
**МЕТАЛЛЫ
И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ**

**МОНИТОРИНГ ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА НЕОБОГРЕВАЕМЫМИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КОТЛОВ**

© 2023 г. Е. А. Гринь^а, *, Д. Н. Панфилов^а

^аВсероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

*e-mail: EAGrin@vti.ru

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 23.02.2023 г.

Принята к публикации 01.03.2023 г.

Показано, что применение систем мониторинга на действующем оборудовании тепловых электростанций продолжает оставаться весьма актуальным. Проанализированы существующий организационный порядок и методические приемы проведения экспертизы ресурсных характеристик высокотемпературных элементов оборудования. Отмечены недостатки таких подходов и обоснованы преимущества технологий мониторинга и предиктивной диагностики для объективной оценки технического состояния ответственных узлов и элементов энергооборудования, работающих в условиях ползучести, и управления их ресурсными характеристиками. Объектом исследования является прямоточный котел на сверхкритические параметры пара, и в качестве наиболее ответственных его элементов, подлежащих мониторингу, приняты выходные коллекторы конвективного пароперегревателя высокого давления, паросборные камеры и пароперепускные трубы между этими коллекторами и камерами. Изучены конструкция и материалы, из которых изготовлены указанные элементы, а также схема организации движения пара на данных участках тракта и контроля рабочих параметров на них. Изложены методические аспекты, составляющие основу разработанной системы мониторинга, включая положения о порядке регистрации и систематизации показаний штатных датчиков температуры и давления, подходах к определению по этим данным расчетных характеристик, необходимых для оценки ресурса элементов. Прописан алгоритм системы в виде пошаговой последовательности выполнения в ходе мониторинга расчетных процедур в контексте предложенной физической модели исчерпания ресурса металла, базирующейся на закономерных связях между параметрами пара и длительностью работы, а также свойствами металла. Для оценки стадии выработки ресурса использован принцип линейного суммирования повреждаемости. Отмечены особенности учета в алгоритме исходно накопленной в металле поврежденности в случае организации системы мониторинга на ранее эксплуатировавшемся оборудовании. Представлены сведения о численной проверке разработанного алгоритма, в том числе по фактическим данным функционирования реализованной системы мониторинга. Сформулированы предложения о порядке оценки состояния металла в рамках предиктивной диагностики, осуществляемой на основе действующей системы.

Ключевые слова: мониторинг, котел, высокотемпературные элементы, ползучесть, датчики контроля, эквивалентные параметры, эквивалентная наработка, ресурс, алгоритм, повреждаемость, состояние металла

DOI: 10.56304/S0040363623080040

В настоящее время одной из ключевых проблем в тепловой энергетике России является высокий уровень износа генерирующих мощностей. Простой и внеплановый ремонт из-за отказов основного оборудования, а также плановые мероприятия по его диагностированию, количество которых увеличивается по мере нарастания сроков эксплуатации, приводят к затруднениям в работе теплоэнергетических предприятий. Поэтому необходимо совершенствовать подходы к организации технического обслуживания и ремонтов

тепломеханического оборудования, в первую очередь на основе применения современных технологий.

Активно развивающееся в последнее время научно-техническое направление, именуемое предиктивная диагностика [1–3], заключается в разработке расчетно-аналитического аппарата, предназначенного для отслеживания (мониторинга) состояния основных элементов электрических станций, в частности ТЭС, раннего обна-

ружения дефектов и прогнозирования их развития. Такая система диагностики может быть весьма эффективной для мониторинга оборудования, процесс деградации технического состояния которого может быть описан физически обоснованными закономерностями, напрямую зависящими от фактических условий эксплуатации. В частности, это могут быть узлы и элементы энергоустановок, работающие при высоких температурах, вызывающих ползучесть металла [4].

Для ответственных элементов тепломеханического оборудования, функционирующих в условиях ползучести, устанавливаются в технической документации завода-изготовителя или в нормативной документации [4, 5] значения назначенного ресурса. При достижении этих пределов данные элементы подлежат техническому диагностированию с оценкой остаточного ресурса для подтверждения возможности продолжать их эксплуатацию.

Расчет ресурсных характеристик высокотемпературных элементов оборудования, работающих в условиях ползучести, выполняется на заданные, в частности на расчетные (проектные), параметры, которые обычно отличаются от фактических, причем последние не постоянны в процессе работы, т.е. варьируются во времени. Это означает, что фактическая наработка оборудования, которая, казалось бы, должна являться прямым показателем доли исчерпания назначенного ресурса, не тождественна такому показателю. Например, если параметры работы (прежде всего температура) определенных элементов ниже установленных (расчетных) параметров, то доля исчерпанного ресурса за конкретный период времени будет меньше доли, соответствующей фактической наработке за этот период при установленных параметрах. И наоборот, если реальные параметры работы будут превышать установленные (расчетные) значения, то выработка ресурса будет происходить ускоренным темпом. Вследствие этого были разработаны и введены понятия эквивалентных параметров и эквивалентной наработки [4–6]. Эти характеристики определяются на основе соотношений длительной прочности для некоторого рассматриваемого периода эксплуатации с учетом фактических данных по параметрам и соответствующим им наработкам в рамках этого периода. По существу, эквивалентные параметры в рассматриваемом периоде наработки соответствуют постоянным параметрам эксплуатации, при которых доля исчерпанного ресурса не будет отличаться от фактического ее уровня, накопленного за этот период при реальных (непостоянных) параметрах работы.

Эквивалентная наработка за определенный период времени, приведенная к установленным параметрам, соответствует доле исчерпанного ре-

сурса, накопленной за фактическое время этого периода при реальных параметрах работы.

Обычно технические службы тепловой электростанции фиксируют среднегодовые значения параметров за котлом и соответствующие каждому году наработки. При достижении оборудования назначенного ресурса нормативная документация предписывает выполнять расчет эквивалентных параметров и наработок с использованием вышеуказанных среднегодовых данных и затем проводить по ним оценку остаточного ресурса на последующий период эксплуатации [5, 6]. Такой подход обеспечивает в некоторой степени объективный учет условий предшествующей эксплуатации и позволяет оценить ориентировочно долю выработанного на текущий момент ресурса.

Однако следует иметь в виду, что на ТЭС среднегодовые параметры получены обработкой данных по среднеарифметическому принципу за каждый календарный год, т.е. за достаточно продолжительный период времени, кроме того, формальное усреднение не учитывает связи между параметрами жаропрочности (температурой и временем) и поэтому соответствующие среднегодовые значения параметров не являются достаточно объективными показателями.

Также надо обратить внимание на то, что при существующем подходе расчет эквивалентных параметров и наработок с последующей оценкой ресурсных характеристик проводится уже при достижении оборудованием назначенного ресурса, хотя, как отмечено ранее, в связи с вариативностью параметров работы котла фиксация этого момента по фактической наработке не является объективным показателем состояния с позиции исчерпания ресурса металла. В зависимости от конкретных режимов эксплуатации реальное достижение назначенного ресурса может наступить по фактической наработке как раньше, так и позже формального срока. Иными словами, получается, что на практике момент достижения оборудованием назначенного ресурса не привязан жестко к фактическому состоянию металла и, следовательно, сроки обслуживания оборудования не являются оптимальными.

В той же мере это относится и к срокам достижения дополнительно назначенного после проведенного диагностирования ресурса (т.е. на стадии выработки остаточного ресурса), поскольку остаточный ресурс оценивается и устанавливается на принятые (заданные) постоянные параметры последующей эксплуатации, в то время как фактические параметры работы могут с ними не совпадать и к тому же они непостоянны во времени.

Избежать вышеизложенных несоответствий можно было бы путем непрерывного с весьма краткой периодичностью фиксирования факти-

Исходная информация о рассматриваемых элементах при $T_p = 818 \text{ K}$ (545°C)

Наименование элементов	Диаметр наружный d_a , мм	Толщина стенки s , мм	Расчетное давление p , МПа	Количество элементов на котле/на потоке, шт.
Выходные коллекторы КПП ВД	273	60	25.9	12/6 (по 3 на подпоток)
Паросборные камеры	377	70	25.8	4/2 (по 1 на подпоток)
Гибы пароперепускных труб	159	32	25.9	48/24 (по 12 на подпоток)

ческих параметров эксплуатации оборудования в привязке к этим отрезкам (периодам) времени и последующей синхронной обработке этих данных по специальному алгоритму, учитывающему закономерные связи параметров жаропрочности. В таком варианте можно было бы отслеживать накопление поврежденности или, что то же самое, выработку ресурса металла в режиме реального времени с достаточной точностью.

В настоящей статье представлены результаты работы, выполненной в рамках решения этой задачи применительно к конкретному прямооточному котлу энергоблока сверхкритического давления (СКД).

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Мониторинг выработки ресурса организован и проводится для наиболее проблемных высокотемпературных необогреваемых элементов котла: выходных коллекторов конвективного пароперегревателя высокого давления (КПП ВД), паросборных камер (ПСК) и пароперепускных труб между этими коллекторами. Согласно технологической схеме парового тракта котла, движение пара организовано по каждой стороне котла (симметрично) двумя подпотоками, которые перед входом в паропровод соединяются в поток по каждой из сторон в узле объединения свежего пара (УОСП).

Датчики температуры, имеющие вывод на компьютер, установлены по каждому подпотоку за ПСК перед входом в УОСП. Следовательно, на котле в выходной части парового тракта высокого давления выведены на компьютер с каждой стороны котла два термодатчика (по одному на каждый подпоток). Датчики давления, выведенные на компьютер, установлены сразу за УОСП, и, следовательно, регистрироваться и обрабатываться в online-режиме будут данные по давлению на каждом потоке, т.е. объединенные по двум подпотокам каждой стороны котла.

Основные сведения по рассматриваемым элементам котла приведены в таблице. Материалом для изготовления выходных коллекторов КПП ВД и ПСК является сталь 15X1M1Ф, а гибов пароперепускных труб – 12X1MФ.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Методически предусматривается проводить отсчет стадии выработки ресурса элементами с использованием данных по температуре и давлению. С учетом оснащенности котла средствами контроля параметров пара было решено не привлекать дополнительные средства и ограничиться штатными датчиками температуры и давления. Следовательно, для элементов, входящих в конкретный подпоток, сигнал закладывается в обработку с отдельного, соответствующего данному подпотоку, температурного датчика (всего на котел четыре сигнала: T_{11} , T_{12} , T_{21} и T_{22} , где первый индекс обозначает номер потока, второй – номер подпотока), а сигнал с датчика давления – общий (объединенный) для каждой пары подпотоков, т.е. единый уже для элементов всего потока или каждой стороны котла (p_1 , p_2).

Принимая во внимание места расположения датчиков контроля параметров по ходу движения пара (по тракту) и с учетом расчетных значений температуры и давления для рассматриваемых групп элементов, а также практического опыта в этой части, приняли следующий порядок использования сигналов с датчиков при расчетном анализе ресурсных характеристик элементов. Для выходных коллекторов КПП ВД закладываемая в расчетный анализ температура по каждой группе элементов (по каждому подпотоку) увеличивается относительно снимаемых с датчиков сигналов на $\Delta T = 5 \text{ K}$. При этом учитывается, помимо прочего, инерционный характер перемешивания паровой среды в коллекторе, поступающей из пароперегревателя.

Следовательно, расчет проводится по температурным данным $T_{11} + 5 \text{ K}$, $T_{12} + 5 \text{ K}$, $T_{21} + 5 \text{ K}$ и

$T_{22} + 5 \text{ К}$ для элементов соответствующего подпотока. Для ПСК расчет ресурсных характеристик выполняется по фактическим регистрируемым датчиками значениям (сигналам) температуры (T_{11} , T_{12} , T_{21} и T_{22} – для камеры соответствующего подпотока). Для пароперепускных труб (КПП ВД – ПСК) используемая в расчетных оценках температура увеличивается относительно регистрируемых датчиками сигналов на $\Delta T = 2 \text{ К}$ ($T_{11} + 2 \text{ К}$, $T_{12} + 2 \text{ К}$, $T_{21} + 2 \text{ К}$ и $T_{22} + 2 \text{ К}$).

Показания с датчиков давления, используемые при расчетных оценках ресурса, увеличиваются относительно реальных сигналов на $\Delta p = 0.3 \text{ МПа}$ для выходных коллекторов КПП ВД и пароперепускных труб ($p_1 + 0.3 \text{ МПа}$, $p_2 + 0.3 \text{ МПа}$) и на $\Delta p = 0.2 \text{ МПа}$ для ПСК ($p_1 + 0.2 \text{ МПа}$, $p_2 + 0.2 \text{ МПа}$).

Действующие в диагностируемых элементах приведенные напряжения σ определяются в функции от давления p по формулам согласно нормам прочности [7] и в упрощенном виде могут быть представлены выражением

$$\sigma = pG, \tag{1}$$

где G – обобщенный геометрический параметр элемента.

Для коллекторов (выходных КПП ВД и ПСК)

$$G = G_1 = \frac{d_a - (s - c)}{2\varphi(s - c)}, \tag{2}$$

где d_a – номинальный наружный диаметр коллектора; s – номинальная толщина стенки коллектора; c – компенсирующая прибавка к толщине стенки; φ – коэффициент снижения прочности из-за перфорации коллектора системой отверстий под перепускные трубы.

Согласно технической документации на котел коэффициент снижения прочности принят $\varphi = 0.764$ для выходных коллекторов КПП ВД и $\varphi = 0.848$ для ПСК.

Для гибов пароперепускных труб

$$G = G_2 = 0.5 \left(d_a - \frac{s - c}{KY} \right) \frac{KY}{s - c}, \tag{3}$$

где K и Y – торовый коэффициент и коэффициент формы гiba соответственно [7].

Значения прибавок c и коэффициентов K и Y определяли согласно нормам [7] и при расчете по номинальным геометрическим параметрам диагностируемых элементов в соответствии с (2) и (3): для выходных коллекторов КПП ВД $G_1 = 2.50$, для ПСК $G_1 = 2.77$, для гибов пароперепускных труб (зона наружного обвода) $G_2 = 2.32$.

Расчетно-аналитическая составляющая процедуры мониторинга заключается в определении степени выработки ресурса элементами с учетом всех входящих в расчетный период режимов эксплуатации. При этом для объективной оценки ресурсных характеристик диагностируемых элементов с учетом фактических условий эксплуатации следует использовать эквивалентные параметры пара (температуру и давление), определяемые в режиме реального времени с заданной периодичностью по регулярно фиксируемым сигналам с соответствующих датчиков. Эквивалентные температуры и давления вычисляются по представленным в работе [4] и стандарте [6] соотношениям, основанным на базовых закономерностях длительной прочности металла. В [4, 6] приведено уравнение для расчета индивидуального ресурса элементов по гарантированным характеристикам длительной прочности металла с использованием эквивалентных параметров. Указанные зависимости положены в основу предложенного алгоритма оценки ресурсных характеристик и в преобразованной для решения поставленных задач форме приведены далее.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВЫРАБОТАННОГО РЕСУРСА

Весь процесс эксплуатации оборудования разбивается по времени на определенные отрезки, в пределах которых ведутся регистрация и обработка данных по параметрам пара. Авторами предложена двухступенчатая модель разделения процесса по времени: элементарный отрезок времени δ , через который осуществляется опрос показаний датчиков с фиксацией рабочих параметров, и контрольный период времени $\Delta\tau$, включающий в себя заданное количество элементарных отрезков, в ходе которого ведется обработка фиксируемых в крайних точках элементарных отрезков данных.

Следовательно, контрольный период времени

$$\Delta\tau_i = \sum_{j=1}^n \delta_{ij} = n\delta_{ij}, \tag{4}$$

где n – количество элементарных временных отрезков δ_{ij} ; i – текущий контрольный период; j – текущий элементарный отрезок времени в текущем контрольном периоде времени.

За элементарный отрезок времени принят интервал длительностью 3 мин, т.е. $\delta(\delta_{ij}) = 0.05 \text{ ч}$. Длительность контрольного периода времени было решено установить 5 ч, т.е. $\Delta\tau(\Delta\tau_i) = 5 \text{ ч}$. Тогда $\Delta\tau = 100\delta$ или $\Delta\tau_i = 100\delta_{ij}$.

Температура и давление в крайних точках каждого элементарного отрезка усредняются и полученные значения присваиваются элементарным отрезкам времени δ_{ij} .

Тогда для каждого j -го (элементарного) отрезка времени систематизация данных по температуре осуществляется следующим образом:

$$\bar{T}'_j = \bar{T}_j + \Delta T, \quad (5)$$

где $\bar{T}_j = \frac{T_j + T_{j+1}}{2}$ (T_j и T_{j+1} – показания датчиков), К; ΔT для различных видов элементов составит (см. выше): $\Delta T = 5$ К для выходных коллекторов КПП ВД, $\Delta T = 0$ для ПСК, $\Delta T = 2$ К для гибов пароперепускных труб.

Систематизация данных по давлению:

$$\bar{p}'_j = \bar{p}_j + \Delta p, \quad (6)$$

где $\bar{p}_j = \frac{p_j + p_{j+1}}{2}$ (p_j и p_{j+1} – показания датчиков), МПа; $\Delta p = 0.3$ МПа для выходных коллекторов КПП ВД и пароперепускных труб, $\Delta p = 0.2$ МПа для ПСК.

Следовательно, для разных видов элементов значения \bar{T}' и \bar{p}' будут различаться (в связи с различием в ΔT и Δp) и, кроме этого, показания датчиков T_j и T_{j+1} будут индивидуальными для разных групп одного вида элементов, находящихся в разных подпотоках [т.е. $T_{(11)j}$, $T_{(12)j}$ и т.д.], а показания датчиков p_j (p_{j+1}) – индивидуальными для групп элементов каждого потока [т.е. $p_{(1)j}$ и т.д.].

Это означает, что всем сигналам должны присваиваться по каждому из них собственные символы, привязанные к виду и группе элементов (к номеру подпотока или потока) и эта символика должна распространяться на последующие расчетные формулы. Однако с учетом общего характера расчетных формул независимо от вида и группы элементов (от номера подпотока или потока) приведенные далее соотношения даны в общем виде без привязки к конкретным виду или группе элементов (т.е. номеру подпотока или потока). Иными словами, специальная индексация по видам элементов и по номерам подпотоков (потоков) для упрощения не приводится. Это позволяет не перегружать излагаемый материал и не повторять идентичных по сути математических выражений, различающихся только символами при параметрах применительно к каждой конкретной подзадаче.

Для каждого i -го контрольного периода Δt_i определяется эквивалентная температура с использованием системы значений \bar{T}'_{ij} за все входя-

щие в этот период элементарные отрезки времени δ_{ij} с помощью соотношения

$$\sum_{j=1}^{100} \left(0.05^{T_{\varepsilon i}} \times 10^{20 \frac{\bar{T}'_{ij}}{T_{\varepsilon i}}} \right) = 5 \times 10^{20}, \quad (7)$$

где $T_{\varepsilon i}$ – эквивалентная температура в i -м контрольном периоде эксплуатации, К.

Формула (7), представляющая собой преобразованную с учетом (4) и (5) параметрическую зависимость Ларсона – Миллера, решается относительно $T_{\varepsilon i}$ методом последовательных приближений. В качестве первой итерации принято среднеарифметическое значение температуры за i -й период.

Одновременно определяется эквивалентное давление для каждого i -го контрольного периода по значениям \bar{p}'_{ij} за каждый элементарный отрезок времени δ_{ij} :

$$p_{\varepsilon i} = \left[\sum_{j=1}^{100} 0.01 \left(\bar{p}'_{ij} \right)^m \right]^{1/m}, \quad (8)$$

где $p_{\varepsilon i}$ – эквивалентное давление в i -м контрольном периоде эксплуатации, МПа; m – показатель степени в уравнении длительной прочности.

Коэффициент m вычисляется для каждого i -го контрольного периода по соответствующему эквивалентному значению температуры $T_{\varepsilon i}$ согласно [6].

В ходе мониторинга проводится также для каждого i -го контрольного периода расчетная оценка эквивалентной наработки $\tau_{\varepsilon i}$, приведенная к паспортному (расчетному) значению температуры T_p :

$$\tau_{\varepsilon i} = \frac{1}{10^{20}} \sum_{j=1}^{100} \left(0.05^{T_p} \times 10^{20 \frac{\bar{T}'_{ij}}{T_p}} \right). \quad (9)$$

Для рассматриваемого котлоагрегата принято: $T_p = 818$ К для ПСК и гибов пароперепускных труб; $T_p = 821$ К для выходных коллекторов КПП ВД.

Важным этапом в процедуре мониторинга является оценка ресурса диагностируемых элементов, которая выполняется для конкретных условий работы по каждому i -му контрольному периоду с учетом рассчитанных для данного периода эквивалентных значений температуры и давления по уравнениям (7) и (8). При этом эквивалентное давление используется для вычисления усредненного по каждому i -му периоду приведенного напряжения в соответствии с формулой (1):

$$\bar{\sigma}_i = G p_{\varepsilon i}. \quad (10)$$

Индивидуальный ресурс элементов $\bar{\tau}_i$ для каждого контрольного периода времени определяется (в часах) по формуле

$$\lg \bar{\tau}_i = \frac{1}{T_{\text{э}i}} \sum_{k=0}^5 A_k \left(\frac{n_{\text{г}} G p_{\text{э}i}}{10} \right)^k + 2 \lg T_{\text{э}i} - b, \quad (11)$$

где $n_{\text{г}}$ – коэффициент запаса прочности, принятый для выходных коллекторов КПП ВД и ПСК равен 1.35, для гибов пароперепускных труб – 1.40.

Значения коэффициентов A_k полинома и свободного члена b в уравнении (11) приведены в стандарте [6].

Полученные данные по индивидуальным ресурсам элементов используются далее для вычисления накопленной поврежденности ΔD в металле элементов за каждый i -й контрольный период $\Delta \tau_i$:

$$\Delta D_i = \frac{\Delta \tau_i}{\bar{\tau}_i} = \frac{5}{\bar{\tau}_i}. \quad (12)$$

В основу методики оценки исчерпания ресурса положен принцип линейного суммирования повреждений, и тогда накопленная за весь период мониторинга поврежденность составит

$$D_l = \sum_{i=1}^l \Delta D_i, \quad (13)$$

где l – количество контрольных периодов за весь срок мониторинга $\tau_{\text{м}}$ на текущий момент времени (учитывается целое число контрольных периодов на отрезке времени $\tau_{\text{т}}$):

$$l = \frac{\tau_{\text{м}}}{\Delta \tau_i} = \frac{\tau_{\text{т}}}{5}. \quad (14)$$

Если система мониторинга организовывается на уже работающем достаточно продолжительное время оборудовании (котле), то к моменту ввода ее в действие будет накоплена в металле исходная поврежденность, т.е. будет иметь место некая доля выработки ресурса. Этот уровень поврежденности должен быть установлен и заведен изначально в программу мониторинга выработки ресурса. Для этого, как уже указывалось в начале статьи, должны быть систематизированы и обработаны данные по среднегодовым параметрам пара за весь предшествующий период эксплуатации. В результате должны быть рассчитаны эквивалентные температура $T_{\text{э}0}$ и давление $p_{\text{э}0}$ за предшествующий период работы с использованием соотношений типа (7) и (8). В этих соотношениях

вместо сигналов с датчиков температуры \bar{T}_{ij} , давления \bar{p}_{ij} и продолжительностей элементарного δ и контрольного $\Delta \tau$ периодов используются среднегодовые температуры $\bar{T}_{\text{с}}$, давления $\bar{p}_{\text{с}}$ и соответствующие им наработки по годам, а суммирование ведется по всем предыдущим календарным годам [6]. Далее определяются индивидуальные ресурсы для рассматриваемых групп элементов $\bar{\tau}_0$ за время предшествующей эксплуатации по формуле, аналогичной формуле (11), с той разницей, что эквивалентные температура и давление относятся ко всему периоду предшествующей работы котла [6]. Таким образом, накопленная к моменту начала мониторинга поврежденность в металле элементов составит

$$D_0 = \tau_0 / \bar{\tau}_0, \quad (15)$$

где τ_0 – наработка на момент начала мониторинга.

Тогда общая накопленная поврежденность D в некий текущий период времени может быть выражена формулой

$$D = D_0 + D_l. \quad (16)$$

Как следует из структуры формул (12)–(15), поврежденность в металле представляет собой относительную (безразмерную) величину, характеризующую степень выработки ресурса данной группой элементов. Предельное значение поврежденности традиционно принимается равным единице, т.е. $[D] = 1$.

Следовательно, условием сохранения работоспособности элементами является $D \leq [D]$.

Если, к примеру, текущее значение поврежденности $D = 0.7$, то это означает, что 70% заложенного в данные элементы ресурса к настоящему моменту времени выработано. Остаточная доля ресурса составит 30%.

Имеет смысл кратко отметить еще один аспект, связанный с алгоритмом мониторинга выработки ресурса определенными группами элементов котла. Изложенный выше подход ориентирован на то, что в расчет взяты значения исполнительной толщины стенки, общей для каждого рассматриваемого вида (группы) элементов (например, указанной в паспорте котла). Поэтому приведенные напряжения рассчитывались по номинальной толщине стенки, единой для данного вида элементов, с учетом необходимых компенсирующих прибавок. Если же ситуация такова, что накануне мониторинга проведена толщинометрия элементов в полном объеме и по каждому из них имеется конкретное собственное значение минимальной толщины стенки в расчетной зоне, то оценка стадии выработки ресурса

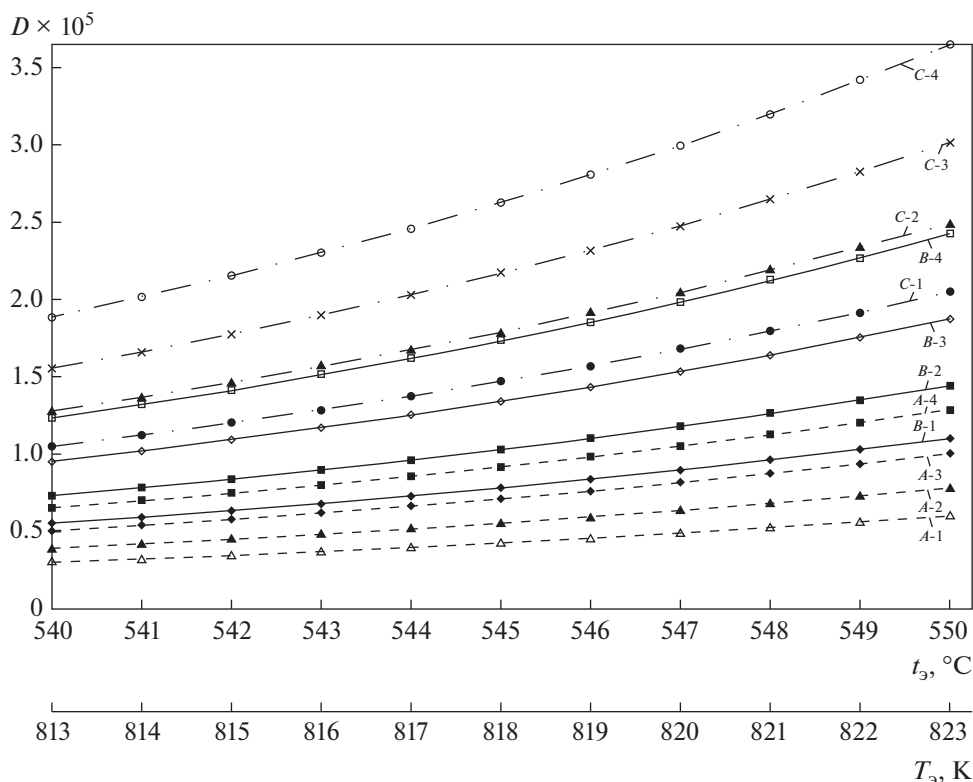


Рис. 1. Номограммы накопленной поврежденности в металле (доли исчерпанного ресурса) элементов котла в зависимости от эквивалентных параметров за один контрольный период.

Элементы: *A* – выходные коллекторы конвективного пароперегревателя высокого давления; *B* – паросборные камеры; *C* – гибы пароперепускных труб.

Эквивалентное давление p_3 , МПа: 1 – 22; 2 – 23; 3 – 24; 4 – 25

в ходе мониторинга может быть организована для каждого элемента персонально. В этом случае геометрический параметр $G(G_1, G_2)$, определяемый по формуле (2) или (3), будет рассчитываться по фактической толщине стенки элемента с учетом только эксплуатационной компенсирующей прибавки, а сами значения этого параметра будут индивидуальными для каждого элемента. Соответственно, согласно формуле (11), значения индивидуального ресурса \bar{t}_i в текущем контрольном периоде также будут различными для каждого конкретного элемента, в том числе в пределах единой подгруппы, принадлежащей одному подпотоку (т.е. для подгруппы с одинаковыми значениями эквивалентных параметров). К этому можно добавить, что при таком персонифицированном подходе алгоритмом должно предусматриваться индексирование (т.е. присвоение индивидуального индекса) каждого конкретного элемента рассматриваемого вида (и группы). В остальном порядок расчета и принципиальные положения алгоритма мониторинга ресурсных характеристик элементов сохраняются без изменений.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Как указано в начале статьи, мониторинг состояния организован для высокотемпературных элементов котла на сверхкритические параметры пара. Котел не дооснащался дополнительными средствами контроля, и система ориентирована только на штатные датчики температуры и давления, имеющие цифровую индикацию (вывод на ЭВМ). На основе разработанного алгоритма создан соответствующий программный продукт, действующий автономно (независимо) от автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) энергоблока.

В качестве примера на рис. 1 показан вариант численного опробования заложенной в основу системы мониторинга модели, фрагментированной на один контрольный период (т.е. за 5 ч). Для каждого из трех видов элементов показаны значения накопленной поврежденности металла (или доли исчерпания ресурса) за один контрольный период в зависимости от эквивалентных значений температуры и давления, которые определены системой для этого периода путем обработки

данных (T_j и p_j) по соответствующим элементарным отрезкам времени.

Очевидно, что с увеличением эквивалентных температуры и давления интенсивность накопления поврежденности в металле нарастает (см. рис. 1). Если взять, к примеру, выходные коллекторы КПП ВД и принять, что за рассматриваемый контрольный период эквивалентные температура и давление с учетом соотношений (5) и (6) составят соответственно 822 К (549°C) и 25 МПа, что отвечает параметрам пара за котлом на уровне 817 К (544°C) и 24.7 МПа, то накопленная за эти 5 ч поврежденность достигнет примерно 1.2×10^{-5} (см. рис. 1). Полагая далее условно, что и в другие контрольные периоды эквивалентные параметры будут теми же, получаем накопленную за 50 тыс. ч поврежденность около 0.12 и, следовательно, к критической отметке 0.9–1.0 поврежденность металла подойдет примерно за 370–390 тыс. ч наработки.

Применяя аналогичный подход к гибам пароперепускных труб и принимая эквивалентные параметры на уровне 818 К (545°C) и 25 МПа, получаем накопленную за рассматриваемые 5 ч поврежденность примерно 2.6×10^{-5} (см. рис. 1), или 0.26 за 50 тыс. ч наработки. В этом случае критическая отметка поврежденности будет достигнута еще до выхода на наработку 200 тыс. ч.

Приведенные оценки имеют условный характер и демонстрируют возможности разработанной системы в части реалистичного отображения картины выработки ресурса. Одновременно они показывают, что, располагая конкретными данными по рабочим параметрам пара, фиксируемыми в ходе мониторинга, можно получить достаточно точное воспроизведение отслеживаемых ресурсных характеристик.

Результаты реализованной системы мониторинга отображаются, в частности, в виде графика изменения со временем неисчерпанной доли поврежденности или, что то же самое, остаточной доли ресурса, т.е. зависимостью величины $[1-D]$ от текущего времени. В качестве фактического примера функционирования системы рассмотрено изменение остаточной доли ресурса для ПСК за 16 недель эксплуатации котла и отмечено следующее:

в течение этого времени наблюдались три останова котлоагрегата продолжительностью несколько суток каждый;

исчерпание ресурса на различных временных отрезках рассматриваемого периода характеризуется существенно неравномерным темпом. Доли исчерпанного ресурса в пределах этих временных отрезков, нормированные пересчетом на 5 ч, т.е. на продолжительность контрольного периода, могут отличаться одна от другой в несколько раз;

усредненная накопленная поврежденность (доля выработанного ресурса) за рассматриваемые 16 недель составила примерно 3.6×10^{-3} , что за вычетом продолжительности остановов при условном пересчете на время контрольного периода (5 ч) соответствует примерно 8.0×10^{-6} . Ориентировочные оценки согласно (12), (13) показывают (см. рис. 1), что накопленная поврежденность за контрольный период находится в области реально наблюдаемых комбинаций эквивалентных параметров за предшествующий мониторингу период эксплуатации котла: давление и температура за котлом в диапазоне около 22–23 МПа и 815–819 К (542–546°C) соответственно.

Данный анализ свидетельствует о том, что получаемая в ходе мониторинга информация отражает объективную картину в отношении выработки ресурса высокотемпературными элементами котла. Кроме того, благодаря заложенным в основу мониторинга алгоритму и физической модели обеспечивается возможность непрерывной регистрации параметров и их обработки в режиме online по научно обоснованным закономерностям исчерпания длительной прочности металла, что гарантирует высокую точность выполненных оценок. В силу этих обстоятельств были уменьшены коэффициенты запаса прочности относительно нормативного значения, как это следует из расчетной зависимости (12), что приводит к более либеральным (менее жестким) оценкам ресурсных характеристик без ущерба для безопасности оборудования.

ПОРЯДОК ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОТЛА В ПРОЦЕССЕ МОНИТОРИНГА

Авторами статьи предлагается состояние металла элементов на текущий момент с учетом данных мониторинга определять по двум показателям:

накопленной поврежденности, т.е. доле исчерпания ресурса D ;

эквивалентной наработке с момента начала мониторинга τ_s .

Первый показатель характеризует уровень надежности, второй является основанием для оценки качественного уровня эксплуатации.

При реализации этих задач для каждой группы элементов в пределах конкретного подпотока (т.е. для конкретной подгруппы) фиксируются уровень поврежденности и эквивалентная наработка на текущий момент.

Алгоритм проведения оценки проиллюстрирован блок-схемой, изображенной на рис. 2, и состоит из следующих этапов.

НОРМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ

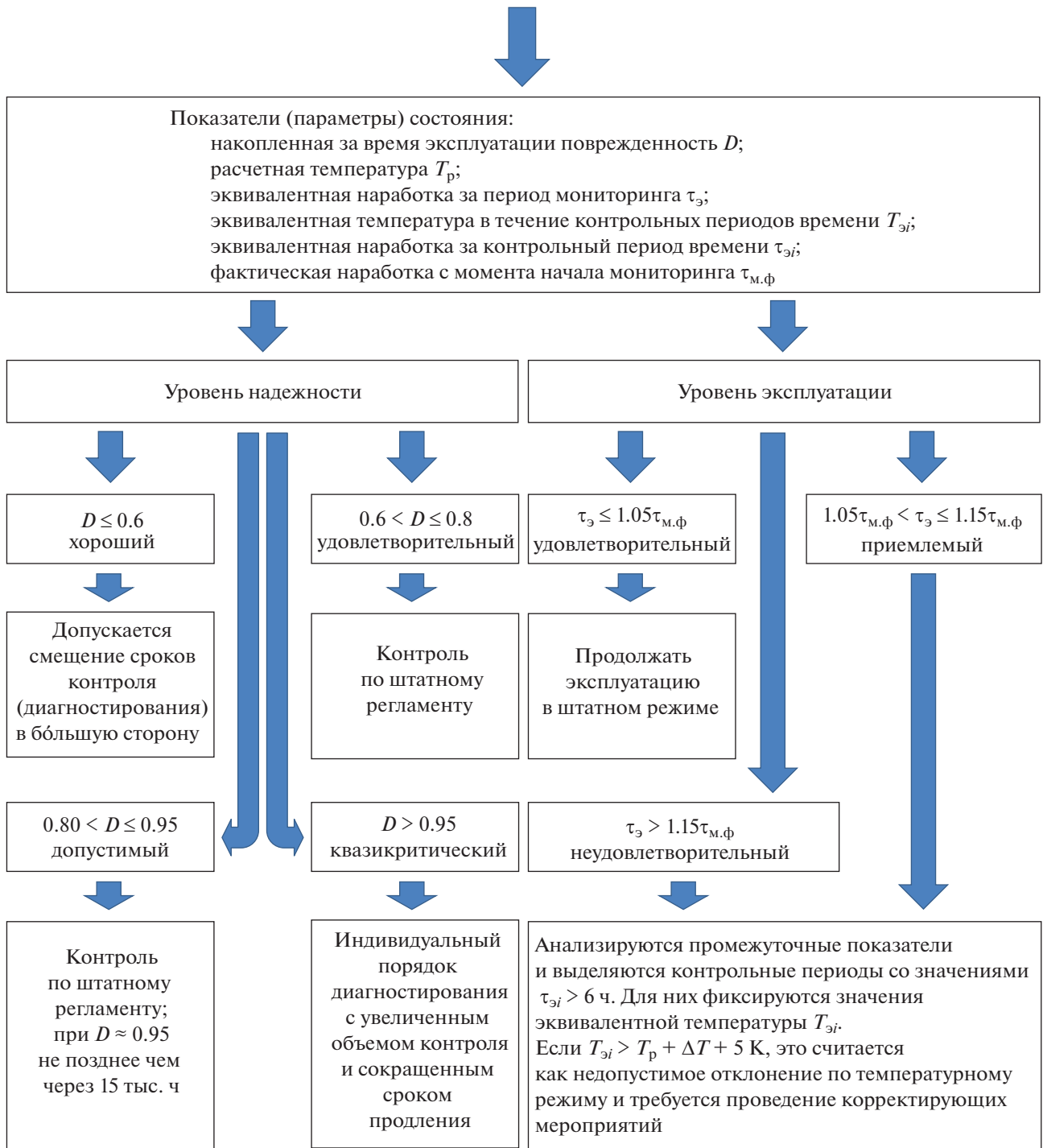


Рис. 2. Алгоритм оценки состояния элементов котла в ходе мониторинга

Для подгруппы элементов с показателем $D \leq 0.6$ надежность находится на хорошем уровне, и контроль этих элементов допускается сдвигать по времени в большую сторону относительно сроков штатного эксплуатационного контроля или срока

диагностирования по причине достижения назначенного ресурса. При значениях D для каких-либо подгрупп элементов в пределах $0.6 < D \leq 0.8$ уровень надежности считается удовлетворительным и контроль этих элементов ведется по штат-

ному регламенту. Для элементов со значениями $0.80 < D \leq 0.95$ показатель надежности квалифицируется как допустимый и контроль допускается выполнять по штатному регламенту с условием, что при достижении значения $D = 0.95$ очередной плановый контроль или диагностирование будут проведены не позднее чем через 15 тыс. ч последующей наработки. Если доля накопленной поврежденности для какой-либо подгруппы элементов превысит 0.95 ($D > 0.95$), показатель надежности таких элементов будет расцениваться как квазикритический и их диагностирование должно выполняться в индивидуальном порядке с увеличенным объемом контроля металла, включая анализ микроповрежденности, и сокращенными сроками продления дальнейшей эксплуатации (см. рис. 2).

Второй фиксируемый в ходе мониторинга показатель, представляющий собой эквивалентную наработку за время мониторинга, характеризует условия эксплуатации и определяется как сумма эквивалентных наработок за все в пределах мониторинга контрольные периоды времени (см. рис. 2):

$$\tau_{\text{э}} = \sum_{i=1}^l \tau_{\text{э}i}. \quad (17)$$

Если на текущее время выполняется условие

$$\tau_{\text{э}} \leq 1.05\tau_{\text{м.ф}} \quad (18)$$

(где $\tau_{\text{м.ф}}$ – фактическая наработка за весь предшествующий период мониторинга), то параметры эксплуатации считаются удовлетворительными и какого-либо вмешательства в процесс ведения режимов не требуется. Если эквивалентная наработка на текущий момент находится в интервале значений $1.05\tau_{\text{м.ф}} < \tau_{\text{э}} \leq 1.15\tau_{\text{м.ф}}$, параметры эксплуатации могут приниматься как приемлемые, а если $\tau_{\text{э}}$ превышает $1.15\tau_{\text{м.ф}}$, то параметры эксплуатации квалифицируются как неудовлетворительные. Для двух последних случаев программой мониторинга предусматривается анализ промежуточных показателей и выделяются контрольные периоды со значениями $\tau_{\text{э}i} > 6$ ч. Для этих периодов фиксируются соответствующие значения эквивалентной температуры $T_{\text{э}i}$, и, если она превышает расчетную температуру T_p более чем на $5 \text{ К} + \Delta T$, т.е. $T_{\text{э}i} > T_p + \Delta T + 5 \text{ К}$ (где $\Delta T = 5 \text{ К}$ для выходных коллекторов КПП ВД, $\Delta T = 2 \text{ К}$ для пароперепускных труб и $\Delta T = 0$ для ПСК), считается, что в эти периоды происходит недопустимое отклонение по температурному режиму. В этих случаях требуется проведение корректирующих мероприятий по ведению режима эксплуатации энергооборудования (см. рис. 2).

Прогностическое техническое обслуживание на основе мониторинга дает возможность повы-

сить эффективность и энергобезопасность при одновременном снижении затрат при отказах оборудования.

ВЫВОДЫ

1. Методика и алгоритм обработки контролируемых рабочих параметров и определения ресурсных характеристик, предложенные при разработке системы мониторинга состояния наиболее ответственных элементов котла, обеспечивают возможность уточнения оценки стадии выработки ресурса в online-режиме.

2. Численная апробация функционирования системы мониторинга позволила подтвердить представительность выполненных оценок в части их соответствия реальным показателям выработки ресурса.

3. Порядок анализа состояния элементов котла, сформированный в ходе мониторинга по критериям надежности и качества эксплуатации, дал возможность оптимизировать мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту котлоагрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Опыт** использования удаленного доступа и предсказательной аналитики состояния энергетического оборудования / С.А. Наумов, А.В. Крымский, М.А. Липатов, Д.Н. Скрабатун // Теплоэнергетика. 2018. № 4. С. 21–33. <https://doi.org/10.1134/S0040363618040057>
2. **Bauerbach K., Grammenoudis P.** Condition and lifetime monitoring of boiler components and piping systems at high temperatures // VGB Power Tech. 2018. V. 12. P. 75–80.
3. **Куменко А.И., Токаев А.С.** Системы мониторинга и диагностики технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС // Энергетик. 2020. № 9. С. 19–26.
4. **Гринь Е.А., Котельников В.В., Бочкарев В.И.** Надежность и безопасность тепловых электростанций. Особенности современного этапа // Электрические станции. 2016. № 7. С. 2–12.
5. **Федеральные** нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила осуществления эксплуатационного контроля металла и продления срока службы основных элементов котлов и трубопроводов тепловых электростанций”. Утв. 15.12.2020 приказом № 535 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Введ. в действие с 01.01.2021.
6. **СТО 17230282.27.100.005-2008.** Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. М.: РАО “ЕЭС России”, 2008.
7. **РД 10-249-98.** Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. М.: НТЦ “Промышленная безопасность”, 2001.

Monitoring the Percentage of Service Life Usage for Unheated High-Temperature Elements of Boilers

E. A. Grin^{a, *} and D. N. Panfilov^a

^a *All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia*

^{*}*e-mail: EAGrin@vti.ru*

Abstract—The use of monitoring systems for assessment of the condition of operating equipment at thermal power plants (TPPs) is demonstrated to still be urgent. The applicable management procedures and monitoring processes provided for assessment of service life characteristics of high-temperature elements of equipment are analyzed. The shortcomings of these approaches are highlighted, and the advantages of monitoring and predictive diagnostics processes for a meaningful assessment of the technical condition and control of the service life characteristics of critical units and elements of power equipment operating under creep conditions are substantiated. The object of examination is a once-through supercritical boiler. Outlet headers of the high-pressure convective superheater, steam collection chambers, and crossover pipelines between these headers and chambers are adopted as critical elements of this boiler. The design and construction materials of these elements, the scheme of the steam flow in these sections of the flowpath, and the diagram of the monitoring of the operating conditions in them have been studied. The methodological concepts are outlined of the developed monitoring system, including provisions for the procedure for recording and systematization of the readings of standard temperature and pressure transducers, approaches to calculation of characteristics from these data, which are necessary to assess the residual service life of elements. The algorithm of the system is prescribed in the form of a step-by-step execution of calculation procedures during monitoring within the scope of the proposed physical model of the metal service life's expiry, which is based on regular relationships between the steam conditions and the operating time as well as on the properties of the metal. The stage of service life expiry is assessed by the principle of linear summation of accumulated damages. The specific is presented of the description in this algorithm of initially accumulated metal damages when a monitoring system is implemented in already operating equipment. Information is presented on a numerical check of the developed algorithm, including against actual data on the performance of the implemented monitoring system. Proposals are formulated on the procedure for assessing the condition of the metal within the scope of predictive diagnostics, carried out on the basis of the operating system.

Keywords: monitoring, boiler, high-temperature elements, creep, monitoring transducers, equivalent parameters, equivalent operating time, service life, algorithm, damageability, metal condition