

УДК 628.1

Н. М. Богослав, ассистент

АНАЛИЗ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ВОДОПОДГОТОВКИ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Article is devoted problems of modern level of automation of installations of water preparation for the boiler equipment, major factors making negative impact on a system condition as a whole are considered. The choice of the scheme and a way of clearing depending on quality of initial water and the requirements shown to processed water is explained. Classification of systems of water preparation according to parameters of arriving streams and external factors is given. Also one of variants of an adaptive control system is considered by water purification process, the algorithm of work of the scheme is resulted. Conclusions that the control and management of water preparation for power systems demand application of systems of the adaptive management considering change of seasonal conditions, instability of water stream both under the expense and on structure and presence of critical events are as a result drawn.

Введение. Системы водоподготовки котлов являются важной составляющей энергетики предприятий. От качества поступающей на их питание воды зависит надежность и эффективность работы. Одной из проблем является образование твердых отложений на поверхности котлов, теплообменников и трубопроводов, приводящих к потерям энергии. Неудовлетворительное качество воды из котельной обуславливает перерасход топлива из-за накипи (5–7% на 1 мм накипи); повышение энергопотребления насосов (до 7% на 2 мм отложений); снижение сроков службы и постоянный ремонт оборудования; затраты на промывку котлов и теплообменников; падение КПД систем и котлов (при эксплуатации 3–4 месяца до 50%). Это связано с отсутствием в котельных установках водоподготовки либо с износом имеющихся. В итоге вода подается в систему без обработки.

Важнейшими показателями качества воды, определяющими пригодность использования ее в промышленности и энергетике, являются [1]: содержание взвешенных веществ (прозрачность) и солей (минерализация); концентрация водородных ионов (рН); жесткость и ее составляющие; окисляемость (содержание органических веществ); щелочность и ее составляющие; содержание коррозионно-активных газов.

Загрязняющие воду примеси различаются по природе (неорганические, органические, биологические) и размерам. Крупные неорганические частицы (от единиц микрометра до миллиметра) гетерогенны, видны невооруженным глазом в виде мутности, имеют четкую границу раздела с водой и могут самопроизвольно осаждаться [2]. Микрочастицы (от долей до единиц микрометра) имеют неорганическую или биологическую природу, невоору-

женным глазом определяются как опалесценция, из-за броуновского движения не осаждаются. Макромолекулы растворимых органических веществ с молекулярной массой до 500 000 единиц, а также вирусы и бактерии имеют размеры от сотых долей до микрометра. Истинные растворы, содержащие ионы растворенных неорганических веществ, имеют размеры в единицы ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10 \text{ мкм}$).

Широкий спектр примесей и их неоднородный характер приводят к тому, что для обеспечения надлежащего качества водоподготовки необходимы адаптивные системы управления процессом водоочистки. Первые адаптивные системы водоочистки были реализованы в США и Великобритании и показали высокую эффективность.

Основная часть. В зависимости от качества исходной воды и требований к питательной воде водоподготовка котельных может включать следующие операции [3]: 1) очистка от взвешенных частиц (отстаивание, фильтрация); 2) очистка от железа и марганца (отстаивание, фильтрация, окисление с фильтрацией); 3) удаление органических загрязнений (обесцвечивание, дезодорация); 4) умягчение воды (реагентное, ионный обмен, нанофильтрация, электрохимическая обработка); 5) обессоливание (термическое, ионный обмен, мембранный и обратный осмос, электродиализ, комбинированный); 6) удаление биозагрязнений; 7) коррекция состава воды (щелочности или кислотности, содержания Са, F). В настоящее время в системах водоподготовки котельных наиболее широко применяются умягчение и обессоливание по средствам обратного осмоса [4]. Однако для данных технологий часто требуется предварительная подготовка воды с целью удаления железа и органических примесей.

Для повышения надежности и экономичности систем водоподготовки необходимо учитывать теорию их динамического анализа и динамической оптимизации, т. е. всесторонне проанализировать условия эксплуатации и определить динамические характеристики режимов, в которых работает система, учесть критерии эффективности при работе в переменных режимах и синтезировать систему управления.

Центральный технологический оператор системы водоподготовки представляется в виде

$$C_{\text{вых}} = A(z, u, \xi) [C_{\text{вх}}], \quad (1)$$

где $C_{\text{вых}}$, $C_{\text{вх}}$ – исходное и конечное качество воды (загрязненность), определяемое чаще всего концентрациями ингредиентов; z – вектор конструктивно-технологических параметров; u – вектор управляющих воздействий, компенсирующих влияние колебаний $C_{\text{вх}}$ и ξ , включающий признаки структурной организации и параметры системы управления; ξ – вектор возмущающих воздействий, изменяющих свойство оператора A в процессе эксплуатации.

Основными задачами при построении системы управления являются оценка динамической эффективности, т. е. расчет колебаний $C_{\text{вых}}$ при соответствующих колебаниях $C_{\text{вх}}$, ξ , известном $A(z, u)$, и синтез динамически оптимальной системы, т. е. поиск оптимального варианта $A(z, u)$ при колебаниях $C_{\text{вх}}$ и ξ .

По характеру возмущающих воздействий можно выделить три основные системы: 1) системы с переменными по расходу и составу потоками; 2) системы, режим функционирования которых обусловлен метеоусловиями; 3) системы, работа которых зависит от природных источников и приемников воды.

Наличие систем с переменными по расходу и составу потоками вызвано нестационарностью водопотребления предприятий, которая диктует переменные режимы работы звеньям систем водоподготовки и выражается чаще в изменении необходимого количества воды и очень редко в изменении задания на ее регламентное качество. В настоящее время главным фактором нестационарности со стороны производства, ставящим наиболее сложные задачи, является переменность состава воды. Колебания расхода и состава водных потоков, поступающих на водоочистку, часто дополняются колебаниями температуры воды, что делает неустойчивой кинетику водообработки и ведет к плотностной стратификации потоков. Если рассмотреть нестационарность расхода воды, поступающей на очистку, в течение года и разложить расход в ряд Фурье, то получим

$$F(t) = \sum_{k=0}^n (F_k + A_k(t)) \cos \omega t, \quad (2)$$

где $F(t)$ – расход воды, поступающей на очистку; $A_k(t)$ – случайная функция, берущая в расчет неустойчивость расхода.

Тогда $F_0 + A_0(t)$ будет учитывать среднегодовое изменение расхода, а $A_0(t)$ будет достаточно мало (1–2% от F_0). $F_1 + A_1(t)$ принимает во внимание среднемесячное изменение расхода, где $A_1(t)$ составляет в зависимости от месяца и поры года 5–10% от F_1 . $F_2 + A_2(t)$ – среднесуточное изменение расхода, $A_2(t)$ может варьировать в широком диапазоне. Для непрерывного производства в зависимости от времени суток $A_2(t)$ может составлять 50–80% от среднесуточного расхода воды F_2 . В случае циклического характера производства (например, при работе в две смены) амплитуда $A_2(t)$ может достигать 100% от среднесуточного расхода.

Системы с режимом функционирования, зависящим от метеоусловий, характеризуются фактором метеорологической открытости как причиной нестационарности. Этот фактор влияет на тепловые процессы в обрабатываемых водных потоках. Поскольку промышленное водопользование сопровождается в большинстве случаев нагреванием воды, то главный интерес представляют процессы испарительного охлаждения воды атмосферным воздухом. Свойства воздуха как охладителя определяются температурой Θ , влажностью ϕ и барометрическим давлением P_6 . Для этих факторов нет проблемы первичной информации об условиях эксплуатации даже для проектируемых объектов. Опыт обработки метеорологической информации показывает, что для большинства климатических зон полную функцию внутригодового распределения температур допустимо строить на основе среднесуточных данных с поправкой на внутрисуточные колебания. Таким образом, зависимость температуры окружающей среды от времени имеет вид

$$T(t) = \sum_{k=0}^n (T_k + A_k(t)) \cos \omega t, \quad (3)$$

где $T(t)$ – температура поступающей на очистку воды; $A_k(t)$ – случайная функция, учитывающая неустойчивость температуры воды.

$T_0 + A_0(t)$ принимает во внимание среднегодовое изменение температуры, где $A_0(t)$ может изменяться в пределах 1–2°C. $T_1 + A_1(t)$ учитывает среднемесячное изменение температуры ($A_1(t)$ составляет 3–5°C). $T_2 + A_2(t)$ – среднесуточное изменение температуры, где $A_2(t)$ будет варьировать в пределах 5–10°C в зависимости от времени суток и поры года. Для учета изменения температуры подземных вод, залегающих на определенной глубине, в соответствии с температурой окружающей среды внесем в (3) запаздывание в виде смещения фазы ψ :

$$T(t) = \sum_{k=0}^n (T_k + A_k(t)) \cos[\omega t + \psi]. \quad (4)$$

Гидрологический режим систем, функционирование которых зависит от природных водосточников, определяется располагаемым количеством воды, применяемой для водозабора или разбавления сточных вод. Главным ξ -фактором функционирования большинства систем при этом является нестационарность речного стока. Поскольку непостоянство расхода воды в реках представляло интерес для многих отраслей народного хозяйства, этот фактор хорошо изучен и отражен математическими моделями, которые вполне приемлемы для использования в решении задач динамики систем водоподготовки.

Таким образом, с точки зрения нестационарности очищаемой воды и представленного разложения в ряд Фурье очевидно, что с увеличением номера гармоник растет диапазон изменения параметров (расхода, температуры). Поэтому система управления водоочисткой должна быть адаптированной к суточным вариациям параметров. Одна из таких систем представлена на рисунке.

На установку водоподготовки подается исходная неочищенная вода. Перед поступлением воды на очистку вводится коагулянт, укрупняющий частицы. Расход измеряется преобразователем, сигнал с которого поступает на логический контроллер. По заданию оператора контроллер выдает сигнал на управление насосом подачи коагулянта № 1 и насосом управления рН № 2 в зависимости от расхода воды. Насос № 1 предназначен для загрузки коагулянтов, например сульфата алюминия. Насос № 2 служит для подачи рН-агентов. Смеситель

перемешивает исходную воду, коагулянт и рН-агенты перед подачей их на установку водоочистки. Коагулянт взаимодействует с взвешенными частицами, укрупняет их и подготавливает к процессам флокуляции, хлорирования и фильтрации.

Датчик тока течения необходим для измерения величины тока течения воды непосредственно после введения коагулянта. Передаточная функция датчика будет иметь следующий вид:

$$W_{TT} = \frac{k_1}{(T_{эл1} + 1)(T_{см1} + 1)} e^{-\tau_1 p}, \quad (5)$$

где k_1 – коэффициент усиления; $T_{эл1}$ – постоянная времени электрода, равная 1–2 с; $T_{см1}$ – постоянная времени смешения в ячейке, составляющая 2–3 с; τ_1 – транспортное запаздывание, определяемое временем от введения коагулянта до прохождения потоком датчика тока течения; p – оператор Лапласа.

Совмещенный с датчиком тока течения рН-метр предназначен для измерения уровня рН. Его передаточная функция будет иметь вид

$$W_{pH} = \frac{k_2}{(T_{эл2} + 1)(T_{см2} + 1)} e^{-\tau_2 p}, \quad (6)$$

где k_2 – коэффициент усиления; $T_{эл2}$ – постоянная времени электрода, равная 0,05 мин; $T_{см2}$ – постоянная времени смешения в ячейке, составляющая 0,05 мин; τ_2 – транспортное запаздывание, определяемое временем от введения коагулянта до прохождения потоком рН-метра; p – оператор Лапласа.

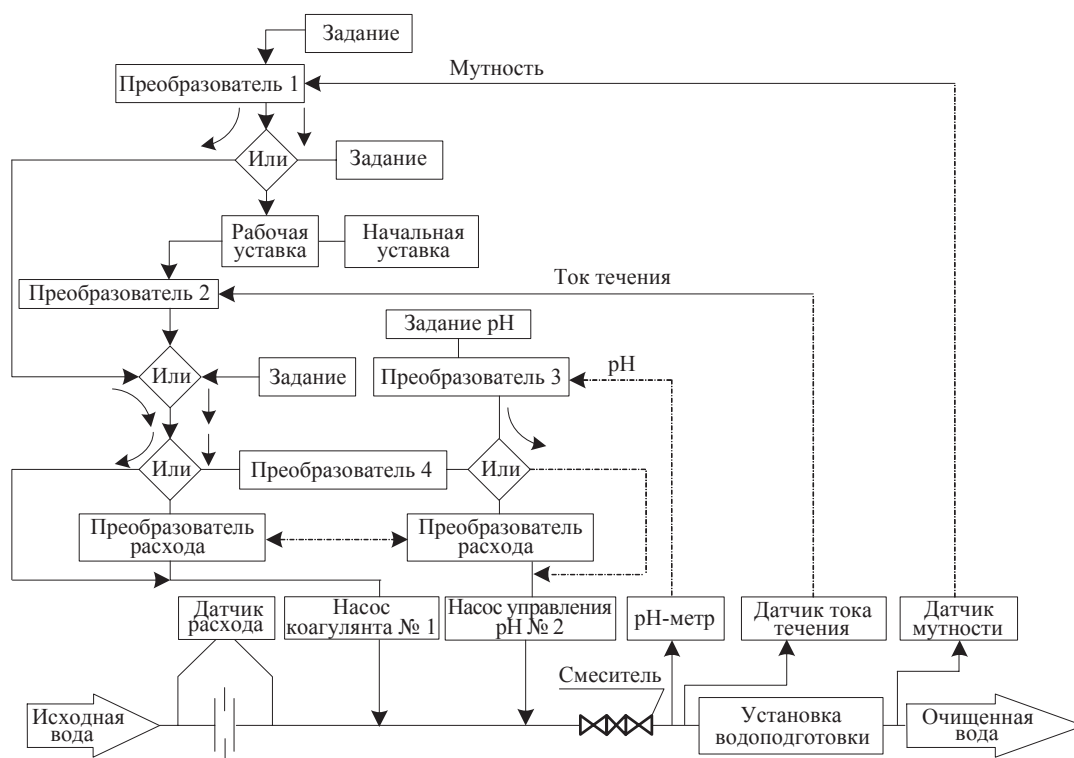


Рисунок. Система управления водоочисткой с дозированием коагулянта

Сигнал рН-метра передается на контроллер для корректировки расхода рН-агентов посредством насоса № 2, что обеспечивает поддержание постоянного уровня рН в воде. Стабилизация рН необходима по той причине, что датчик тока течения не может определять, произошли изменения электрокинетического потенциала из-за изменения рН или концентрации взвешенных частиц. Передаточная функция датчика мутности воды на выходе установки водоподготовки имеет следующий вид:

$$W = \frac{k_3}{T+1} e^{-\tau_3 p}, \quad (7)$$

где k_3 – коэффициент усиления; T – постоянная времени датчика, составляющая порядка 1 с; τ_3 – транспортное запаздывание, определяемое временем от введения коагулянта до прохождения потоком датчика мутности; p – преобразователь Лапласа.

Сигнал датчика подается на контролер для задания и корректировки уставки для сигнала датчика тока течения.

Последовательность операций контроллера представлена на рисунке. Изначально датчик тока течения не активен, и контроллер управляет насосом подачи коагулянта по показаниям датчика. Этот режим работы системы используется для калибровки датчика тока течения или при неисправности датчика.

Контроллер периодически считывает сигнал с выхода датчика расхода, датчика тока течения, рН-метра и датчика мутности. После выполнения первого цикла контроллер определяет завершенность очистки на установке водоподготовки (если нет, то осуществляются предыдущие операции, если да, то контроллер переходит к следующей стадии цикла).

Во время выполнения второго цикла контроллер проверяет дозу коагулянта и рН-агентов в воде. Расход неочищенной воды регулируется автоматически в соответствии с нормой выработки. При этом корректируется подача коагулянта и рН-агентов.

При изменении расхода оператором контроллер начинает управлять преобразователями расхода по сигналу от датчика расхода, воспринимая изменение расхода исходной воды и изменяя дозу подаваемого коагулянта и рН-агентов. Если расход воды не изменяется, то дозировка коагулянта и рН-агентов остается неизменной.

Далее контроллер выполняет третий цикл и проверяет, достигла ли очищаемая вода, содержащая определенную дозу коагулянта, датчика мутности. Время очистки воды может варьироваться в пределах от 20 мин до нескольких часов в зависимости от типа установки. Это время задается программно оператором. Каждый раз, когда время истекает, контроллер высчитывает

диапазон зоны нечувствительности по показателю мутности. Ширина зоны нечувствительности определяется следующим образом: к заданному значению мутности прибавляются и отнимаются допустимые значения отклонения. Если мутность лежит в пределах этой зоны, контроллер продолжает выполнять операции. При выходе показаний за пределы зоны нечувствительности контроллер начинает корректировать уставку по каналу тока течения, изменяя расход коагулянта. При этом оператор имеет возможность вывести из действия датчик потока течения, так что контроллер игнорирует показания датчика тока течения и управляет насосом подачи коагулянта исключительно по показаниям датчика мутности. Если при этом показатели мутности попадают в заданный диапазон, то уставка является правильной, а работа датчика тока течения считается некорректной.

На насос подачи коагулянта поступает сигнал контроллера. Контроллер проверяет, достигла ли вода с известной дозой коагулянта датчика тока течения. Далее отсчитывает время прохождения воды через смеситель и после каждого цикла определяет допустимые пределы зоны нечувствительности, сравнивает данные пределы с показаниями датчика. Если показания находятся в пределах указанного диапазона, то доза коагулянта является правильной и подстройка не нужна. Если показания датчика лежат выше зоны нечувствительности, то устанавливается снижение дозы; если ниже, то увеличение дозы.

Заключение. Контроль и управление водоподготовкой для энергетических систем требует применения систем адаптивного управления, учитывающих изменение сезонных условий и наличие критических событий. Главной задачей, при этом, является использование адаптивной интеллектуальной системы управления с применением принципиально новых датчиков контроля качества в системе.

Литература

1. Рябчиков, Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б. Е. Рябчиков. – М.: ДеЛи принт, 2004. – 301 с.
2. Вода в дисперсных системах / Б. В. Дерягин [и др.]; под общ. ред. Б. В. Дерягина. – М.: Химия, 1989. – 288 с.
3. Хохрякова, Е. А. Водоподготовка: справочник / Е. А. Хохрякова, Я. Е. Резник; под ред. С. Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.
4. Смирнов, Д. Н. Автоматическое регулирование процессов очистки сточных и природных вод / Д. Н. Смирнов. – М.: Стройиздат, 1974. – 256 с.