

На правах рукописи



КУЗЬМИН АНТОН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ РЕГЕНЕРАЦИИ
ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН
ДЛЯ ПОДОГРЕВА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ТЭЦ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2013

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шарапов Владимир Иванович

Официальные оппоненты: **Аронсон Константин Эрленович**
доктор технических наук, ФГБОУ ВПО «Уральский федеральный университет», главный научный сотрудник кафедры «Тепловые электрические станции», профессор кафедры «Турбины и двигатели»
Филимонов Артем Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент, руководитель группы перспективного развития ОАО «Генерирующая компания»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», г. Москва

Защита состоится «___» декабря 2013 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 при ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, зал заседаний Диссертационного совета (Д-225).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет».

Автореферат разослан «___» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.082.02
кандидат химических наук, профессор



Э.Р. Зверева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экономичность многих отечественных теплоэлектроцентралей в последние годы значительно снизилась, что обусловлено, прежде всего, существенным сокращением выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Однако анализ показывает, что в настоящее время имеются значительные резервы повышения энергетической эффективности отечественных ТЭЦ, связанные с обеспечением внутростанционных тепловых нагрузок. Существенная доля этих нагрузок приходится на водоподготовительные установки (ВПУ), восполняющие как потери пара и конденсата из цикла станции, так и сетевой воды из трубопроводов теплосети. Основным фактором, понижающим экономичность ВПУ и энергоустановки в целом, является практически повсеместное использование в схемах подогрева подпиточной и добавочной питательной воды в качестве греющей среды высокопотенциальных отборов пара турбин, применение которых существенно снижает долю выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

В диссертационной работе обобщены выполненные автором разработки по использованию систем регенерации теплофикационных паровых турбин для подогрева низкопотенциальных теплоносителей ВПУ.

Актуальность данной работы подтверждается тем, что она соответствует одному из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ (утв. Президентом РФ 21.05.2006 г., Пр–843): пункт 08 – энергетика и энергосбережение, а тематика работы соответствует двум пунктам критических технологий РФ (утв. Президентом РФ 21.05.2006 г., Пр–842): пункт 19 – технологии производства топлив и энергии из органического сырья; пункт 31 – технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии. Кроме того, направление работы определено в соответствии с распоряжением Правительства РФ «Об энергетической стратегии России на период до 2030 года» от 13.11.2009 г. № 1715 – р.

Объекты исследования – система регенерации теплофикационных паровых турбин ТЭЦ и технологии подогрева подпиточной воды теплосети и добавочной питательной воды котлоагрегатов ТЭЦ.

Целью настоящей работы является совершенствование схем подогрева подпиточной и добавочной питательной воды на ТЭЦ за счет использования систем регенерации теплофикационных паровых турбин.

Для достижения поставленной цели **в диссертации решены следующие задачи:**

- проведен анализ традиционных способов использования отборов пара турбин ТЭЦ для покрытия тепловых нагрузок водоподготовительных установок;

- разработаны технологии повышения эффективности систем регенерации паротурбинных установок ТЭЦ, за счет использования теплоты основного конденсата паровых турбин;

- экспериментально доказана промышленная применимость разработанных технологий, связанных с использованием теплоты основного конденсата паровых турбин типа Т-100-130 и ПТ-80-130/13 на Ульяновской ТЭЦ-1;

- проанализирована энергетическая эффективность структурных и режимных изменений в схемах регенерации паровых турбин ТЭЦ при реализации разработанных решений;

- выполнен технико-экономический анализ разработанных решений по использованию систем регенерации теплофикационных паровых турбин для подогрева низкопотенциальных теплоносителей ТЭЦ.

Основные методы научных исследований. В работе использованы метод пассивного эксперимента, статические методы корреляционного и регрессионного анализа результатов эксперимента, методы вычислительной математики, методы технико-экономического расчета в энергетике, эвристические методы поиска новых технических решений. Для расчетов и построения графических зависимостей использовался пакет прикладных программ Microsoft Excel и STATISTICA.

Научная новизна работы заключается в следующих основных положениях:

1. Создана серия научно обоснованных высокоэкономичных технических решений по совершенствованию схем подогрева подпиточной и добавочной питательной воды на ТЭЦ путем использования систем регенерации теплофикационных паровых турбин.

2. Экспериментально подтверждена возможность промышленной применимости разработанных технологий подогрева исходной воды перед водоподготовительной установкой или обессоленной воды перед вакуумным деаэратором с использованием низкопотенциальной теплоты основного конденсата турбин на ТЭЦ. Получены регрессионные уравнения для различных режимов работы турбин, обладающие высокой достоверностью, для дальнейшего использования их в практических расчетах и оценки степени нагрева основного конденсата паротурбинных установок в ПНД. С помощью многофакторного прогнозирования получены функциональные зависимости прогнозируемого параметра от нескольких независимых переменных, т.е. установлены корреляционные связи между режимными характеристиками работы турбоустановок (расход свежего пара на турбину, расход пара в теплофикационные отборы и расход пара в производственные отборы (для турбины типа ПТ)) и температурой основного конденсата.

3. Выполнен анализ энергетической эффективности разработанных решений по использованию систем регенерации теплофикационных паровых турбин для подогрева низкопотенциальных теплоносителей ТЭЦ путем оценки величины удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Новизна созданных решений подтверждена 22-я патентами Российской Федерации на изобретения.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов работы обусловлена применением современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, проведением эксперимента в реальных промышленных условиях, применением действующих нормативных методик оценки экономической и энергетической эффективности, патентной чистотой разработанных решений.

Практическая ценность работы заключается в том, что результаты выполненной работы дают возможность решать практические задачи, связанные с разработкой и внедрением энергоэффективных технологий покрытия тепловых нагрузок водоподготовительных установок ТЭЦ. Разработанные научно-технические решения позволяют повысить эффективность систем регенерации теплофикационных паровых турбин, что обеспечит увеличение выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Результаты работы приняты к внедрению на Ульяновской ТЭЦ-1. Результаты работы могут использоваться эксплуатационными и проектными организациями при выборе способа покрытия тепловых нагрузок водоподготовительных установок ТЭЦ и при разработке тепловых схем, которые повышают экономичность тепловой электростанции.

Личный вклад автора в получении результатов, изложенных в диссертационной работе, заключается: в разработке технических решений; в непосредственном участии в формировании концепции работы; в разработке методик исследований, организации этих исследований и участии в них; в проведении расчетов, анализе и обобщении полученных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Научно обоснованные технические решения по использованию систем регенерации турбин для подогрева низкопотенциальных теплоносителей ТЭЦ.

2. Результаты экспериментального исследования промышленной применимости разработанных технологий с использованием теплоты основного конденсата теплофикационных паровых турбин типа Т-100-130 и ПТ-80-130/13, обосновывающие целесообразность применения этого источника низкопотенциальной теплоты практически во всем диапазоне изменения электрической и тепловой нагрузок турбоагрегата.

3. Результаты проведенного анализа энергетической эффективности структурных и режимных изменений в схемах регенерации турбин ТЭЦ, которые доказывают высокую эффективность применения разработанных технологий.

4. Результаты технико-экономической оценки, обосновывающие инвестиционную привлекательность разработанных технологий использования теплоты основного конденсата теплофикационных паровых турбин для нагрева низкопотенциальных теплоносителей ТЭЦ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на: Молодежном инновационном форуме Приволжского федерального округа (УлГТУ, 2010); VII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В. Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН (Академэнерго), 2010); IV Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» (Москва, МГСУ, 2011); Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути их решения» (Саратов, СГТУ, 2012); VIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В. Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН (Академэнерго), 2012); XII Всероссийской выставке Научно-технического творчества молодежи (Москва, ВВЦ, 2012); заседаниях постоянно действующего семинара научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ (УлГТУ, 2009–2013 гг.); 45-й, 46-й и 47-й НТК ППС УлГТУ (2011–2013 гг.); Шестой Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, УлГТУ, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 48 печатных работ, в том числе 1 монография, 5 статей в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России, 14 статей в других изданиях, 1 полный текст доклада, тезисы 5 докладов, 22 патента на изобретения Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 146 наименований. Диссертационная работа изложена на 197 страницах машинописного текста, содержит 70 иллюстраций, 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования, защищаемые положения, определена научная новизна и практическая ценность работы, дано описание структуры диссертации.

В первой главе приведены общие сведения о системах регенерации теплофикационных паровых турбин. Рассмотрены основные факторы, влияющие на энергетическую эффективность регенеративного подогрева воды, т. е. на величину вырабатываемой регенеративными отборами пара электроэнергии на тепловом потреблении. Показаны кривые относительного повышения КПД турбоустановки в зависимости от конечной температуры подогрева питательной воды котлов и числа ступеней подогрева (отборов пара из турбины).

Выполнен анализ существующих тепловых схем водоподготовительных установок ТЭЦ, восполняющих потери сетевой воды из трубопроводов теплосети и восполняющих потери пара и конденсата из цикла станции. Анализ показал, что независимо от типа применяемых деаэраторов (атмосферные или вакуумные), а также вида водоподготовительной установки (подготовка добавочной питательной воды котлов или подпиточной воды теплосети) для существующих схем ВПУ ТЭЦ характерны существенные потери энергоэффективности, связанные с нерациональным покрытием тепловых нагрузок этих установок. Основным фактором, понижающим экономичность ВПУ и энергоустановки в целом, является практически повсеместное использование в схемах подогрева подпиточной и добавочной питательной воды высокопотенциальных отборов пара турбин. Показано, что тепловые схемы водоподготовительных установок, применяемые на отечественных ТЭЦ, имеют существенные резервы для совершенствования.

Сформулированы цели и задачи исследования, которые содержатся в приведенной выше общей характеристике работы. Представлена схема решения проблемы.

Вторая глава посвящена разработке технологий эффективного использования регенеративных отборов пара турбин для подогрева низкопотенциальных теплоносителей ТЭЦ.

В результате проведенного в первой главе анализа основных факторов, влияющих на снижение энергетической эффективности системы регенерации и на недостаточную тепловую экономичность ВПУ ТЭЦ, были определены основные направления совершенствования технологий использования регенеративных отборов пара турбин для подогрева потоков подпиточной воды теплосети и добавочной питательной воды котлов.

В результате разработана и запатентована серия научно обоснованных технических решений с использованием потоков основного конденсата

теплофикационных турбин, позволяющих обеспечить нормативное качество обрабатываемой воды и существенно повысить тепловую экономичность водоподготовки и всей электростанции в целом. Значительные резервы тепловой экономичности реализованы благодаря увеличению комбинированной выработки электроэнергии за счет снижения давления и энтальпии греющего пара регенеративных отборов турбин.

Следует отметить, что предложенные технологии использования теплоты основного конденсата турбин разработаны применительно к турбоустановкам с турбинами Т-100-130 и ПТ-80-130/13, однако часть этих решений может быть применима и на других паротурбинных установках.

Так, для ТЭЦ с относительно малыми расходами подпиточной воды теплосети разработана схема подогрева исходной воды перед водоподготовительной установкой и вакуумными деаэраторами (рис. 1, а). Основной особенностью этого решения является включение подогревателя исходной воды (ПИВ) по греющей среде в трубопровод основного конденсата турбины после охладителя пара из уплотнений турбины (ОУ) и охладителя эжекторов (ОЭ) и перед ПНД 1. Исходная вода, проходя через ПИВ, нагревается до температуры 35 - 40 °С, достаточной для эффективной работы водоподготовительной установки и вакуумного деаэлятора. Из деаэлятора подпиточная вода подается в сетевой трубопровод, где смешивается с обратной сетевой водой, возвращающейся от потребителей.

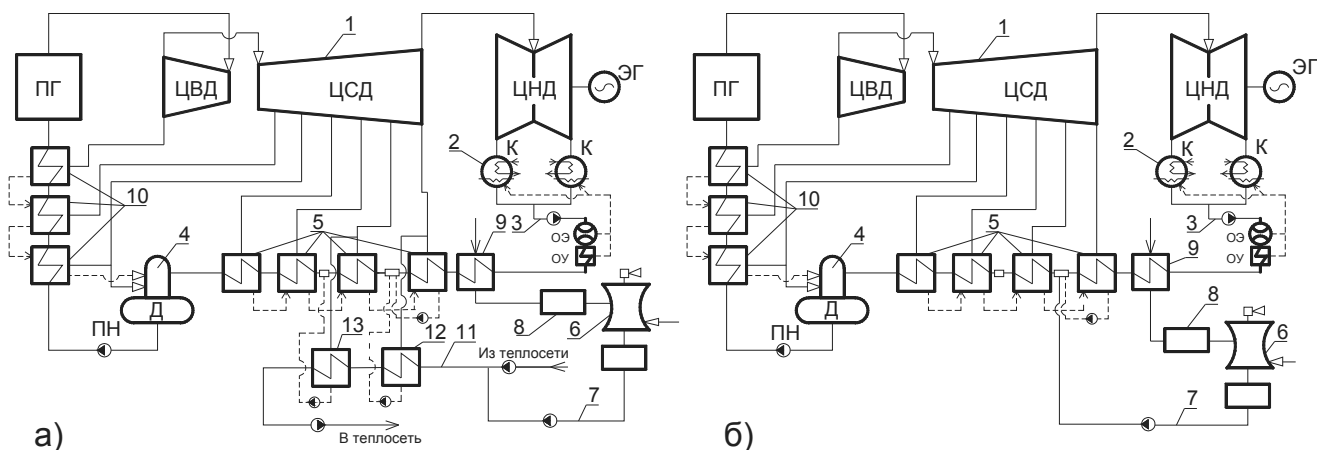


Рис. 1. Схема подогрева основным конденсатом турбоустановки в подогревателе исходной воды (ПИВ): а – исходной подпиточной воды теплосети; б – исходной добавочной питательной воды котлов: 1 – паровая турбина; 2 – конденсатор; 3 – трубопровод основного конденсата; 4 – деаэратор питательной воды (повышенного давления); 5 – подогреватели низкого давления; 6 – вакуумный деаэратор; 7 – трубопровод деаэрированной воды; 8 – водоподготовительная установка; 9 – подогреватель исходной воды; 10 – регенеративные подогреватели высокого давления; 11 – сетевой трубопровод; 12, 13 – нижний и верхний сетевые подогреватели

Снижение температуры основного конденсата, которым подогревается исходная вода, приводит к увеличению расхода и понижению энтальпии пара

регенеративных отборов турбины, которым подогревается этот конденсат, и к соответствующему повышению выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

На рис. 1, б показана схема подогрева добавочной питательной воды котлов. Разработанная технология реализуется следующим образом.

Исходную воду перед подачей в водоподготовительную установку нагревают до технологически необходимой температуры в ПИВ, включенном в трубопровод основного конденсата турбины перед ПНД 1. Деаэрированную добавочную питательную воду подают по трубопроводу, подключенному в трубопровод основного конденсата между ПНД 1 и ПНД 2.

Основным преимуществом новых технологий с использованием низкопотенциального теплоносителя (основного конденсата турбины) является возможность повышения экономичности ТЭЦ за счет несложных изменений в тепловых схемах электростанций, не требующих значительных материальных затрат. Использование этих решений позволяет значительно снизить расход пара высокопотенциального производственного отбора, применяемого на большинстве ТЭЦ в качестве основного источника греющей среды при подготовке подпиточной воды теплосети и добавочной питательной воды котлов. Немаловажным является также то, что экономический эффект достигается без снижения надежности и маневренности турбоустановок.

В третьей главе экспериментально исследована возможность промышленного использования технологий повышения эффективности систем регенерации турбин ТЭЦ.

Для оценки параметров основного конденсата проведено экспериментальное исследование на трех турбоустановках с агрегатами Т-100/120-130-2 ст. № 7, Т-100/120-130-3 ст. № 8 и ПТ-80-130/13 ст. № 9, установленных в филиале ОАО «Волжская ТГК» «Ульяновская ТЭЦ-1». Испытания проводились в течение десяти месяцев - с сентября 2011 по июнь 2012 года. В результате экспериментального исследования были решены следующие задачи:

1. Рассмотрены основные режимы работы паровых турбин Т-100-130 и турбины ПТ-80-130/13 при одноступенчатом и двухступенчатом подогреве сетевой воды.
2. Получены регрессионные уравнения для различных режимов работы турбин.
3. С помощью многофакторного прогнозирования получены функциональные зависимости прогнозируемого параметра от нескольких независимых переменных, т. е. установлены корреляционные связи между режимными характеристиками работы турбоустановок (расход свежего пара на турбину, расход пара в теплофикационные отборы и расход пара в производственные отборы (для турбины типа ПТ)) и температурой основного конденсата.

4. Подтверждена возможность промышленной применимости разработанных технологий с использованием низкопотенциальной теплоты основного конденсата турбин на ТЭЦ практически во всем диапазоне изменения электрической и тепловой нагрузок турбоустановок.

Во избежание возможного недоотпуска тепловой и электрической энергии выбрана пассивная форма проведения эксперимента.

Принципиальная тепловая схема турбины типа Т-100/120-130 с нанесением точек замера температуры основного конденсата представлена на рис. 2.

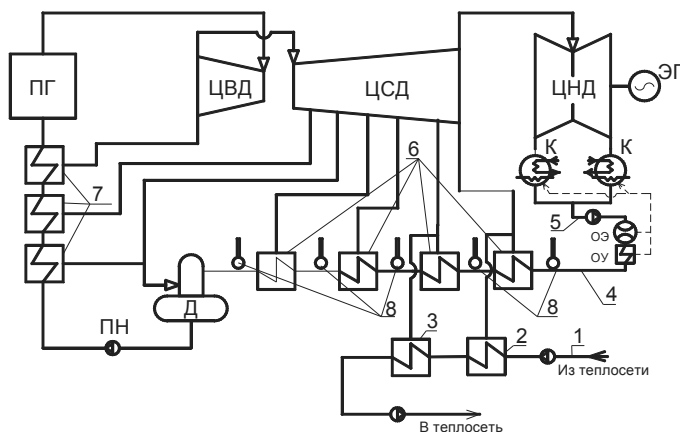


Рис. 2. Схема турбины Т-100/120-130 с нанесением точек замера температуры основного конденсата: 1 – трубопровод сетевой воды; 2 – нижний сетевой подогреватель (НСП); 3 – верхний сетевой подогреватель (ВПС); 4 – трубопровод основного конденсата турбины; 5 – конденсатный насос; 6 – подогреватели низкого давления (ПНД); 7 – подогреватели высокого давления (ПВД); 8 – места установки термометров

По полученным в результате пассивного многофакторного эксперимента данным построены уравнения регрессии, описывающие зависимости температуры основного конденсата после каждой ступени регенеративного подогрева турбин Т-100/120-130-2 ст. № 7, Т-100/120-130-3 ст. № 8 и ПТ-80-130/13 ст. № 9 от количества пара, подаваемого в паротурбинную установки, от расхода пара, идущего в теплофикационные отборы, в конденсатор и в производственные отборы (для турбины типа ПТ), при режимах работы с одно- и двухступенчатым подогревом сетевой воды.

В результате обработки экспериментальных данных, собранных с турбины Т-100/120-130-2 ст. № 7 при одноступенчатом подогреве сетевой воды, получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_1 = 21,8476 + 0,1306 \cdot X_1 - 0,035 \cdot X_2 - 2,4788 \cdot e^{-5} \cdot X_1^2 - 0,0005 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0006 \cdot X_2^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 39,2569 + 0,1646 \cdot X_1 - 0,1305 \cdot X_2 - 0,0001 \cdot X_1^2 + 0,0002 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0002 \cdot X_2^2; \quad (2)$$

$$Y_3 = 661554 + 0,0803 X_1 - 0,0367 X_2 + 1,5939 e^{-5} \cdot X_1^2 - 2,4292 e^{-5} \cdot X_1 \cdot X_2 + 8,3544 e^{-5} \cdot X_2^2; \quad (3)$$

$$Y_4 = 913654 + 0,0684 X_1 + 0,0105 X_2 - 1,8031 e^{-6} \cdot X_1^2 - 3,7703 e^{-6} \cdot X_1 \cdot X_2 - 8,0765 e^{-5} \cdot X_2^2, \quad (4)$$

где Y_1 – температура основного конденсата перед ПНД 1, °С; Y_2 – температура основного конденсата перед ПНД 2, °С; Y_3 – температура основного конденсата перед ПНД 3, °С; Y_4 – температура основного конденсата перед ПНД 4, °С; X_1 – расход свежего пара на турбину, т/ч; X_2 – расход пара в нижний отопительный отбор, т/ч.

Для визуализации данных эксперимента использована разработанная компанией StatSoft компьютерная программа «Statistica», применение которой позволило наглядно отразить в трехмерном пространстве зависимость температуры основного конденсата турбины от расхода свежего пара на турбину и расхода пара в отопительные отборы (рис. 3).

Для оценки достоверности аппроксимации результатов эксперимента использованы коэффициенты множественной корреляции R и достоверность аппроксимации R^2 . Результаты вычислений R и R^2 , представленные на рис. 3, указывают на очень сильную корреляционную связь, поскольку для всех опытов R больше 0,9.

Полученная графическая зависимость (рис. 3) показывает, что во всех реально осуществимых рабочих режимах работы турбины Т-100/120-130-2 температура основного конденсата достаточна для нагрева исходной воды перед водоподготовительной установкой до технологически необходимой температуры 35 - 45 °С, что подтверждает промышленную применимость разработанных технических решений.

Аналогичные математические модели и графические зависимости были получены для турбин Т-100/120-130-3 ст. № 8 и ПТ-80-130/13 ст. № 9 при одно- и двухступенчатом подогреве сетевой воды.

В четвертой главе выполнено технико-экономическое исследование технологий использования систем регенерации турбин для подогрева низкопотенциальных теплоносителей ТЭЦ. Рассмотрены основные методы оценки энергетической эффективности структурных и режимных изменений в схемах регенерации турбин ТЭЦ. Оценены экологические аспекты и выполнен анализ инвестиционной привлекательности разработанных технологий на примере Ульяновской ТЭЦ-1.

Оценка тепловой экономичности разработанных технологий проведена по величине удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении $\nu_{тф}$, кВт·ч/м³, получаемой за счет отборов пара на подогрев 1 м³ обрабатываемой воды (УВЭТП).

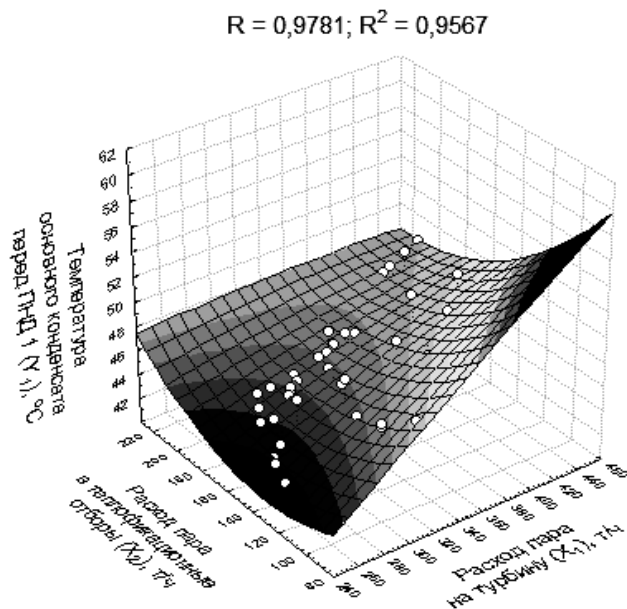


Рис. 3. Зависимость температуры основного конденсата турбины Т-100/120-130-2 ст. № 7 перед ПНД 1 от расхода свежего пара на турбину и расхода пара в нижний отопительный отбор при одноступенчатом подогреве сетевой воды

Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении $V_{\text{тф}}^{\text{УВЭТП.7.отб}}$, кВт·ч/м³, при использовании схемы, представленной на рис. 1, а, составляет:

$$V_{\text{тф}}^{\text{УВЭТП.7.отб}} = \frac{0,2778 \cdot (\bar{t}_{\text{исх.в}}^{-\text{II}} - \bar{t}_{\text{исх.в}}^{-\text{I}}) \cdot (\bar{t}_{7.\text{отб}}^{-\text{в}} - \bar{t}_{\text{осн.к}}^{-\text{II}})}{\eta_{\text{м.о}} \cdot (\bar{t}_{\text{осн.к}}^{-\text{I}} - \bar{t}_{\text{осн.к}}^{-\text{II}}) \cdot (i_{7.\text{отб}}^{-\text{д}} - \bar{t}_{7.\text{отб}}^{-\text{д}})} \cdot [(i_o - i_{7.\text{отб}}) \cdot \eta_{\text{эм}} + \frac{(\bar{t}_{\text{н.в}}^{-\text{д}} - \bar{t}_{7.\text{отб}}^{-\text{д}}) \cdot (0,5 \cdot i_o - 0,5 \cdot i_{7.\text{отб}}) \cdot \eta_{\text{эм}} - \frac{\Delta P}{\eta_{\text{н}}}}{(0,5 \cdot i_o + 0,5 \cdot i_{7.\text{отб}} - \bar{t}_{\text{н.в}})}] \quad (5)$$

где $\bar{t}_{\text{исх.в}}^{-\text{II}}$ – энтальпия исходной воды после подогревателя исходной воды (ПИВ), кДж/кг; $\bar{t}_{\text{исх.в}}^{-\text{I}}$ – энтальпия исходной перед ПИВ, кДж/кг; $\bar{t}_{\text{осн.к}}^{-\text{I}}$ – энтальпия основного конденсата турбоустановки перед ПИВ, кДж/кг; $\bar{t}_{\text{осн.к}}^{-\text{II}}$ – энтальпия основного конденсата турбоустановки на выходе из ПИВ, кДж/кг; $\bar{t}_{7.\text{отб}}^{-\text{в}}$ – энтальпия основного конденсата турбины после ПНД 1, кДж/кг; $\bar{t}_{7.\text{отб}}^{-\text{д}}$ – энтальпия дренажа греющего пара в ПНД 1, кДж/кг; $i_{7.\text{отб}}$ – энтальпия пара 7-го отбора турбины Т-100/120-130, кДж/кг; i_o – энтальпия острого пара, кДж/кг; $\bar{t}_{\text{н.в.}}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг; $\eta_{\text{м.о}}$ – КПД теплообменного оборудования, кДж/кг.

Так, удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении при использовании схемы подогрева исходной добавочной питательной воды, представленной на рис. 1, б, определяется по формуле:

$$V_{\text{тф}}^{\text{УВЭТП}} = \frac{0,2778}{\eta_{\text{м.о.}}} \cdot \left[\frac{(\bar{t}_{\text{исх}}^{-\text{II}} - \bar{t}_{\text{исх}}^{-\text{I}}) \cdot (\bar{t}_{7.\text{отб}}^{-\text{в}} - \bar{t}_{\text{осн.к}}^{-\text{II}})}{(\bar{t}_{\text{осн.к}}^{-\text{I}} - \bar{t}_{\text{осн.к}}^{-\text{II}}) \cdot (i_{7.\text{отб}}^{-\text{д}} - \bar{t}_{7.\text{отб}}^{-\text{д}})} \cdot [(i_o - i_{7.\text{отб}}) \cdot \eta_{\text{эм}} + \frac{(\bar{t}_{\text{н.в.}}^{-\text{д}} - \bar{t}_{7.\text{отб}}^{-\text{д}}) \cdot (0,5 \cdot i_o - 0,5 \cdot i_{7.\text{отб}}) \cdot \eta_{\text{эм}} - \frac{\Delta P}{\eta_{\text{н}}}}{(0,5 \cdot i_o + 0,5 \cdot i_{7.\text{отб}} - \bar{t}_{\text{н.в.}})}] + \left(\frac{\bar{t}_{\text{доб.в}} - \bar{t}_{\text{см}}}{\bar{t}_{\text{см}} - \bar{t}_{7.\text{отб}}^{-\text{в}}} + 1 \right) \cdot \left(\frac{\bar{t}_{6.\text{отб}}^{-\text{в}} - \bar{t}_{\text{см}}}{i_{6.\text{отб}} - \bar{t}_{6.\text{отб}}^{-\text{д}}} \right) \times \left[(i_o - i_{6.\text{отб}}) \cdot \eta_{\text{эм}} + \frac{(\bar{t}_{\text{н.в.}}^{-\text{д}} - \bar{t}_{6.\text{отб}}^{-\text{д}}) \cdot (0,5 \cdot i_o - 0,5 \cdot i_{6.\text{отб}}) \cdot \eta_{\text{эм}} - \frac{\Delta P}{\eta_{\text{н}}}}{(0,5 \cdot i_o + 0,5 \cdot i_{6.\text{отб}} - \bar{t}_{\text{н.в.}})} \right] \right] \quad (6)$$

где $\bar{t}_{\text{доб.в}}$ – энтальпия деаэрированной добавочной питательной воды, кДж/кг; $\bar{t}_{\text{см}}$ – энтальпия смешанного потока основного конденсата турбины и добавочной питательной воды перед ПНД 2, кДж/кг; $\bar{t}_{6.\text{отб}}^{-\text{в}}$ – энтальпия основного конденсата турбины после ПНД 2, кДж/кг; $\bar{t}_{6.\text{отб}}^{-\text{д}}$ – энтальпия дренажа греющего пара в ПНД 2, кДж/кг; $i_{6.\text{отб}}$ – энтальпия пара 6-го отбора турбины Т-100/120-130, кДж/кг.

Результаты оценки энергетической эффективности новых технологий, предусматривающих использование в подогревателе исходной подпиточной воды в качестве греющего агента основного конденсата турбины, в сравнении с известными схемами подогрева исходной воды перед водоподготовительной установкой

и вакуумным деаэратором подпиточной воды теплосети, представлены в виде диаграммы на рис. 4.

$$v_{mf}^{VBЭПП}, \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$$

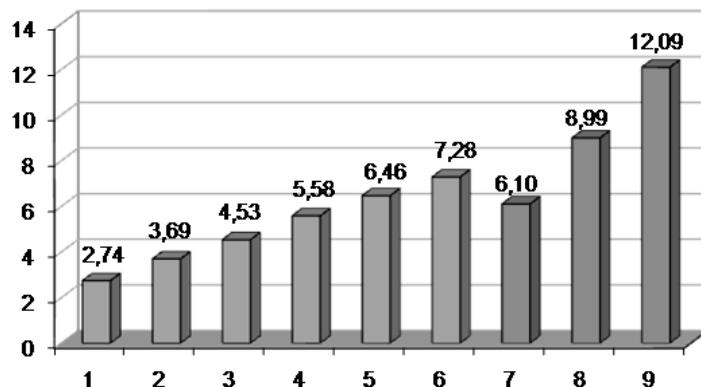


Рис. 4. Удельная выработка электроэнергии для технологий подогрева исходной подпиточной воды: 1 – подогрев исходной воды паром производственного отбора турбоустановки ПТ-135/165-130/15; 2 – подогрев исходной воды паром 4-го регенеративного отбора со сбросом конденсата в деаэратор питательной воды; 3 – подогрев исходной воды паром 5-го регенеративного отбора со сбросом конденсата в линию основного конденсата

турбоустановки перед ПНД 3; 4 – подогрев исходной воды паром 6-го отбора (верхнего отопительного) со сбросом конденсата в линию основного конденсата турбоустановки перед ПНД 2; 5 – подогрев исходной воды паром 7-го отбора (нижнего отопительного) со сбросом конденсата в линию основного конденсата турбоустановки перед ПНД 1; 6 – подогрев исходной воды сетевой водой, отобранной после нижнего сетевого подогревателя (НСП); 7 – подогрев исходной воды в ПИВ, включенном в трубопровод основного конденсата перед ПНД 3; 8 – подогрев исходной воды в поверхностном теплообменнике, включенном в трубопровод основного конденсата перед ПНД 2; 9 – подогрев исходной воды в поверхностном теплообменнике, включенном в трубопровод основного конденсата перед ПНД 1 (рис. 1, а)

В результате проведенной оценки энергетической эффективности новых технологий подогрева низкопотенциальных теплоносителей в системах регенерации турбин ТЭЦ установлено, что годовая экономия условного топлива составляет более 6000 т. у. т. в год при производительности водоподготовительной установки 1000 м³/ч.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведенный в работе анализ показал, что на большинстве действующих ТЭЦ имеются значительные резервы повышения энергетической эффективности, связанные с обеспечением внутростанционных тепловых нагрузок, приходящихся на водоподготовительные установки.

2. Разработан комплекс научно обоснованных технических решений по использованию потоков основного конденсата теплофикационных турбин, позволяющих обеспечить нормативное качество обрабатываемой воды и существенно повысить тепловую экономичность водоподготовки и всей электростанции в целом.

3. Проведено экспериментальное исследование промышленной применимости разработанных технологий на трех турбоустановках с агрегатами

Т-100/120-130-2 ст. № 7, Т-100/120-130-3 ст. № 8 и ПТ-80-130/13 ст. № 9, установленных в филиале ОАО «Волжская ТГК» «Ульяновская ТЭЦ-1». В результате экспериментального исследования были решены следующие задачи:

- 1) рассмотрены основные режимы работы паровых турбин Т-100-130 и турбины ПТ-80-130/13 при одноступенчатом и двухступенчатом подогреве сетевой воды;
- 2) получены многофакторные регрессионные уравнения для различных режимов работы турбин;
- 3) установлены корреляционные связи между режимными характеристиками работы турбоустановок (расход свежего пара на турбину, расход пара в теплофикационные отборы и расход пара в производственные отборы (для турбины типа ПТ)) и температурой основного конденсата;
- 4) построены графические характеристики процесса изменения параметров основного конденсата, позволяющие прогнозировать изменение его температуры при изменении расхода пара на турбину и расхода пара в отопительные отборы;
- 5) доказана возможность промышленной применимости разработанных технологий с использованием низкопотенциальной теплоты основного конденсата турбин на ТЭЦ практически во всем диапазоне изменения электрической и тепловой нагрузок турбоустановок.

4. Проведена оценка энергетической эффективности новых технологий подогрева низкопотенциальных теплоносителей ТЭЦ методом удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Установлено, что годовая экономия условного топлива составляет более 6000 тонн условного топлива в год при производительности водоподготовительной установки 1000 м³/ч.

5. Установлено, что среднегодовой чистый дисконтируемый доход при норме дисконта 10 % для разработанных технических решений варьируется в пределах от 3,55 до 7,98 млн. руб./год в расчете на один энергоблок с турбиной Т-100-130, а срок окупаемости составляет от 2,6 до 7,5 месяцев, в зависимости от достигнутой экономии условного топлива на ТЭЦ и уровня капитальных затрат. Невысокий срок окупаемости свидетельствует о высоком инвестиционном потенциале энергосберегающих технологий.

6. Выявлено, что использование разработанных технологий дает существенный экологический эффект, так годовая эмиссия CO₂ при внедрении предложенных технологий на ТЭЦ сократится на величину от 1320 до 14840 т в год в расчете на один энергоблок с турбиной Т-100-130 и при производительности водоподготовительной установки до 1000 м³/ч.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Шарапов, В. И. Использование систем регенерации турбин для подогрева низкопотенциальных теплоносителей ТЭЦ / В. И. Шарапов, А. В. Кузьмин. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 253 с.

Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК

2. Шарапов, В.И. О подогреве подпиточной воды теплосети в теплофикационных турбоустановках в неотапительный период / В.И. Шарапов, А.В. Кузьмин // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. – № 6(68). – С. 30–32.

3. Шарапов, В.И. Совершенствование технологии подготовки добавочной питательной воды промышленных ТЭЦ / В.И. Шарапов, А.В. Кузьмин // Промышленная энергетика. 2011. – № 4. – С. 40–44.

4. Шарапов, В.И. Технологии подогрева добавочной питательной воды котлов промышленных ТЭЦ / В.И. Шарапов, А.В. Кузьмин // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. 2011. – № 7. – С. 416–421.

5. Шарапов, В.И. О подогреве подпиточной воды теплосети основным конденсатом турбины / В.И. Шарапов, А.В. Кузьмин // Проблемы энергетики. Известия вузов. 2012. – № 3–4. – С. 12–22.

6. Шарапов, В.И. Об использовании пара нерегулируемых отборов турбин для подогрева низкопотенциальных теплоносителей / В.И. Шарапов, А.В. Кузьмин // Труды Академэнерго. 2013. – № 1. – С. 95–110.

По результатам выполненных работ получены патенты

7. Патент 2422646 (RU). МПК⁷ F01K 17/02. Способ работы тепловой электрической станции / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, М.М. Замалеев, А.В. Кузьмин, А.А. Салихов // Бюллетень изобретений. – 2011. – № 18.

8. Патент 2422647 (RU). МПК⁷ F01K 17/02. Способ работы тепловой электрической станции / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, М.М. Замалеев, А.В. Кузьмин, А.А. Салихов // Бюллетень изобретений. – 2011. – № 18.

9. Патент 2425228 (RU). МПК⁷ F01K 17/02. Способ работы тепловой электрической станции / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, М.М. Замалеев, А.В. Кузьмин, А.А. Салихов // Бюллетень изобретений. – 2011. – № 21.

10. Патент 2425988 (RU). МПК⁷ F01K 17/00. Тепловая электрическая станция / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, М.М. Замалеев, А.В. Кузьмин, А.А. Салихов // Бюллетень изобретений. – 2011. – № 22.

11. Патент 2428571 (RU). МПК⁷ F01K 17/00. Тепловая электрическая станция / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, М.М. Замалеев, А.В. Кузьмин, А.А. Салихов // Бюллетень изобретений. – 2011. – № 25.

12. Патент 2428574 (RU). МПК⁷ F01K 17/02. Способ работы тепловой электрической станции / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, М.М. Замалеев, А.В. Кузьмин, А.А. Салихов // Бюллетень изобретений. – 2011. – № 25.

13. Патент 2430243 (RU). МПК⁷ F01K 17/02. Способ работы тепловой электрической станции / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, М.М. Замалеев, А.В. Кузьмин, А.А. Салихов // Бюллетень изобретений. – 2011. – № 27.

Публикации в других изданиях

14. Кузьмин, А.В. Один из способов повышения эффективности ТЭЦ за счет использования низкопотенциальных источников теплоты путем прямого теплообмена / А.В. Кузьмин, В.И. Шарапов // Матер. докладов. VII Школа – семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Исслед. центр проблем энергетики. – Казань : КазНЦ РАН, 2010. – С. 385–387.

15. Кузьмин, А.В. Повышение эффективности использования регенеративных отборов пара теплофикационных турбин / А.В. Кузьмин, В.И. Шарапов // Матер. докладов. VIII Школа – семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Исслед. центр проблем энергетики. – Казань : КазНЦ РАН, 2012. – С. 541–545.

16. Кузьмин, А.В. Использование низкопотенциальных источников теплоты на внутростанционные нужды / А.В. Кузьмин // Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа. Сборник аннотаций проектов. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – С. 101–103.

17. Кузьмин, А.В. Подогрев исходной воды перед деаэраторами основным конденсатом турбин / А.В. Кузьмин // Теплоэнергетика и теплоснабжение. Сборник научных трудов НИЛ «ТЭСУ» Выпуск 9. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – С. 126–145.

18. Кузьмин, А.В. Новые технологии покрытия тепловой нагрузки водоподготовительной установки ТЭЦ / А.В. Кузьмин // Новые технологии в теплоснабжении и строительстве: Сборник работ аспирантов и студентов – сотрудников НИЛ «ТЭСУ». Выпуск 11. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – С. 349–361.

19. Кузьмин, А.В. Определение инвестиционной привлекательности новых технологий покрытия тепловой нагрузки ВПУ ТЭЦ / А.В. Кузьмин // Новые технологии в теплоснабжении и строительстве: Сборник работ аспирантов и студентов – сотрудников НИЛ «ТЭСУ». Выпуск 11. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – С. 362–368.

Автореферат

КУЗЬМИН Антон Владимирович

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ РЕГЕНЕРАЦИИ
ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ ПОДОГРЕВА
НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ТЭЦ**

Подписано в печать 19.11.2013. Формат 60×84_{1/16}.

Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 1082.

ИПК «Венец» Ульяновского государственного технического университета.
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.