

*На правах рукописи*



СКУЛКИН Сергей Валерьевич

**ОПЕРАТИВНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС  
НА ОСНОВЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Специальность: 05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена на кафедре промышленной теплоэнергетики в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководители –

д.т.н., профессор

д.т.н., доцент

Боровков Валерий Михайлович

Сергеев Виталий Владимирович

Официальные оппоненты:

– *Казачков Владимир Григорьевич* – д.т.н., с.н.с., ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров», профессор;

– *Трифонов Николай Николаевич* – к.т.н., с.н.с., ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», зав. лабораторией.

Ведущая организация – *ОАО «Территориальная генерирующая компания № 1» (Санкт-Петербург).*

Защита состоится «29» мая 2012 г. в 18<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, в аудитории 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 552-89-45

E-mail: [kg1210@mail.ru](mailto:kg1210@mail.ru)

Автореферат разослан 27 апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Григорьев К. А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** В настоящее время планирование ремонтов энергетического оборудования осуществляется на основе ремонтного цикла, определяемого назначенным межремонтным ресурсом энергоблока.

Планирование ремонтов без учета технического состояния энергетического оборудования приводит к учащению отказов устаревшего оборудования и к высоким среднегодовым затратам на ремонт современного, высококачественного оборудования.

Поиск компромиссных решений между потребностью в сокращении среднегодовых ремонтных затрат и обеспечением надежности эксплуатируемого оборудования делает актуальными разработку и применение методов оперативного диагностирования оборудования.

Состояние энергетического оборудования электрической станции в процессе эксплуатации может оцениваться по множеству факторов: механическому (вибрационному), тепловому, электрическому и другим факторам, имеющим различную физико-химическую природу. Общая оценка состояния оборудования при этом затруднительна по причине необходимости сопоставления показателей различной природы и из-за отсутствия между этими показателями какой-либо корреляционной зависимости. Для полной комплексной оценки технического состояния энергетического оборудования энергоблока требуется применение целого комплекса технических средств и методов диагностирования, учитывающих различные показатели энергетического оборудования. Установка комплекса технических средств и содержание квалифицированных специалистов для их обслуживания крайне затратно, вследствие чего старые энергоблоки ими не оснащаются.

В этих условиях становится актуальной разработка простого и универсального метода технического диагностирования энергетического оборудования, использующего показания штатных контрольно-измерительных приборов.

**Целью диссертационной работы** является разработка и обоснование метода оценки технического состояния основного энергетического оборудования по изменениям технико-экономических параметров.

### *Задачи:*

- Выбор метода и критерия оценки изменения технико-экономических характеристик;
- Проведение натурных испытаний на действующем энергоблоке ТЭС для подтверждения правомерности положений разработанной методики;
- Разработка рекомендаций по накоплению и интерпретации экспериментальных данных;
- Разработка рекомендаций по применению результатов оперативного диагностирования при планировании ремонтов энергетического оборудования.

### **Научная новизна работы** заключается в следующем:

- Обосновано несовершенство действующей системы планово-предупредительных ремонтов в современных технических и экономических условиях;
- Уточнены положения энтропийного метода термодинамического анализа для повышения точности определения потенциала экономии топлива в результате ремонта;
- Определен минимально требуемый набор исходных данных для оперативного диагностирования оборудования паротурбинного и парогазового энергоблоков;
- Разработана методика технико-экономического обоснования ремонта дефектного оборудования на основе субъективных удельных перерасходов топлива;
- Предложен простой вариант расширения области применения пропорционального метода ОРГРЭС на ПГУ ТЭЦ.

### **Практическая значимость работы:**

- Метод технического диагностирования энергетического оборудования по изменениям технико-экономических показателей универсален для всех видов энергетического оборудования, для которых возможно достоверное составление эксергетического баланса;
- Разделение удельного перерасхода топлива на номинальный, объективный и субъективный позволяет выделять из расчетного

значения перерасхода величину, связанную с ухудшением технического состояния оборудования;

- Методика технико-экономического обоснования позволяет рассчитывать сроки окупаемости капиталовложений в ремонт и реконструкцию дефектного энергетического оборудования;
- Адаптированный метод ОРГРЭС позволяет находить показатели удельного расхода топлива на ПГУ и ГТУ ТЭЦ на основе того же подхода, что и на паротурбинных ТЭЦ, что повышает достоверность его результатов.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Применение в качестве интегральной оценки технического состояния оборудования ТЭС календарного срока эксплуатации и наработанного ресурса не оправдано техническими и экономическими предпосылками;
- Оптимальная стратегия организации диагностирования оборудования сочетает в себе оперативную (выявление признаков наличия дефектов) и ремонтную (уточнение характера и степени развития дефектов) диагностику с накоплением информации о влиянии дефектов на оценочный критерий;
- Субъективный удельный перерасход топлива является критерием наличия дефектов оборудования;
- Положения энтропийного метода термодинамического анализа не позволяют объективно оценить потенциал экономии топлива в результате ремонта; положения доработаны для ремонтных условий;
- Применение субъективного удельного перерасхода топлива удобно для технико-экономического обоснования ремонта дефектного оборудования.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** обеспечиваются:

- Сравнением результатов оперативного диагностирования с данными, полученными в ходе ремонтной диагностики;
- Применением энтропийного метода термодинамического анализа, основанного на II начале термодинамики.
- Сходимостью экспериментальных и теоретических результатов вычисления объективных удельных перерасходов топлива.

**Апробация и реализация результатов работы.** Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях «XXXVII неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2008) и «XXXVIII неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2009), на Международной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (Йошкар-Ола, 2010)

Разработанная методика была применена для оперативного диагностирования технического состояния оборудования паротурбинного энергоблока с турбиной ПТ 80/100–130/13 Йошкар-Олинской ТЭЦ-2; а также для расчета базовых величин удельных перерасходов топлива оборудованием парогазового энергоблока № 1 ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационной работы, обосновании их актуальности, выборе и обосновании критерия для оценки технического состояния оборудования ТЭС, доработке положений энтропийного метода термодинамического анализа, разработке методики технико-экономического обоснования ремонта дефектного оборудования, а также в разработке простого варианта расширения области применения пропорционального метода ОРГРЭС на ПГУ и ГТУ ТЭЦ.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ. Основное научное содержание диссертационной работы отражено в 5 публикациях в научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературных источников, насчитывающего 108 наименований и приложения. Весь материал изложен на 131 странице машинописного текста, содержит 13 рисунков и 23 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель, основные задачи исследования, выносимые на защиту положения, научная новизна, практическая значимость и апробация результатов работы.

**В первой главе** рассмотрены принципы формирования действующей системы технического обслуживания и ремонта тепловых электрических станций. Приведены определения всех видов плановых ремонтов, нормативы продолжительности и периодичности капитальных ремонтов. Обоснована нецелесообразность применения календарного срока эксплуатации или наработанного ресурса в качестве интегральной оценки технического состояния в современных условиях эксплуатации.

Рассмотрены существующие технические средства и методы оперативной диагностики, оценивающие состояние оборудования по множеству критериев: механическому (вибрационному), тепловому, электрическому, электромагнитному. Отмечена техническая сложность и трудоемкость реализации оперативной диагностики имеющимися средствами.

На основании проведенного анализа состояния проблемы сформулирована цель и задачи диссертации.

**Во второй главе** разработана стратегия организации технического диагностирования оборудования.



**Рис. 1. Стратегия организации технического диагностирования оборудования**

На данный момент существуют исследования, посвященные каждому из четырех этапов представленной стратегии диагностирования. При реализации этой стратегии наибольшей неопределенностью характеризуется первый этап.

Большинство существующих технических средств оперативного диагностирования выявляет признаки наличия дефектов, не уточняя их характер и локализацию. Для уточнения характера и локализации дефекта, а также для выяснения требуемого объема ресурсов на выполнение ремонта, требуется проведение ремонтной диагностики.

На этапе выполнения ремонтной диагностики может быть сделан вывод о влиянии дефекта на безопасность эксплуатации и принято решение о проведении срочного ремонта. В случае если характер дефекта не представляет опасности для дальнейшей эксплуатации, решение о потребности в ремонте и сроках его проведения может быть принято по результатам технико-экономического обоснования.

Ввиду отсутствия автоматизированных систем оперативного диагностирования на старых энергоблоках, возросла актуальность поиска альтернативных подходов к оценке технического состояния. Одним из перспективных направлений развития оперативного диагностирования является оценка влияния дефектов энергетического оборудования на показатели, характеризующие его экономичность.

Рассмотрены пять методов оценки экономичности оборудования ТЭС: энергетический (метод тепловых потоков), физический, пропорциональный (метод ОРГРЭС), эксергетический и энтропийный.

Энергетический метод основан на анализе энергетического баланса, что позволяет оценивать только часть потерь, связанных с необратимостью процессов передачи и преобразования энергии. Потери, связанные с изменением качества энергии (с ростом энтропии) в адиабатном процессе, не влияют на энергетический баланс.

Физический метод и пропорциональный метод ОРГРЭС служат для определения показателей экономичности энергоблока в целом. Зачастую изменения экономичности, возникающие вследствие развития какого-либо дефекта, оказывают ничтожно малое влияние на экономичность работы всей установки в целом.

Эксергетический и энтропийный методы основаны на понятии эксергии – величины, определяющей количество работы, которое может



быть получено внешним приемником энергии при обратимом их взаимодействии с окружающей средой до установления полного равновесия. Эксергетический баланс учитывает любые изменения качества энергии

Применение методов, основанных на анализе эксергетического баланса, оправдано тем, что в теплосиловых установках происходит преобразование качественно различных форм энергии: организованных (эквивалентных работе), и неорганизованных (характеризуемых энтропией). При решении задач в области энергетических превращений, где участвуют формы энергии второго вида, необходимо учитывать ограничения, накладываемые не только первым, но и вторым началом термодинамики.

Наиболее подходящим показателем для выявления признаков дефектов является один из показателей энтропийного метода – удельный перерасход топлива, предложенный Гохштейном Д. П.:

$$b_{II} = b - b_{II} = \frac{1}{E(1-\Omega)} - \frac{1}{E} = \frac{1}{E} \cdot \frac{\Omega}{1-\Omega} = \frac{1}{E} \cdot \frac{\Omega}{h_c},$$

где  $b$  - удельный расход топлива,  $г\ у.т./МДж$ ;

$b_{II}$  - идеальный удельный расход топлива,  $г\ у.т./МДж$ ;

$E$  - эксергетическая ценность топлива,  $МДж/кг\ у.т.$ ;

$\Omega$  - коэффициент эксергетических потерь,

но применение в его данном виде нецелесообразно, поскольку его значение меняется под влиянием как объективных, так и субъективных факторов.

Удельный перерасход топлива в тепловой схеме ТЭС представляет собой сумму удельных перерасходов топлива во всех ее элементах:

$$b_{II} = b_{II0} + b_{II1} + b_{II2} + \mathbf{K} + b_{IIi} + \dots + b_{II_n} = 34,1 \frac{0}{1-\Omega}, \text{ } г\ у.т./МДж,$$

где  $i$  - порядковый номер элемента;

$n$  - количество элементов,

что позволяет распределить перерасходы по местам их возникновения.

Тем не менее, такое распределение не позволяет судить о потенциале экономии топлива в каждом из элементов, так как изменение коэффициента термодинамического совершенства в каком-либо элементе влечет за собой изменение расхода эксергии в ряде других элементов, а

следовательно, и изменение потерь эксергии в них. Выражение для распределения удельных расходов топлива в диссертации применяется в исходном виде, а расчет полного потенциала экономии топлива ведется в технико-экономическом обосновании.

Величина перерасхода топлива в каждом из элементов была представлена Гохштейном Д. П. и Верхивкером Г. П. в виде суммы номинальных, объективных и субъективных потерь:

$$h_c = 1 - (\sum \Omega_{НОМ} + \sum \Omega_{ОБ} + \sum \Omega_{СУБ}),$$

где  $\sum \Omega_{НОМ}$  – сумма абсолютных коэффициентов номинальных эксергетических потерь в отдельных агрегатах станции;

$\sum \Omega_{ОБ}$  – сумма абсолютных коэффициентов отклонений эксергетических потерь по объективным причинам;

$\sum \Omega_{СУБ}$  – сумма абсолютных коэффициентов эксергетических потерь по субъективным причинам и по вине персонала.

Данное выражение сложно применить к анализу отдельных элементов тепловой схемы, так как объективный перерасход топлива вызывается изменением объективных условий подвода и отвода эксергии, и может не сопровождаться ростом коэффициента эксергетических потерь для отдельных элементов.

Поэтому в диссертации предложено вести разбивку эксергетических потерь на номинальные, объективные и субъективные при помощи удельных перерасходов топлива  $b_{\Pi}^{НОМ}$ ,  $b_{\Pi}^{ОБ}$  и  $b_{\Pi}^{СУБ}$ .

Величина перерасхода топлива в каждом элементе в общем случае является суммой номинальных, объективных и субъективных потерь:

$$b_{\Pi} = b_{\Pi}^{НОМ} + b_{\Pi}^{ОБ} + b_{\Pi}^{СУБ}.$$

Номинальный удельный перерасход топлива обусловлен технологией производства тепловой и электрической энергии, примененной на данной конкретной ТЭС. Объективный удельный перерасход топлива связан с несоответствием фактических условий проведения испытаний условиям гарантийных испытаний: изменение температуры окружающей среды, марки топлива, коэффициента мощности  $\cos \varphi$ . В общем случае объективный удельный перерасход вызван изменением условий подвода и отвода эксергии. Субъективный удельный перерасход топлива возникает по причине износа оборудования и возникновения дефектов, снижающих экономичность его работы.

Повышение субъективного удельного перерасхода в процессе эксплуатации является признаком развития дефектов в оборудовании.

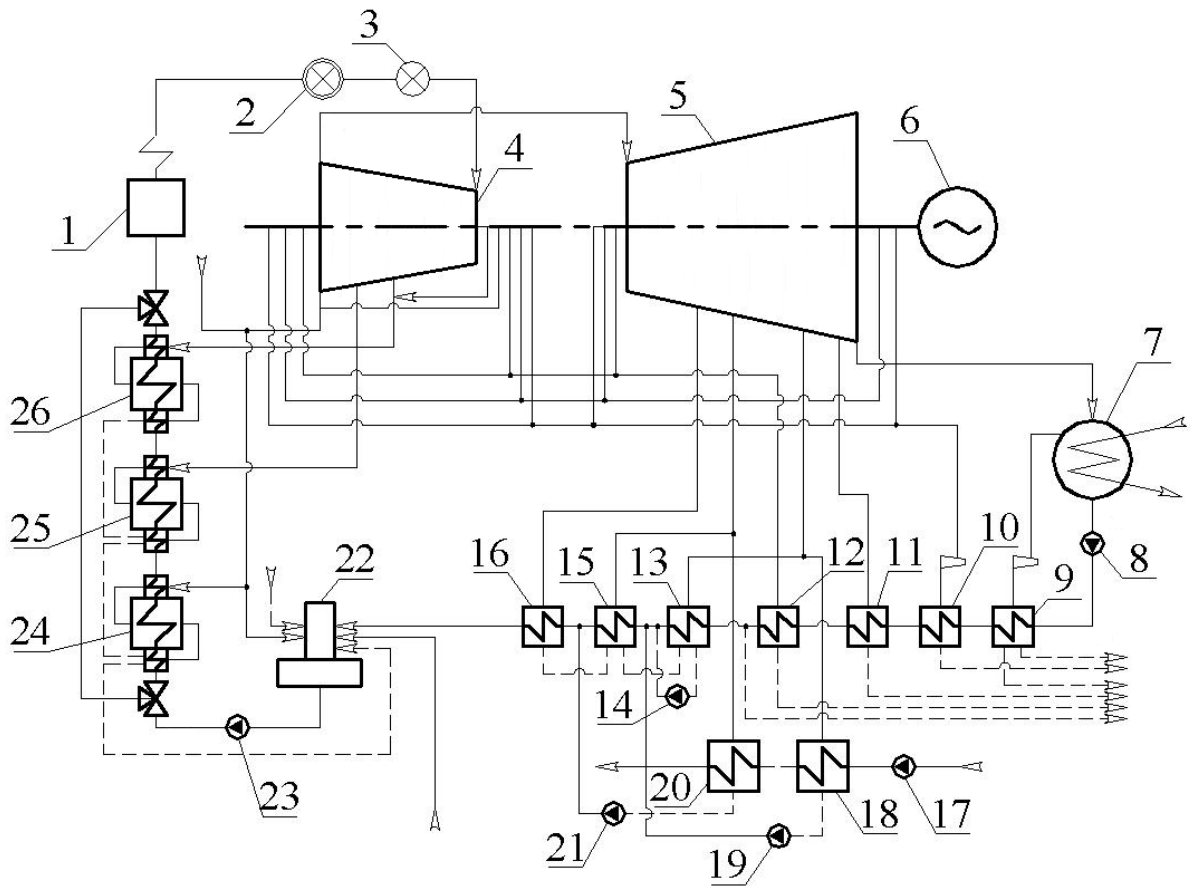
**В третьей главе** выполнено оперативное диагностирование технического состояния энергоблока с турбиной ПТ 80/100–13/130 Йошкар-Олинской ТЭЦ-2 и произведен расчет величины номинальных перерасходов топлива в энергоблоке ПГУ-450Т №1 Северо-Западной ТЭЦ.

Дано описание тепловой схемы энергоблока с турбиной ПТ 80/100–13/130, рассмотрены наиболее характерные дефекты, ранее встречавшиеся в эксплуатации данного конкретного энергоблока. Выполнен сбор исходных данных по расходам и физическим параметрам рабочего тела в контрольных точках. Выполнен расчет субъективных удельных перерасходов топлива в оборудовании энергоблока. На основании полученных результатов сделан вывод о наличии признаков дефектов в паровой турбине, системах регенеративного и теплофикационного подогрева.

Результаты оперативного диагностирования сопоставлены с итогами последующей ремонтной диагностики. В ходе ремонтной диагностики ремонтным персоналом ТЭЦ зафиксированы следующие дефекты энергетического оборудования:

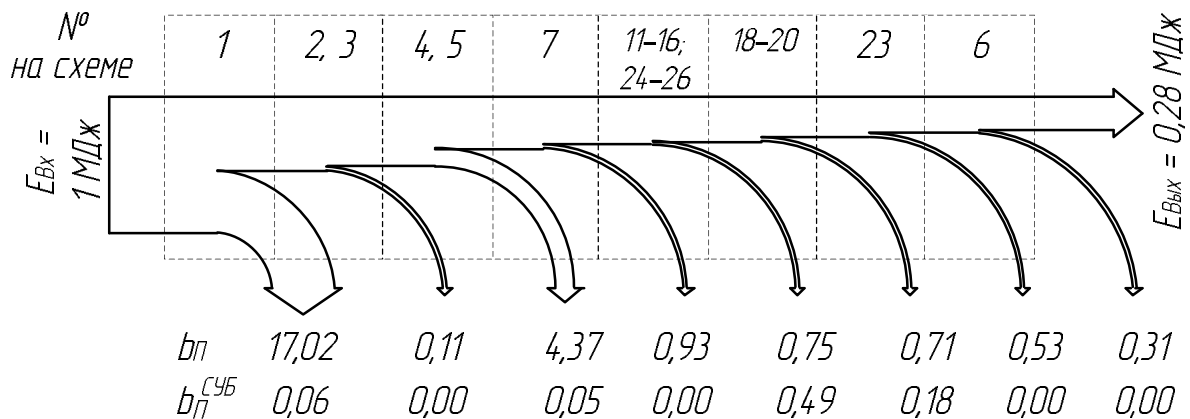
- незначительные (до 1 мм) отложения солей кальция и магния в образцах труб парового котла (поз. 1);
- увеличение диаметра паропровода перегретого пара на 0,3 %
- незначительный (до 1 мм) солевой занос рабочих и сопловых лопаток всех ступеней ЦНД (поз. 5), 14–16 ступеней ЦВД (поз. 4) и регулирующих ступеней ЦНД;
- незначительная эрозия рабочих и сопловых лопаток ЦНД;
- отложения сложного состава в ПНД (поз. 11, 13–15), ПВД (поз. 24–26) до 2 мм,
- течь ПНД (поз. 11);
- различные дефекты подшипниковых опор;
- загрязнение крыльчатки и улитки дымососа;
- различные дефекты насосов.

Ремонтная диагностика подтвердила наличие дефектов в паровой турбине и в системах регенеративного и теплофикационного подогрева. Остальные дефекты не вызвали заметных изменений удельных перерасходов топлива.



**Рис. 2. Тепловая схема энергоблока с турбиной ПТ 80/100 - 130/13**

1 – барабанный котёл ТПЕ-430А; 2 – стопорный клапан; 3 – регулирующие клапаны; 4 – цилиндр высокого давления; 5 – цилиндр низкого давления; 6 – генератор переменного тока ТВФ-110-2ЕУЗ; 7 – конденсатор; 8 – конденсатный насос; 9 – холодильник эжектора; 10 – холодильник эжектора уплотнений; 11, 13, 15, 16 – подогреватели низкого давления; 12 – охладитель пара уплотнений с эжектором; 14 – сливной насос; 17 – сетевой насос; 18 – сетевой горизонтальный подогреватель нижнего отбора; 19, 21 – конденсатные насосы теплофикационной установки; 20 – сетевой горизонтальный подогреватель верхнего отбора; 22 – деаэратор; 23 – питательный электронасос; 24, 25, 26 – подогреватели высокого давления.



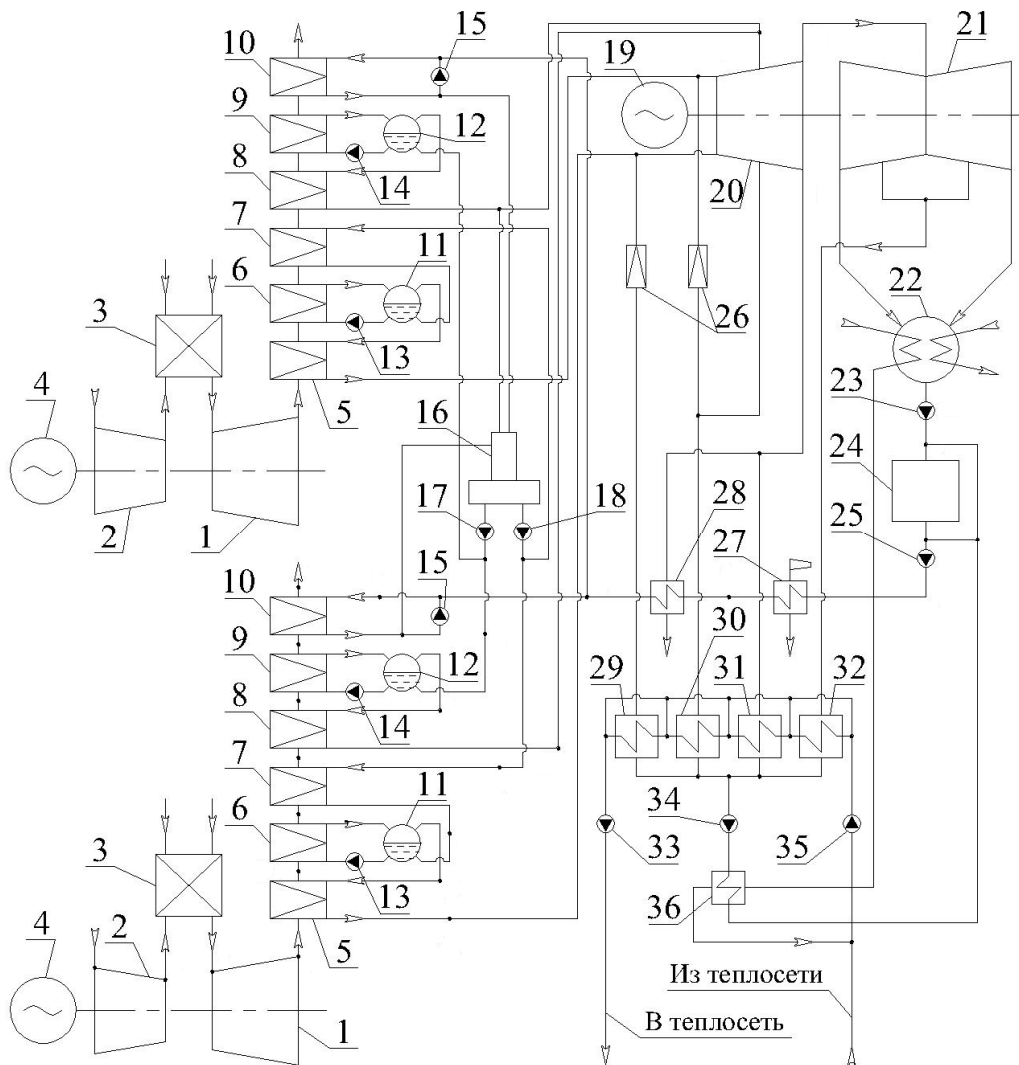
**Рис. 3. Диаграмма распределения удельных перерасходов топлива в элементах тепловой схемы энергоблока с турбиной ПТ 80/100**

Признаки дефектов насосов не были выявлены, так как в момент снятия показаний штатных контрольно-измерительных приборов функционировали другие насосы, установленные параллельно дефектным.

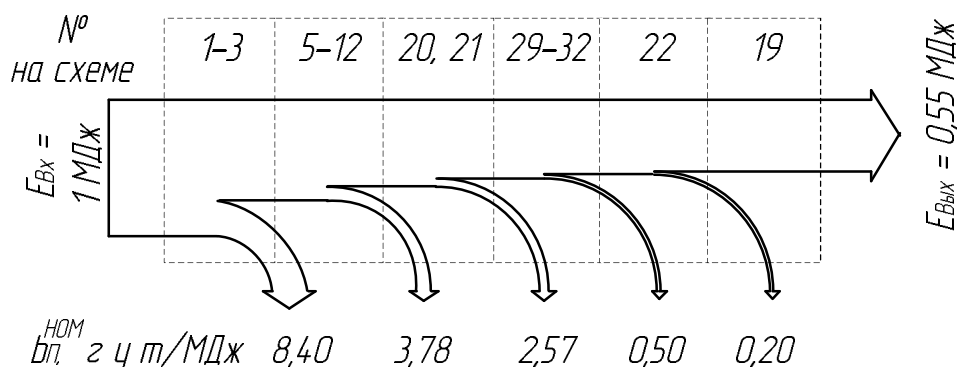
Признаки дефектов котла и тягодутьевого оборудования не были зафиксированы по причине несоответствия проектных показателей экономичности котла реальным значениям. Расчет номинальных перерасходов по экспериментальным данным, полученным на котлоагрегате после капитального ремонта, изменил точку отсчета и позволил корректно рассчитать субъективный удельный перерасход.

В связи с полученными результатами сформулированы дополнительные требования к разработанному методу технического диагностирования: необходимо по очереди задействовать все оборудование энергоблока, стоящее в резерве, а также производить расчет номинальных удельных перерасходов топлива не по проектным данным, а по экспериментальным данным, полученным непосредственно после ввода оборудования в эксплуатацию после производства капитального ремонта.

С учетом всех требований был выполнен расчет величин номинальных удельных перерасходов топлива в энергоблоке ПГУ-450Т №1 Северо-Западной ТЭЦ. Результаты расчета могут быть применены в качестве базовых характеристик при ведении оперативной диагностики оборудования энергоблока ПГУ-450Т № 1 Северо-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга разработанным методом.



**Рис. 4. Тепловая схема энергоблока № 1 ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ**  
 1 – газовая турбина Siemens V 94.2; 2 – компрессор ГТУ; 3 – камера сгорания ГТУ; 4 – турбогенератор ТЗФГ-160-2МУЗ; 5 – пароперегреватель высокого давления; 6 – испаритель высокого давления; 7 – экономайзер высокого давления; 8 – пароперегреватель низкого давления; 9 – испаритель низкого давления; 10 – газовый подогреватель конденсата; 11 – барабан высокого давления; 12 – барабан низкого давления; 13 – насосы принудительной циркуляции высокого давления; 14 – насосы принудительной циркуляции низкого давления; 15 – насосы рециркуляции конденсата; 16 – деаэратор; 17 – питательные насосы низкого давления; 18 – питательные насосы высокого давления; 19 – турбогенератор ТФГ(П)-160-2УЗ; 20 – цилиндр высокого давления паровой турбины Т-150-7,7; 21 – цилиндр низкого давления; 22 – конденсатор; 23, 25 – конденсатные насосы; 24 – блочная обессоливающая установка; 26 – БРОУ; 27 – конденсатор пара уплотнений; 28 – подогреватель низкого давления; 29; 30; 31; 32 – сетевые подогреватели; 33, 35 – сетевые насосы; 34 – насос конденсата бойлеров; 35 – сетевые насосы конденсата бойлеров; 36 – охладитель конденсата бойлеров.



**Рис. 5. Диаграмма удельных перерасходов топлива ПГУ-450Т**

**В четвертой главе** разработана методика технико-экономического обоснования устранения дефектов оборудования, не снижающих безопасность эксплуатации, а также разработан вариант адаптации пропорционального метода ОРГРЭС ко всем типам ТЭЦ.

Ремонт энергетического оборудования выполняется с целью восстановления его технико-экономических показателей до значений, близких к проектным. Величина субъективного удельного перерасхода топлива численно характеризует потенциал экономии топлива, который может быть реализован в результате улучшения характеристик оборудования до их проектных значений. Замена или ремонт оборудования сопряжены с финансовыми затратами, но ведут к сокращению расхода топлива.

Алгоритм расчета срока окупаемости следующий:

- суммируется чистая прибыль по годам (месяцам) расчетного периода до тех пор, пока эта сумма не сравняется с суммой инвестиционных расходов;
- минимальное значение номера года (месяца), в течение которого получают положительное значение разности дисконтированной чистой прибыли и дисконтированной величины инвестиций, при выбранной норме дисконта является сроком окупаемости  $T_{ок}$ :

$$ЧДП_r^t = \sum_{t=0}^{T_{ок}} \left[ b_{II}^{j.суб.} + b_{II}^{j.суб.} \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^{j-1} \Omega_i \right) \right] \cdot C_{топл.} \cdot E_{ТЭЦ}^t \cdot (1 - e)^{-t} = 0,$$

где  $T_{ок}$  – искомая величина срока окупаемости;  $ЧДП_r$  – чистая дисконтированная прибыль;  $C_{топл.}$  – средняя прогнозируемая цена топлива

на период времени  $t$ ;  $e$  – норма дисконтирования;  $j$  – порядковый номер элемента в цепи энергетических превращений.

Применительно к капитальному ремонту  $T_{OK}$  будет равен периоду возмещения вложений средств за счет ликвидации субъективного удельного перерасхода топлива. В случаях, когда срок окупаемости значительно меньше остаточного срока службы ремонтируемого оборудования, его ремонт экономически оправдан.

Расширение области применения метода ОРГРЭС выполнено с сохранением его оригинального принципа разделения расходов топлива.

Недостатком действующего метода ОРГРЭС является его применимость только к паротурбинным ТЭЦ. Наличие второго рабочего тела (дымовых газов) методом не предусмотрено. Для его адаптации к ПГУ ТЭЦ достаточно учесть процессы, в которых выработка электроэнергии происходит за счет преобразования тепловой энергии дымовых газов, и процесс дожигания. Формулу для коэффициента ценности теплоты с учетом присутствия в теплосиловой установке двух рабочих тел, можно представить в общем виде:

$$x_i = \frac{h_0^\Gamma + \Delta h_{дож}^\Gamma - h_{КУ}^\Gamma}{h_0^\Gamma + \Delta h_{дож}^\Gamma - h_{ух}^\Gamma} \cdot \frac{h_{омб.i} + \Delta h_{nn} - h_{2k}}{h_0 + \Delta h_{nn} - h_{2k}} \cdot \left( 1 + K \cdot \frac{h_0 + \Delta h_{nn} - h_{омб.i}}{h_0 + \Delta h_{nn} - h_{2k}} \right)$$

где  $h_0^\Gamma$  – энтальпия дымовых газов на входе в газовую турбину или газопоршневой агрегат;  $\Delta h_{дож}^\Gamma$  – прирост энтальпии дымовых газов в результате дожигания;  $h_{КУ}^\Gamma$  – энтальпия дымовых газов перед котлом-утилизатором;  $h_{ух}^\Gamma$  – энтальпия уходящих дымовых газов.

Также дополнена формула расхода тепла на производство электрической энергии:

$$Q_9^o = D_\Gamma \cdot (h'_\Gamma - h''_\Gamma) \cdot h_0 D_0 \cdot h_0 + D_{ПП} \cdot (h'_{ЦСД} - h''_{ЦВД}) + \\ + G_{ВПР} \cdot (h'_{ЦСД} - h''_{ВПР}) - G_{ПВ} \cdot h'_{ПВ} - Q_T + Q_{ПР}$$

где  $D_\Gamma \cdot (h'_\Gamma - h''_\Gamma)$  – снижение количества теплоты дымовых газов при совершении работы в газовой турбине или газопоршневом агрегате.

Все остальные обозначения соответствуют принятым в РД 34.08.552-95. Другие формулы метода ОРГРЭС применяются без изменений.



Адаптированный метод был применен для расчета удельных расходов топлива на выработку тепловой и электрической энергии Северо-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга.

**В заключении** сформулированы выводы по результатам работы:

1. Обосновано несовершенство действующей системы ППР современным условиям функционирования объектов энергетики;
2. Выполнен обзор существующих методов и средств ведения оперативной диагностики технического состояния энергетического оборудования;
3. Уточнены положения энтропийного метода термодинамического анализа для повышения точности определения потенциала экономии топлива в результате ремонта и разработана методика технико-экономического обоснования ремонтных работ для расчета дисконтированного срока окупаемости ремонтных работ, а также для расчета чистой прибыли за любой срок;
4. Выполнена оперативная диагностика паротурбинного энергоблока № 1 Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, результаты сопоставлены с данными последующей ремонтной диагностики;
5. Выполнен расчет номинальных удельных перерасходов топлива энергоблоком № 1 Северо-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга.
6. Даны рекомендации по накоплению и интерпретации результатов оперативной диагностики технического состояния оборудования.
7. Разработан простой вариант расширения области применения действующего пропорционального метода ОРГРЭС на ПГУ ТЭЦ.
8. Результаты работы внедрены в ОАО «Территориальная генерирующая компания № 1» и в филиале «Северо-Западная ТЭЦ» ОАО «ИНТЕР РАО ЕЭС».

**Основное содержание диссертации отражено в публикациях, вышедших в изданиях из перечня ВАК:**

1. Боровков, В.М. Применение энтропийного и эксергетического методов для выявления мест локализации субъективных эксергетических потерь / В.М. Боровков, С.В. Скулкин // Надежность и безопасность энергетики. 2010. № 3. С. 27–30.

2. Боровков, В.М. Вариант адаптации метода ОРГРЭС к разделению расхода топлива на парогазовых ТЭЦ (на примере Северо-Западной ТЭЦ) / В.М. Боровков, С.В. Скулкин // Промышленная энергетика. 2010. № 9. С. 42–45.

3. Боровков, В.М. Анализ влияния пропорционального метода ОРГРЭС на развитие отечественной теплоэнергетики и вариант его модернизации / В.М. Боровков, С.В. Скулкин // Труды Академэнерго. 2010. № 3. С. 38–44.

4. Боровков, В.М. Эксергетический анализ тепловой схемы индивидуального теплового пункта на стадии проектирования / В.М. Боровков, С.В. Скулкин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 3. С. 61–66.

5. Сергеев, В.В. Оценка целесообразности устранения дефектов энергетического оборудования, не влияющих на надежность и безопасность эксплуатации / В.В. Сергеев, С.В. Скулкин // Надежность и безопасность энергетики. 2012. № 1. С. 10–12.

#### **Материалы научных конференций:**

6. Скулкин, С. В. Метод учета показателей ОРГРЭС и второй закон термодинамики / С.В. Скулкин // XXXVII неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов.– 2009. С. 112–114.

7. Скулкин, С. В. Сравнение результативности энтропийного и эксергетического методов термодинамического анализа / С.В. Скулкин // XXXVIII неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – 2010. С. 106–108.

8. Скулкин, С. В. Анализ удельных расходов топлива парогазовой ТЭЦ с применением элементов метода ОРГРЭС / С.В. Скулкин // Научному прогрессу – творчество молодых: Сборник материалов международной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Ч.2. Йошкар-Ола: Марийский гос. технич. ун-т, 2010. С. 179–181.