического контроля и управления водно-химическим режимом на ТЭС представлена на рис. 1.

Отечественный и мировой опыт создания систем химико-технологического мониторинга поз-

волил сформулировать следующие требования к ним [1, 2]:

своевременное выявление отклонений параметров ВХР от нормируемых значений;

определение момента начала нарушения ВХР;

выяснение причины, источника нарушений и принятие решений по их устранению;

прогнозирование развития нарушения и времени, в течение которого параметры качества теплоносителя достигнут нормируемых значений при соответствующих действиях оперативного персонала.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-20314, <https://rscf.ru/project/22-29-20314/>).

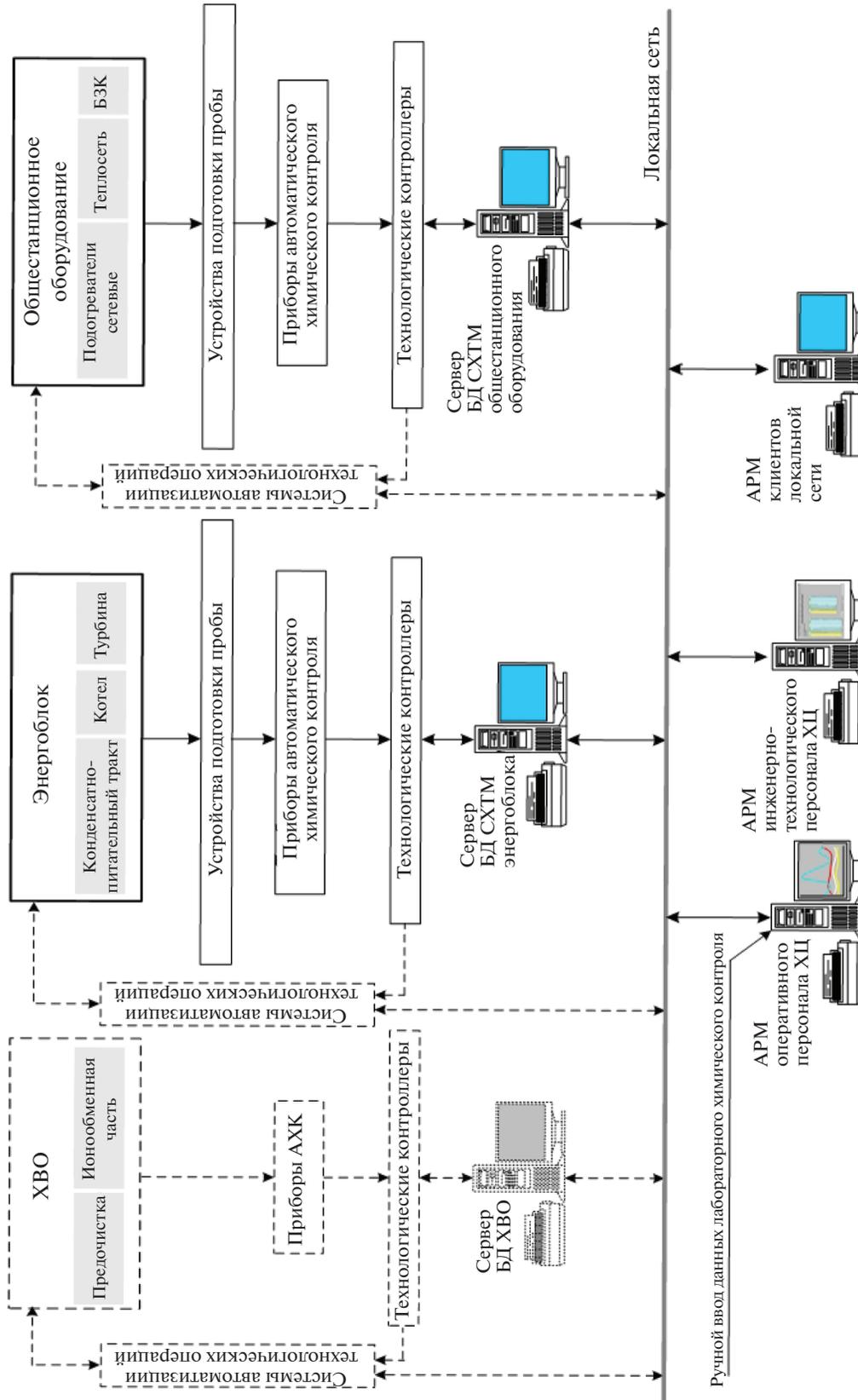


Рис. 1. Структура системы химического контроля и управления водно-химическим режимом на ТЭС. ХВО – химводоочистка; БЗК – бак запаса конденсата; АХК – автоматический химический контроль; БД – база данных; АРМ – автоматизированное рабочее место; ХЦ – химический цех

При проектировании систем мониторинга появляются задачи, требующие создания интеллектуальной, адаптивной системы, использующей автоматические методы контроля для оперативного прогнозирования и управления химико-технологическими процессами. Данная работа нацелена на создание имитационной модели с пользовательским интерфейсом. С помощью такой модели можно контролировать изменение параметров энергоблока в реальном времени, анализировать данные и прогнозировать концентрации примесей на основе материального баланса и нейронных сетей.

УРАВНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ

Согласно требованиям, предъявляемым к системам мониторинга качества воды и пара [2], разработана имитационная модель, включающая в себя математические модели, позволяющие контролировать текущее состояние водно-химического режима, а также прогнозировать концентрации примесей для обнаружения нарушений ВХР на начальном этапе. Математическая модель распределения концентрации примеси по тракту энергоблока представлена следующими дифференциальными уравнениями [3]:

в общем виде

$$M \frac{dC_{\text{вых}}(t)}{dt} = D_{\text{вх}} C_{\text{вх}}(t) - D_{\text{вых}} C_{\text{вых}}(t); \quad (1)$$

для барабана котла

$$M_6 \frac{dC_{\text{вых}}(t)}{dt} = D_{\text{вх}} C_{\text{вх}}(t) - (K_p + \omega) D_{\text{вых}} C_{\text{вых}}(t), \quad (2)$$

где M , M_6 – масса воды в замкнутой емкости и барабане котла, кг; $C_{\text{вх}}(t)$, $C_{\text{вых}}(t)$ – концентрация примеси в рабочей среде, поступающей в замкнутую емкость и выходящей из нее, мг/дм³; t – текущее время, с; $D_{\text{вх}}$, $D_{\text{вых}}$ – расход рабочей среды, поступающей в замкнутую емкость и выходящей из нее, кг/с; K_p – коэффициент распределения примеси между водой и паром; ω – влажность пара.

С помощью математической модели можно рассчитать концентрации примесей во всех основных потоках до и после нанесения возмущения (резкое повышение концентрации примеси в одном из потоков теплоносителя), прогнозировать концентрации примеси по тракту энергоблока в номинальном и нештатном режимах работы энергоблока.

Возмущающее воздействие может иметь ступенчатый и линейный характер. Наиболее тяжелый вид возмущения – ступенчатый (возможен в аварийной ситуации, например при разрыве трубок конденсатора). Выражение для ступенчатого

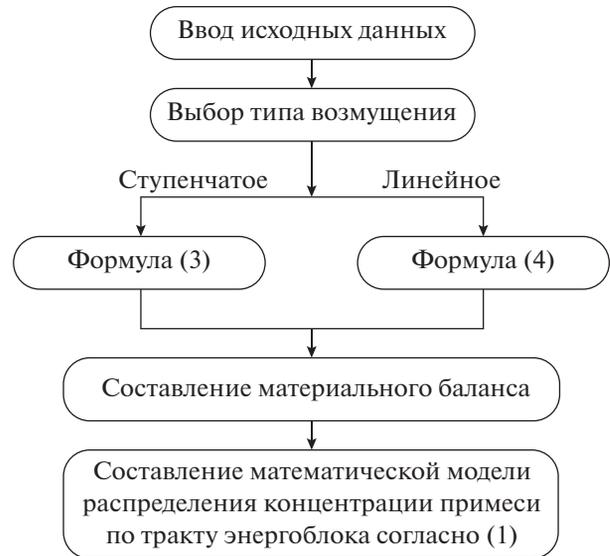


Рис. 2. Блок-схема разработанной математической модели, основанной на материальном балансе

изменения концентрации примеси в теплоносителе можно представить в следующем виде:

$$C(t) = \begin{cases} C_0 & \text{при } t < 0; \\ C_\tau & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $C(t)$ – изменение концентрации примеси в теплоносителе во времени, мг/кг; τ – время, в течение которого определяется скорость протекания процесса, с; C_0 , C_τ – концентрация примеси в теплоносителе в момент начала нарушения ВХР и в момент времени τ , мг/кг.

Линейное изменение концентрации примеси рассматривается как упрощенный вариант экспоненциального возмущения, поскольку в начальный момент времени экспонента ведет себя как прямая:

$$C(t) = \frac{C_\tau - C_0}{\tau} t + C_0. \quad (4)$$

Блок-схема математической модели, основанной на материальном балансе, представлена на рис. 2.

Для разработанного алгоритма проведена апробация с помощью промышленных данных, полученных на примере двухконтурного энергоблока парогазовой установки мощностью 450 МВт с аммиачным водно-химическим режимом. В состав дубль-блока входят газовая турбина мощностью 160 МВт, котел-утилизатор вертикального профиля с принудительной циркуляцией в испарительных контурах высокого и низкого давления и паровая турбина Т-125/150-7.4. Деаэрация конденсата осуществляется в деаэрационном устройстве, встроенном в барабан контура низ-

кого давления. Параметры перегретого пара котла-утилизатора приведены далее:

Номинальная производительность контура, т/ч:	
высокого давления.....	224.5
низкого давления.....	49.8
Температура пара на выходе из контура, °С:	
высокого давления.....	510
низкого давления.....	205
Давление в контуре, МПа:	
высокого давления.....	7.96
низкого давления.....	0.6

РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ В ПОТОКАХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Далее приведены уравнения для расчета концентрации примесей на отдельных участках тепловой схемы энергоблока.

Распределение примеси в конденсаторе:

$$C_{о.к}(t) = \frac{D_{прис.т}C_{прис}}{D_{о.к}} + \frac{D_{п}C_{п} + D_{ХОВ}C_{ХОВ} + D_{КПУ}C_{КПУ}}{D_{о.к}} - \frac{(D_{прис.т} - D_{прис.0})C_{прис}}{D_{о.к}} e^{\frac{-D_{о.к}t}{M_{к}}}, \tag{5}$$

где $C_{о.к}$, $C_{прис}$, $C_{п}$, $C_{ХОВ}$, $C_{КПУ}$ – концентрация примесей в основном конденсате, охлаждающей воде, поступающей в конденсатор с присосами, паре, химически очищенной воде, конденсате пара уплотнений, мкг/дм³; $D_{прис.т}$, $D_{прис.0}$, $D_{п}$, $D_{ХОВ}$, $D_{КПУ}$, $D_{о.к}$ – расход охлаждающей воды с присосами в конденсатор в момент времени τ и начальный момент, пара, химически очищенной воды, конденсата пара уплотнений, основного конденсата, кг/с; $M_{к}$ – масса воды в конденсаторе.

Распределение примеси в барабане низкого давления:

$$C_{к.в}^{н.д}(t) = \frac{D_{о.к}}{D_{н.п}^{н.д}(K_p^{н.д} + \omega_{н.д}) + D_{п.в}^{в.д}} \times \left\{ \frac{C_{о.к\tau} - C_{о.к0}}{\tau} \frac{M_{Бнд}}{D_{н.п}^{н.д}(K_p^{н.д} + \omega_{н.д}) + D_{п.в}^{в.д}} \times \left[e^{\frac{D_{н.п}^{н.д}(K_p^{н.д} + \omega_{н.д}) + D_{п.в}^{в.д}}{M_{Бнд}}t} - 1 \right] + C_{о.к}(t) \right\}, \tag{6}$$

где $C_{к.в}^{н.д}$, $C_{о.к\tau}$, $C_{о.к0}$ – концентрация примеси в котловой воде контура низкого давления, в основном конденсате в момент времени τ и начальный момент, мкг/дм³; $D_{н.п}^{н.д}$, $D_{п.в}^{в.д}$ – расход насыщенного пара в контуре низкого давления и питательной воды в контуре высокого давления, кг/с; $M_{Бнд}$ – масса воды в барабане низкого давления, кг; $K_p^{н.д}$ – коэффициент распределения примеси в контуре низкого давления; $\omega_{н.д}$ – влажность пара в барабане котла низкого давления.

Распределение примеси в насыщенном паре контура низкого давления:

$$C_{н.п}^{н.д}(t) = (K_p^{н.д} + \omega_{н.д})C_{к.в}^{н.д}, \tag{7}$$

где $C_{н.п}^{н.д}$ – концентрация примеси в насыщенном паре контура низкого давления, мкг/дм³.

Распределение примесей в барабане высокого давления:

$$C_{к.в}^{в.д}(t) = \frac{D_{п.в}^{в.д}}{D_{н.п}^{в.д}(K_p^{в.д} + \omega_{в.д}) + D_{прод}} \times \left\{ \frac{C_{п.в\tau}^{в.д} - C_{п.в0}^{в.д}}{\tau} \frac{M_{БВД}}{D_{н.п}^{в.д}(K_p^{в.д} + \omega_{в.д}) + D_{прод}} \times \left[e^{\frac{-D_{н.п}^{в.д}(K_p^{в.д} + \omega_{в.д}) + D_{прод}}{M_{БВД}}t} + 1 \right] - C_{п.в}^{в.д}(t) \right\}, \tag{8}$$

где $C_{к.в}^{в.д}$, $C_{п.в\tau}^{в.д}$, $C_{п.в0}^{в.д}$, $C_{п.в}^{в.д}$ – концентрация примеси в котловой воде высокого давления, питательной воде высокого давления в момент времени τ и начальный момент, питательной воде высокого давления, мкг/дм³; $D_{н.п}^{в.д}$, $D_{прод}$ – расход насыщенного пара высокого давления и продувочной воды, кг/с; $K_p^{в.д}$ – коэффициент распределения примеси в контуре высокого давления; $M_{БВД}$ – масса воды в барабане котла высокого давления, кг; $\omega_{в.д}$ – влажность насыщенного пара высокого давления.

Распределение примеси в насыщенном паре контура высокого давления:

$$C_{н.п}^{в.д}(t) = (K_p^{в.д} + \omega_{в.д})C_{прод}, \tag{9}$$

где $C_{н.п}^{в.д}$, $C_{прод}$ – концентрация примеси в насыщенном паре высокого давления и продувочной воде, мкг/дм³.

Также были выполнены расчеты распределения технологических параметров по тракту энергоблока при ступенчатом увеличении концентрации примеси в основном конденсате, вызванном

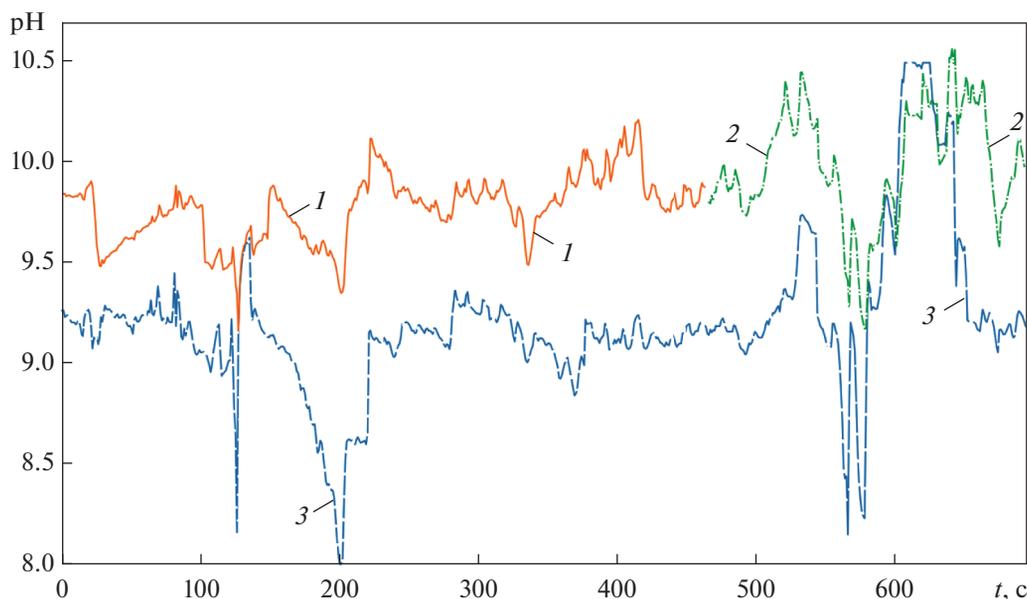


Рис. 3. Прогнозирование значений pH питательной воды за экономайзером высокого давления. 1 – исходные данные; 2 – предсказанные значения pH; 3 – данные, полученные с помощью нейронной сети

ухудшением качества обессоленной воды после водоподготовительной установки, определены распределения примесей в основном конденсате, котловой воде и насыщенном паре контуров низкого и высокого давления. Расхождение расчетных концентраций примеси с измеренными значениями на исследуемом энергоблоке составляло 20%.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НА БАЗЕ ИОННОГО СОСТАВА ВОДЫ

В [4–7] приводится математическая модель, разработанная на базе анионно-катионного состава воды применительно к паросиловому и парогазовому энергоблокам с аммиачным водно-химическим режимом при повышенном содержании гидрокарбонатов. С помощью такой модели можно рассчитать концентрацию аммиака и pH в воде, используя удельную электрическую проводимость до контакта воды с сильнокислотным катионитом и после него.

Удельная электрическая проводимость воды и концентрации отдельных ионов, присутствующих в ней, связаны между собой зависимостью

$$1000\chi = \sum \lambda_i C_i, \quad (10)$$

где C_i – концентрация катиона или аниона, моль/дм³; χ – удельная электрическая проводимость ионов, См/см; λ_i – эквивалентная электрическая проводимость, См · м²/моль.

Особенностью данной модели является наличие эмпирического коэффициента, который учи-

тывает долю ионов аммония, не удаленных из воды сильнокислотным катионитом. Значение этого коэффициента, определенное по результатам экспериментов в лабораторных условиях, составляет 0.02–0.05. Разработанная математическая модель была опробована на установке, которая представляет собой систему дозирования корректирующих реагентов в ручном или автоматическом режиме управления химико-технологическим процессом.

На промышленных данных, полученных в период штатной эксплуатации парогазовой установки, проведено экспериментальное опробование математической модели прогнозирования концентрации примеси в питательной воде с помощью нейронной сети долгой краткосрочной памяти. Объектом исследования являлось значение pH питательной воды за экономайзером высокого давления. На рис. 3 представлен результат экспериментального опробования существующей нейронной сети типа LSTM для прогнозирования pH питательной воды.

Данные, полученные с помощью модели, близки к промышленным данным. На всем временном диапазоне максимальная абсолютная погрешность определения pH составляет 1.35. Сеть LSTM показала хорошую сходимость в штатном режиме работы энергоблока, что дает возможность использовать ее для прогнозирования значений любого контролируемого параметра ВХР в определенной точке теплосилового тракта.

АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Для контроля ВХР энергоблока разработан алгоритм оперативной оценки состояния режима на базе универсального показателя – индекса качества водного режима отдельного потока теплоносителя или энергоблока [6]. Индекс качества состояния водного режима – безразмерный показатель, приведенный к нормируемому значению. Минимальные требования к системам химического контроля и управления при реализации индекса качества – наличие работоспособной системы автоматического химического контроля с передачей данных на верхний уровень системы, достоверность показаний автоматических анализаторов, наличие нормируемого значения отдельного показателя химического контроля.

В основу расчета индекса качества заложено условие: чем больше значение индекса качества, тем серьезнее нарушение водно-химического режима. Если текущий параметр находится в пределах установленных норм, то значение индекса качества изменяется от 0 до 1. Значение равно 1 является граничным между нормальным значением контролируемого параметра и нарушением.

В расчет индексов качества (ИК) заложены следующие варианты изменения нормируемых текущих параметров химического контроля, используемые при ведении водно-химических режимов:

параметр не должен превышать нормированное значение (например, жесткость питательной воды):

$$\text{ИК} = \frac{Z_i}{Z_{\text{верх}}}, \quad (11)$$

где Z_i – текущее значение параметра; $Z_{\text{верх}}$ – верхнее нормируемое значение;

параметр должен быть не ниже нормируемого значения (например, рН перегретого пара):

$$\text{ИК} = 1 + \frac{Z_{\text{ниж}} - Z_i}{Z_{\text{ниж}}}, \quad (12)$$

где $Z_{\text{ниж}}$ – нижнее нормируемое значение;

параметр ограничен верхним и нижним нормируемыми значениями (например, рН питательной воды):

при $Z_i \geq Z_{\text{опт}}$

$$\text{ИК} = \frac{Z_i - Z_{\text{опт}}}{Z_{\text{верх}} - Z_{\text{опт}}}, \quad (13)$$

где $Z_{\text{опт}} = \frac{Z_{\text{верх}} + Z_{\text{ниж}}}{2}$;

при $Z_i < Z_{\text{опт}}$

$$\text{ИК} = \frac{Z_{\text{опт}} - Z_i}{Z_{\text{опт}} - Z_{\text{ниж}}}. \quad (14)$$

Индекс качества применим для оперативной оценки состояния водно-химического режима отдельных параметров, участка тракта и энергоблока в целом.

Общий индекс качества ($\text{ИК}_{\text{общ}}$) рассчитывается с учетом следующих условий:

контролируемые параметры находятся в допустимых пределах:

$$\text{ИК}_{\text{общ}} = \text{ИК}_{\text{max}} - (1 - \text{ИК}_{\text{max}})(\text{ИК}_{\text{max}} - \text{ИК}_{\text{cp}}), \quad (15)$$

где ИК_{max} – максимальное текущее значение индекса качества по тракту или его участку; ИК_{cp} – среднее арифметическое текущих значений индексов качества по тракту, за исключением максимального значения; множитель $(1 - \text{ИК}_{\text{max}})$ необходим, чтобы при нарушениях водно-химического режима, когда индекс качества одного из параметров превышает единицу, изменение общего индекса качества не было резким;

при $\text{ИК}_{\text{max}} > 1, \text{ИК}_{\text{cp}} < 1$:

$$\text{ИК}_{\text{общ}} = 1 + \text{ИК}_{\text{cp}} \frac{\text{ИК}_{\text{max}} - 1}{2}; \quad (16)$$

при $\text{ИК}_{\text{max}} > 1, \text{ИК}_{\text{cp}} > 1$:

$$\text{ИК}_{\text{общ}} = \frac{\text{ИК}_{\text{max}} + \text{ИК}_{\text{cp}}}{2}. \quad (17)$$

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма расчета индекса качества, который применим для любых систем химико-технологического мониторинга, прежде всего для систем с автоматическими анализаторами. Для оперативной оценки состояния водно-химического режима целесообразно вычислять индексы качества не только для отдельных параметров, но и для участка тракта и энергоблока в целом. Апробация алгоритма была проведена на примере энергоблока парогазовой установки мощностью 450 МВт в номинальном режиме работы.

Следующим шагом в использовании индексов качества на тепловых электростанциях является определение наступления времени нарушения. На рис. 5 приведен пример прогнозирования времени наступления нарушения (16:29) практически совпадает с действительным временем его наступления (16:20). Таким образом, в приведенном примере время нарушения водно-химического режима спрогнозировано довольно точно (9 мин) за 1 ч 10 мин до наступления нарушения.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета индекса качества

При выходе какого-либо из контролируемых параметров за пределы установленных норм, значение индекса качества энергоблока превысит единицу, что может служить сигналом оператору о возможном нарушении режима дозирования реагентов. Однако вследствие того, что концентрация дозируемого реагента является показателем, который определяется с помощью лабораторного химического контроля, возникает сложность в прогнозировании, так как анализы поступают периодически. Представленный алгоритм реализован в среде программирования и внедрен в имитационную модель с интерфейсом. Индексы качества динамически выводятся для каждой точки контроля отдельного технологического потока и для энергоблока в целом.

В процессе выполнения работы создана имитационная модель с пользовательским интерфейсом [8], которая позволяет контролировать технологические параметры энергоблока и прогнозировать концентрации примесей по его тракту, оценивать состояние водно-химического режима.

На рис. 6 показана визуализация имитационной модели исследуемого энергоблока высокого давления с указанием точек контроля и мест дозирования корректирующих реагентов. На главном интерфейсе выводятся значения контролируемых параметров в реальном времени, на основе которых рассчитываются индексы качества для каждого контролируемого потока и энергоблока в целом. Основное окно интерфейса разбито на две части: мнемосхему с предоставлением технологических параметров и управляющие кнопки, которые можно разделить на две группы: открывающие другие окна и управляющие основным окном. При нажатии кнопки START начинается вывод текущих значений параметров и индексов качества в таблицы, кнопки SAVE – сохраняются все значения в формате .xlsx, отображенные с момента нажатия кнопки START до момента нажатия кнопки SAVE (прекращение вывода данных).

В таблице представлены используемые разделы имитационной модели. Обоснование включения определенных разделов в имитационную мо-

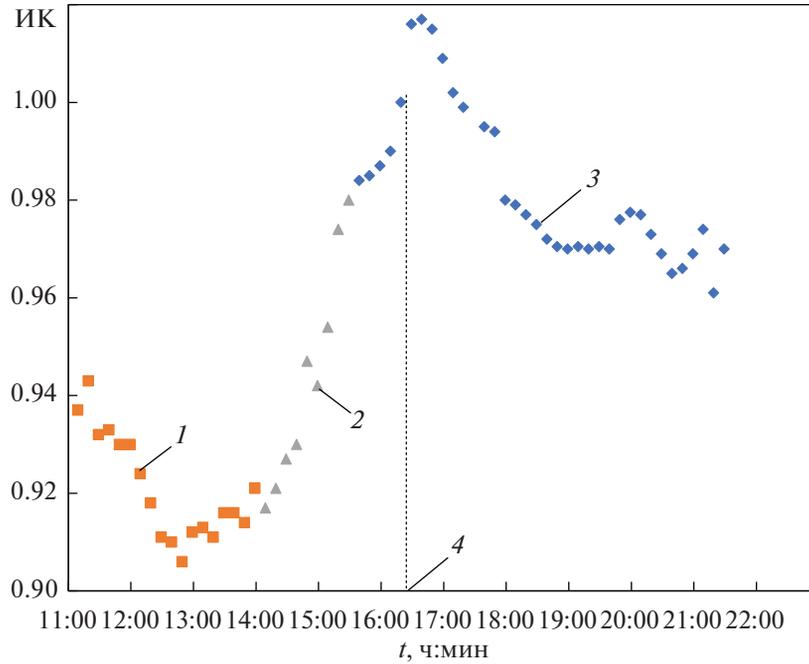


Рис. 5. Прогнозирование времени нарушения водно-химического режима.
 1 – текущее значение индекса качества; 2 – данные для прогнозирования; 3 – прогнозируемые значения; 4 – время нарушения (прогноз)

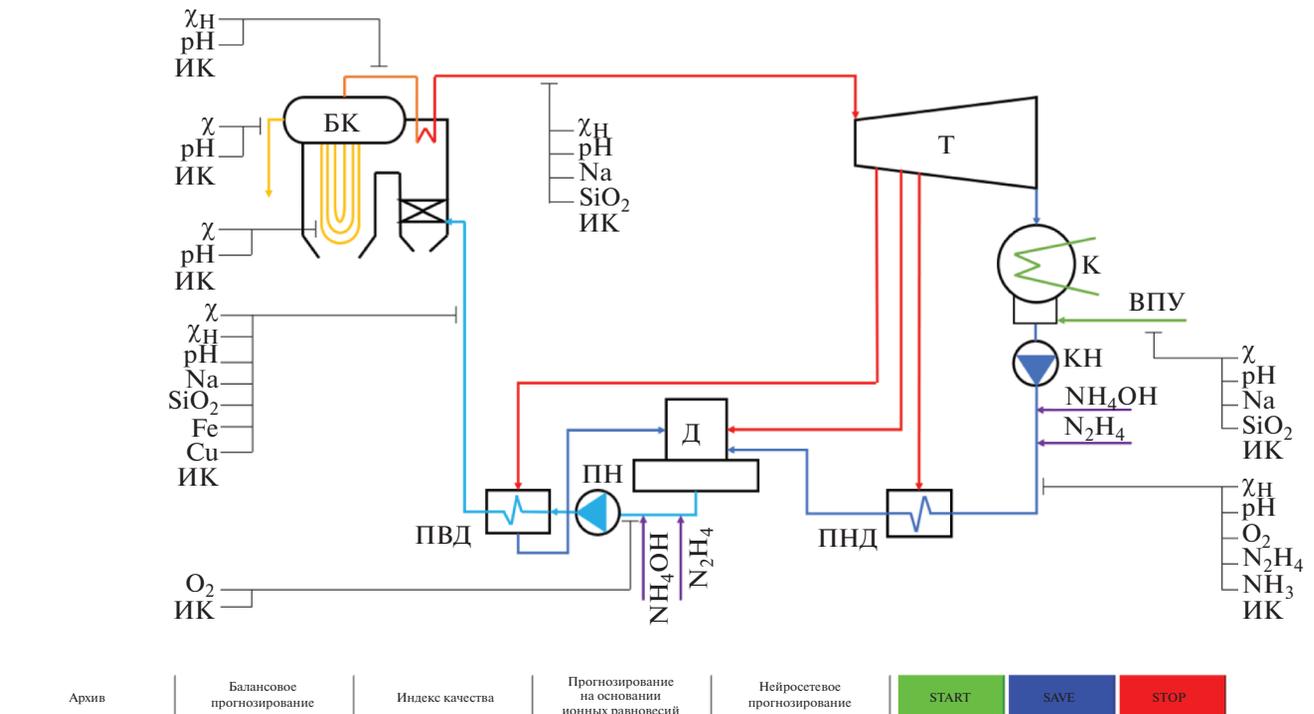


Рис. 6. Мнемосхема системы химико-технологического мониторинга качества воды и пара энергоблока с котлом высокого давления.
 БК – барабан котла; Т – турбина; К – конденсатор; КН – конденсатный насос; ПНД – подогреватель низкого давления; Д – деаэратор; ПН – питательный насос; ПВД – подогреватель высокого давления; ВПУ – водоподготовительная установка; χ – удельная электрическая проводимость; χ_H – удельная электрическая проводимость Н-катионированной пробы теплоносителя

Обоснование использования разделов имитационной модели

Раздел модели, открывающие кнопки	Содержание раздела	Обоснование
Архив	Статистика любого параметра для любых потоков	Сохранение (архивирование) поступающей информации в течение определенного времени эксплуатации основного оборудования технологического объекта является одним из требований, предъявляемых к функциональности СХТМ [2]
Прогнозирование на основе ионных равновесий	Математическая модель на основе анионно-катионного состава рабочей среды	Применение косвенных алгоритмов уменьшает нагрузку по расходу пробы на пробоотборные точки, сокращая объем лабораторного химического контроля. Используется алгоритм расчета значения рН и концентрации аммиака на основе измерений удельной электрической проводимости прямой и Н-катионированной проб. Одна из причин необходимости применения косвенных алгоритмов – удобство и простота контроля за данными параметрами
Нейросетевое прогнозирование	Математическая модель на основе нейронных сетей	Прогнозирование является одним из основных предназначений оперативного комплексного автоматизированного контроля [2]. Прогнозирование позволяет предотвратить нарушения водно-химического режима на начальном этапе, что повышает надежность работы энергетического оборудования
Балансовое прогнозирование	Математическая модель на основе материального баланса	
Индекс качества	Алгоритм оперативной оценки ведения водно-химического режима на ТЭС	Применение универсальных средств оценки водно-химического режима дает возможность предоставить объективную информацию о его состоянии, выявить нарушения, которые влияют на качество рабочей среды. Наличие комплексной оценки водно-химического режима позволяет оперативно оценить его состояние за минимальное время [2]

дель – это соответствие каждого раздела общим техническим требованиям, предъявляемым к системам химико-технологического мониторинга водно-химических режимов на тепловых электростанциях [2].

При использовании архива пользователь может проанализировать статистику за определенный период времени. Прогнозирование на основе ионных равновесий позволяет отслеживать результаты расчета концентрации аммиака и рН с помощью ионных равновесий. Нейросетевое прогнозирование дает возможность пользователю получить результат прогноза отдельного параметра по модели, основанной на нейронных сетях. С помощью балансового прогнозирования пользователь получает результаты прогнозирования концентрации примеси в основном конденсате, питательной воде, котловой воде и насыщенном паре по модели, базирующейся на материальном балансе.

ВЫВОДЫ

1. Разработанную имитационную модель системы химико-технологического мониторинга, которая представляет собой прототип качественно новой интеллектуальной системы химического контроля и управления ВХР на тепловых электростанциях, предполагается использовать в качестве цифрового двойника при подключении к промышленным данным, получаемым от действующего энергетического объекта.

2. При разработке алгоритмов, которые входят в состав имитационной модели, применяется индекс качества теплоносителя, который обеспечивает оперативную оценку состояния водно-химического режима энергоблока. При этом прогнозируемое время наступления нарушения водно-химического режима практически совпадает с действительным временем его наступления.

3. При прогнозировании рН питательной воды за экономайзером высокого давления парогазовой установки с помощью математической модели на базе нейронной сети долгой краткосрочной памяти LSTM максимальная абсолютная погрешность составила 1.35.

4. При прогнозировании концентраций примесей по тракту энергоблоков тепловых электростанций с помощью модели на основе материального баланса и нейронных сетей совпадение расчетных данных с измеренными значениями находится в пределах 20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Technical Guidance Document – 2015 Revision: Instrumentation for monitoring and control of cycle chemistry for the steam-water circuits of fossil-fired and combined cycle power plants.** Stockholm: The International Association for the Properties of Water and Steam, 2015.
2. **РД 153-34.1-37.532.4-2001.** Общие технические требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химических режимов тепловых электростанций. М.: СПО ОРГРЭС, 2001.
3. **Егошина О.В., Звонарева С.К., Большакова Н.А.** Методы диагностики и прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблока в системах химико-технологического мониторинга на тепловых электростанциях (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 5. С. 49–57. <https://doi.org/10.56304/S0040363623050016>
4. **Егошина О.В., Звонарева С.К., Иванова А.О.** Оценка влияния гидрокарбонатов на рН и концентрации аммиака в условиях ухудшения качества питательной воды // Теплоэнергетика. 2023. № 6. С. 67–74. <https://doi.org/10.56304/S0040363623060036>
5. **Ларин Б.М., Ларин А.Б., Колегов А.В.** Измерения электропроводности и рН в системах мониторинга водного режима ТЭС. Иваново: ИГЭУ, 2014.
6. **Лукашов М.Ю.** Исследование взаимосвязи растворимости и электропроводности примесей теплоносителя ТЭС при высоких температурах и давлениях // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2005. № 1. С. 41–44.
7. **Егошина О.В., Лукутина С.К.** Разработка имитационной модели прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблока в системах химико-технологического мониторинга на тепловых электростанциях // X Междунар. науч.-техн. конф. “Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Цели и задачи”. Москва, ОАО ВТИ, 14 декабря 2023 г. С. 54–62.

Simulation Modelling of Cycle Chemistry Monitoring of Water and Steam Quality at Thermal Power Plants

O. V. Egoshina^{a, *} and S. K. Lukutina^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: yegoshinaov@mpei.ru

Abstract—Cycle chemistry monitoring systems are intended for online comprehensive automatic monitoring, analysis, diagnostics, and prediction of the water chemistry in power equipment in all regimes of its operation, including startups and shutdowns, as well as for remote automatic control of one or several processes in the serviced process facility. Basic requirements for cycle chemistry monitoring systems are formulated. Mathematical models, which are based on the material balance, ionic composition of the coolant, and recurrent neural networks, have been developed and studied. They enable us to predict the concentration of impurities along the power unit’s path to prevent failures of the water chemistry. An algorithm has been developed for online quality assessment, based on dimensionless coefficients that provide fair information on the water-chemistry conditions and help to detect failures affecting the water chemistry. A simulation model with a user interface has been developed based on a set of algorithms considering the requirements for cycle chemistry monitoring systems, such as visualization, interactivity, reporting, customization, scalability, continuity, and simplicity. The model facilitates the activities performed by the operational personnel of power plants as to decision-making and prevention of failures of the water chemistry of the power unit, enables us to monitor the process parameters of the power unit in real time, analyze statistical data, predict parameters using algorithms on the basis of the material balance, ionic equilibria, and neural networks. A user manual has been prepared to help one to understand the program interface. The manual contains a brief description of the system structure, including information and diagnostic functions, basic elements of the mnemonic diagram, and a set of control buttons.

Keywords: thermal power plant, power unit, water chemistry, cycle water-chemistry monitoring system, prediction, diagnostics, water and steam quality, concentration of impurities, saturated steam, quality index