

На правах рукописи

**ДЕВЯНИН АЛЕКСЕЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ  
ТРЕХКОНТУРНЫХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК**

Специальность: 05.14.14 - «Тепловые электрические станции, их  
энергетические системы и агрегаты»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2009

Работа выполнена в Московском энергетическом институте (Техническом университете) на кафедре Тепловых электрических станций.

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
профессор Цанев Стефан Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
профессор Агабабов Владимир Сергеевич

кандидат технических наук  
Панин Виктор Васильевич

Ведущая организация: ОАО «Компания ЭМК-Инжиниринг»

Защита состоится « 13 » мая 2009 г. в 16 час. 00 мин. в аудитории МАЗ на заседании диссертационного совета Д 212.157.07 при Московском энергетическом институте (Техническом университете) по адресу: г. Москва, ул. Красноказарменная, 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского энергетического института (Технического университета).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Ученый Совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан « 10 » апреля 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета Д 212.157.07  
к.т.н., профессор



Лавыгин В.М.

2009А  
7629

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

По данным за 2006 г. установленная мощность тепловых электрических станций составляла 131,9 млн. кВт, из них 64,4 млн. кВт – ТЭЦ. На ТЭЦ производится около 50% электроэнергии, вырабатываемой тепловыми станциями, и практически все крупные тепловые нагрузки покрываются ими.

К сожалению, в настоящее время термодинамическая эффективность многих ТЭЦ далека от расчетных показателей. Причиной этого является спад в промышленности, что вызвало снижение на 30-40% потребности в тепловой энергии по сравнению с 1990г. Определенную роль играет также локальный характер сетей теплоснабжения, исключающий возможность передачи избыточной тепловой мощности ТЭЦ. Многие теплофикационные энергоблоки, в силу отсутствия отопительной нагрузки, до 6 месяцев в году вынуждены работать в конденсационном режиме, что сильно снижает их термодинамическую эффективность и делает не конкурентоспособными по отношению к КЭС.

На ряду с этим, наблюдается практическое отсутствие внедрения передовых разработок энергетических технологий, что привело к существенному отставанию нашей энергетики от энергетики развитых стран. Начавшийся в России экономический рост неизбежно повлечет за собой увеличение спроса на электроэнергию, что еще больше усугубит существующую проблему. Несмотря на временный приостанов роста спроса на электроэнергию, связанный с наступившим в 2008 г. финансовым и экономическим мировым кризисом, тенденция к выбыванию изношенного оборудования существует, а, следовательно, проблема дефицита электроэнергии остается на повестке дня.

В связи с этим, в ходе выполнения инвестиционной программы РАО ЕЭС России были запланированы и реализуются ряд проектов строительства новых парогазовых установок. Основной прирост мощности ожидается с вводом ПГУ условной мощностью 400 и 450 МВт. Трудности при проектировании таких установок связаны с тем, что часть основного оборудования – газотурбинные установки и паротурбинные ус-

тановки с их вспомогательными системами, будут поставляться зарубежными фирмами, а остальное оборудование, в том числе котлы-утилизаторы, Российским Заказчикам необходимо выбрать самим. В отличие от блоков ПГУ-450, при сооружении которых в России уже накоплен большой опыт и выбор основных параметров не вызывает у проектировщиков больших затруднений, для конденсационных и теплофикационных ПГУ-400 с тремя контурами давления пара информация по обоснованию оптимальных параметров крайне ограничена.

В связи с этим изучение вопросов, связанных со структурой тепловой схемы и выбором оптимальных параметров трехконтурных ПГУ приобретает особую актуальность.

#### Цель работы.

1. На основании имеющихся в литературе данных и разработанных в МЭИ программ расчета тепловых схем и физических свойств рабочих сред ПГУ, усовершенствовать методику расчета и реализовать это в компьютерных программах расчёта тепловых схем трёхконтурных ПГУ для достижения наилучшего соотношения получения достоверных расчетных показателей тепловой экономичности ПГУ и затрат времени.

2. Разработать методику и программу технико-экономического выбора оптимальных параметров пара трехконтурных ПГУ, позволяющую выбирать оптимальные параметры тепловой схемы (давление и температура пара высокого давления, давление и температура пара горячего промпрегрева и др.).

3. На основе методических разработок и программ провести исследование и выполнить анализ степени влияния различных характеристик тепловой схемы на оптимальные параметры пара утилизационной части ПГУ и выбрать оптимальные параметры тепловой схемы ПГУ для заданных условий сооружения электростанции.

4. Провести исследования и оптимизацию структуры тепловой схемы теплофикационной ПГУ.

5. Провести сопоставление экономической эффективности инвестиций в строительство теплофикационных и конденсационных трехконтурных ПГУ при выбранных оптимальных параметрах.

6. В целях сокращения инвестиций, исследовать возможность применения в теплофикационной трехконтурной ПГУ существующих паровых турбин Т-250-240.

#### Научная новизна работы.

1. Усовершенствована методика и алгоритм расчёта тепловых схем ПГУ с КУ трёх давлений. На основе методик и алгоритмов разработана программа для расчета тепловых схем парогазовых установок с котлами-утилизаторами на ЭВМ, позволяющая проводить точные термодинамические расчеты при минимальных затратах времени.

2. Разработан модифицированный метод базового варианта, позволяющий выбирать оптимальные параметры тепловых схем ПГУ.

3. Впервые проведена комплексная оптимизация основных параметров паросиловой части конденсационного трехконтурного парогазового энергоблока.

4. Впервые проведена технико-экономическая оптимизация теплофикационной установки трехконтурной ПГУ-ТЭЦ.

5. Разработана тепловая схема, выбраны параметры и технико-экономически обоснована целесообразность модернизации существующих паросиловых энергоблоков с паровыми турбинами Т-250/300-240 в теплофикационные ПГУ.

Степень достоверности разработанных методик и программ обеспечивается применением широко используемых методик расчетов элементов тепловых схем ТЭС, апробированных математических методов моделирования, а также хорошей сходимостью результатов комплексной технико-экономической оптимизации конденсационных трехконтурных ПГУ с основными параметрами ПГУ фирм производителей основного оборудования, предложенных для установки на электростанциях России.

#### Практическая ценность работы.

1. Разработанные методики и полученные в работе результаты позволяют при разработке трехконтурных конденсационных и теплофикационных ПГУ выбирать наиболее оптимальные параметры перегрева пара и пара горячего промпрегрева, поверхности нагрева котлов-утилизаторов, размеры главных паропроводов, выхлопное сечение ЦНД паровых турбин с учетом типа газотурбинного оборудования, особенностей тепловой схемы, режима эксплуатации ПГУ, ставки дисконтирования,

прогнозируемых цен на газ, электроэнергию и тепло в период эксплуатации. Результаты работы могут быть рекомендованы заводам-производителям паротурбинного и котельного оборудования, проектным организациям, а также генеральным поставщикам ПГУ «под ключ».

2. Разработанное в работе предложение по модернизации блоков с паровой турбиной Т-250/300-240 в трехконтурные теплофикационные блоки ПГУ может быть использовано генерирующими компаниями, на ТЭЦ которых эксплуатируются паросиловые блоки с паровой турбиной Т-250/300-240, для значительного снижения удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии и повышения доходности производства.

#### Апробация работы и публикации.

Результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: Материалы науч.-техн. конф. «Повышение экономичности, надежности и экологической безопасности» (2005 г., Москва); 12-ой Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2006 г., Москва); 3-ей Межд. школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (2006 г., Москва); 13-ой Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2007 г., Москва); 14-ой Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2008 г., Москва); 55-ой науч.-техн. Сессии по проблемам газовых турбин «Научные, теоретические и технические проблемы переноса передовых авиационных разработок в конструкции наземных и морских ГТУ» (2008 г., Рыбинск); научный семинар кафедры ТЭС МЭИ (2008 г., Москва); заседания кафедры ТЭС МЭИ (2009 г., Москва).

По результатам диссертации имеется 7 публикаций.

#### Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, пяти глав, выводов по работе и списка использованной литературы. Содержание работы изложено на 178 страницах машинописного текста. Список литературы содержит 94 наименования.

#### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении рассмотрены существующие проблемы ТЭС и перспективы приме-

нения парогазовых технологий в теплоэнергетике России.

В первой главе проведен анализ термодинамических циклов конденсационных и теплофикационных трехконтурных ПГУ, который показал, что оптимальные начальные параметры рабочего тела паровой части конденсационной и теплофикационной ПГУ практически совпадают.

Выполнен обзор работ по методикам расчета и оптимизации тепловых схем парогазовых установок с котлами-утилизаторами. Анализ литературных данных показал, что в большинстве работ рассматривались одноконтурные и двухконтурные схемы ПГУ. Существующие в литературе на сегодняшний день рекомендации по выбору структуры и оптимальных параметров пара в утилизационной части ПГУ с КУ трех давлений ограниченные и требуют дополнительных исследований.

Проведенный обзор существующих схем трехконтурных парогазовых энергоблоков показал, что в утилизационной части ПГУ базирующихся на разных типах ГТУ наблюдается достаточно большой разброс параметров пара. Это относится также к ПГУ, сооруженным на базе одной и той же газотурбинной установки.

На сегодняшний день, трехконтурные ПГУ, построенные на базе ГТУ одного класса мощности, обладают практически равными показателями тепловой экономичности и схожими схемными решениями. Принимая во внимание, что тепловые схемы ПГУ ведущих мировых фирм *GE* и *Siemens* практически совпадают и большая часть энергоблоков ПГУ трех давлений, строительство которых запланировано в ходе выполнения инвестиционной программы РАО ЕЭС России, будет создаваться на базе ГТУ и ПГУ этих фирм, для последующего исследования была выбрана тепловая схема ПГУ приведенная на рис. 1.

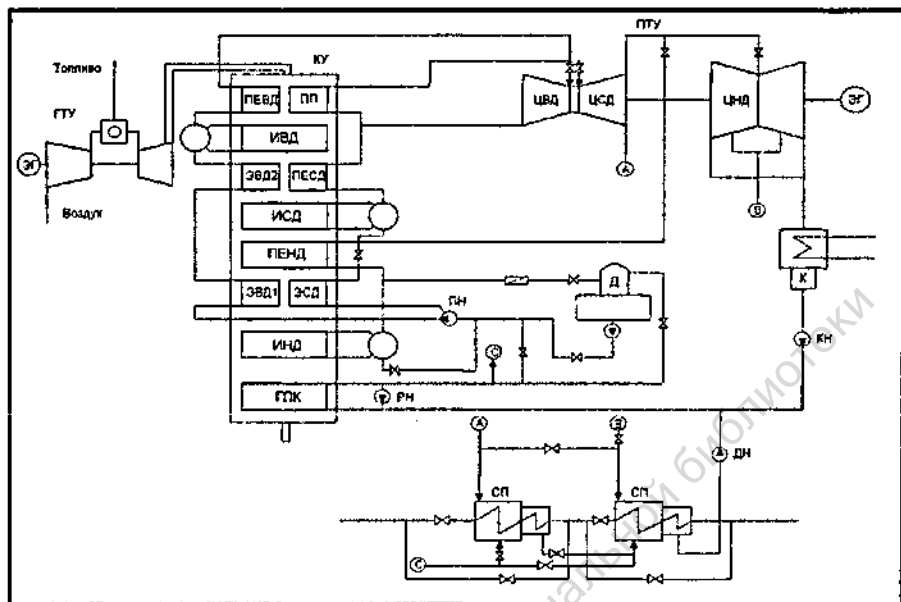


Рис.1. Расчетная тепловая схема ПГУ: ГТУ – газотурбинная установка; ЭГ – электрогенератор; КУ – котёл-утилизатор; ПЕ – пароперегреватель; ИС – испаритель; ЭК – экономайзер; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ВД – высокое давление; СД – среднее давление; НД – низкое давление; ПН – питательный насос; РН – насос рециркуляции; Д – деаэратор; ПТУ – паротурбинная установка; ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦСД – цилиндр среднего давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; К – конденсатор; СП – сетевой подогреватель.

По результатам анализа обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена усовершенствованию методических положений термодинамического расчёта тепловых схем трехконтурных ПГУ и разработке методики технико-экономической оптимизации параметров паросиловой части ПГУ.

Для повышения достоверности расчетов в разработанной методике впервые были учтены следующие факторы:

- изменение внутреннего относительного КПД ЦНД в зависимости от:
  - влажности в последних ступенях;
  - расхода и параметров пара;
  - площади выхлопа ЦНД;
- протечки уплотнений ПТУ;



- изменение гидравлического сопротивления паропроводов КУ – ПТУ в зависимости от параметров и расхода пара;
- расчет теплофизических свойств газов в КУ на базе расчетного состава уходящих газов ГТУ согласно [www.wspr.ru](http://www.wspr.ru).

Компьютерная программа, разработанная автором, является продолжением разработанной в НИЛ МЭИ (ТУ) «ГТУ и ПГУ ТЭС» программы «Расчёт парогазовой установки с котлом-утилизатором». В программу внесены ряд изменений и доработок, изменен алгоритм расчета, что позволило повысить достоверность результатов расчетов. В результате, погрешность расчетов не превышала десятой доли процента.

Технико-экономическая оптимизация параметров проводилась при помощи разработанной автором методики Модифицированного Базового Варианта (МБВ), суть которого заключается в использовании чистого дисконтированного дохода в качестве критерия оптимизации при сравнении результатов вариантных расчетов с выбранным ранее Базовым вариантом.

Кроме того, в анализе потока наличных используются не абсолютные значения затрат и денежных поступлений исследуемых вариантов, а анализируются только разницы затрат и денежных поступлений исследуемых вариантов и Базовым вариантом. В этом случае отпадает необходимость рассчитывать для каждого варианта как стоимость всего ПГУ, так и полные денежные потоки при эксплуатации. Это позволило оптимизировать параметры, вклад которых в общие денежные потоки ПГУ незначителен и их влияние могло быть незамеченным из-за округлений в процессе расчетов.

Изменение чистого дисконтируемого дохода (ЧДД) проекта сооружения и эксплуатации ПГУ рассчитывается по формуле:

$$\Delta \text{ЧДД} = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta \text{Ц}_{3,i} + \Delta \text{Ц}_{7,i}) - (\Delta \text{Ц}_{3,i} + \Delta \text{Ц}_{7,i} - a_i \times \Delta K) \times \text{Пр} + \text{ИДС} \times \Delta \text{К} - \Delta \text{К} \cdot i \times (1 - \text{Пр}) \times \text{Нс}}{(1 + \text{ставка дисконтирования})^i} \quad (1)$$

где:

$\Delta C_{\partial,i}, \Delta C_{T,i}$  - разница денежных поступлений за продажу электроэнергии и тепла в  $i$ -год между исследуемым и Базовым вариантами, млн. руб;

$a_i$  - коэффициент амортизации в  $i$ -ый год эксплуатации; %;

$\Delta K$  - дополнительные инвестиции по сравнению с Базовым вариантом, млн.руб;

$Pr, НДС, Нс$  - налог на прибыль НДС, и налог на собственность, %;

$\Delta K_i$  - дополнительные инвестиции, НДС с которых возвращается государством в  $i$ -ый год эксплуатации, млн.руб;

$\Delta K_{o,i}$  - остаточная стоимость дополнительных инвестиций в  $i$ -ый год эксплуатации, млн.руб.

Третья глава посвящена термодинамической оптимизации параметров тепловой схемы трехконтурной конденсационной ПГУ.

В силу того, что практически невозможно спрогнозировать не только тепловую нагрузку конкретной новой электростанции в зависимости от температуры наружного воздуха, но достаточно уверенно предсказать тепловую нагрузку по годам для среднегодовой температуры, то единственным доступным достаточно хорошо прогнозируемым для тепловых расчетов режимом является конденсационный режим.

С учетом вышесказанного, наиболее приемлемым методом получения оптимальных параметров пароводяного цикла ПГУ является проведение оптимизационных расчетов паросиловой части ПГУ в конденсационном режиме при среднегодовой температуре. Параметры теплофикационной установки целесообразно выбрать на последнем этапе исследования путем оптимизационных расчетов совместно с оборудованием пароводяного цикла блока ПГУ, основные параметры которого были определены ранее при оптимизации конденсационного режима работы.

Критерием оптимизации служит электрическая мощность ПГУ нетто. Эффективность ПГУ с КУ обеспечивается рациональной организацией утилизации теплоты выхлопных газов ПГУ. Очевидно, что при неизменной газотурбинной части, теплота отработавших в турбине газов будет практически неизменной при одной и той же температуре, давлении и относительной влажности наруж-

ного воздуха. Таким образом, максимальная электрическая мощность ПГУ нетто и соответственно максимум КПД парогазового цикла достигается при максимально возможной полезной работе утилизационной паросиловой части. Основными параметрами, определяющими термодинамическую эффективность парового цикла, являются начальные параметры пара - давление, температура. При росте давления в контурах КУ также возрастает энергопотребление насосного оборудования паросиловой части ПГУ, что оказывает непосредственное влияние на КПД нетто парогазовой установки.

При помощи многовариантных расчетов с использованием разработанного программного комплекса было проведено исследование характера и интенсивности изменения мощности ПГУ нетто в зависимости от параметров генерируемого в КУ пара.

Приведенные на рис.2 зависимости показывают влияние изменения давления пара горячего промперегрева на прирост электрической мощности нетто ПГУ при различных давлениях пара в контуре ВД. График построен относительно мощности ПГУ при

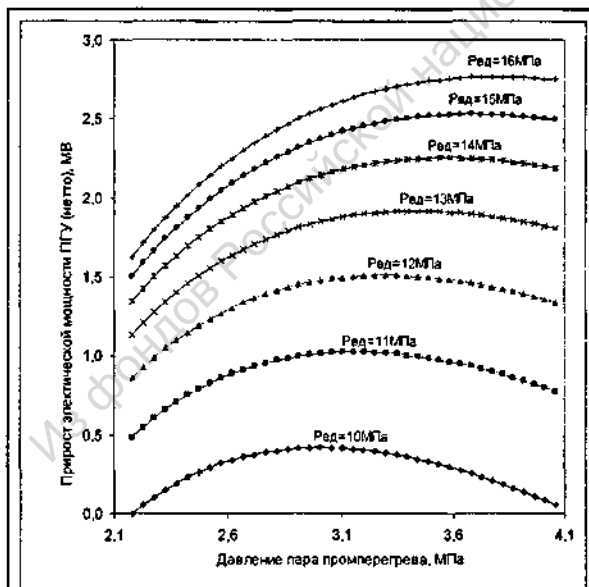


Рис. 2. Влияние давления пара промперегрева на изменение электрической мощности ПГУ нетто при различных давлениях пара высокого давления.

давлениях пара перед цилиндрами высокого (контур ВД) и среднего давления (контур СД) ПТУ 10,0 и 2,2 МПа соответственно, температуре уходящих газов ГТУ - 570°C, температуре острого пара и промперегрева - 545°C, давлении пара в конденсаторе во всех случаях равно 4 кПа, площадь выхлопа ПТУ составляет 2x7,5м<sup>2</sup>.

Данные, приведенные на рис.2 показывают, что для

каждого принятого значения давления пара ВД существуют оптимальные значения

давлений пара промперегрева. Рост же давления в первом контуре паросиловой части ПГУ при оптимальном давлении последующего контура приводит к росту тепловой экономичности установки.

Скорость прироста тепловой эффективности трехконтурной ПГУ с ростом давления в первом контуре замедляется, что объясняется противоположно направленным влиянием на мощность ПГУ срабатываемого в ПГУ теплоперепада и генерируемого КУ расхода пара. Общий прирост электрической мощности с ростом давления в первом контуре при прочих равных условиях в исследованном диапазоне параметров не превышает 2.5 - 3 МВт.

Важными параметрами тепловой схемы ПГУ, влияющим на термодинамическую эффективность ПГУ, являются температуры острого пара и пара горячего промперегрева. Для исследуемой схемы, в которой промежуточный пароперегреватель установлен параллельно с перегревателем высокого давления, температура острого пара и пара промперегрева определяются температурой дымовых газов на выхлопе ГТУ и температурным напором.

Проведенные исследования показали, что рост температуры пара при оптимальном давлении промперегрева приводит к увеличению мощности ПГУ нетто, причем температуры пара высокого давления и пара горячего промперегрева не оказывают существенного влияния на выбор оптимального давления пара горячего промперегрева.

Также не оказывают существенного влияния на оптимальное термодинамическое значение давление контура СД внутренние относительные КПД цилиндров паровой турбины.

Исследования влияния отдельных характеристик тепловой схемы на изменение тепловой экономичности ПГУ показали, что одними из основных факторов, оказывающими влияние на мощность ПГУ нетто, являются площадь выхлопа ЦНД ПТУ и давление в конденсаторе ( $p_k$ ). Зависимости изменения электрической мощности ПГУ нетто от указанных характеристик представлены на рис.3.

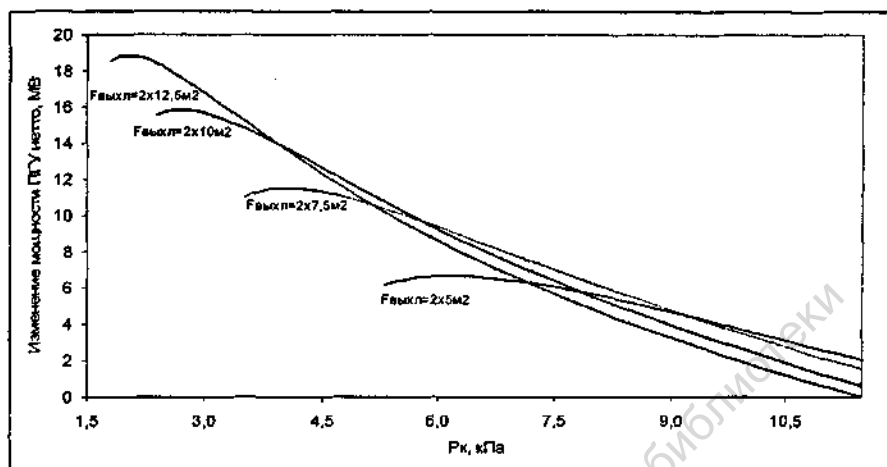


Рис. 3. Зависимость относительной мощности ПГУ нетто от  $p_k$  при различных площадях выхлопа ЦНД.

Из графика следует, что:

- Каждой площади выхлопа ЦНД соответствует свое оптимальное значение  $p_k$ .

При заданной площади выхлопа ЦНД чрезмерное снижение вакуума ведет к снижению тепловой экономичности и может привести к «залиранию» ЦНД ПГУ (достижению критической скорости выхлопа пара), что является недопустимым режимом работы ПГУ.

- С повышением давления в конденсаторе при постоянном расходе пара в ЦНД выгоднее устанавливать ЦНД с меньшей площадью выхлопа, что повышает тепловую экономичность с одновременным уменьшением стоимости паровой турбины.

Проведенные термодинамические исследования не позволили однозначно выбрать все оптимальные параметры тепловой схемы ПГУ. В этой связи четвертая глава посвящена технико-экономическому выбору следующих основных параметров тепловой схемы трехконтурной конденсационной парогазовой установки:

- давления и температуры острого пара и пара горячего промперегрева;
- температурных напоров на холодном конце испарительных поверхностей Pinch Point ( $\Theta_{ис}$ ) котла-утилизатора;

- недогревов питательной воды в экономайзерах ( $\Theta_{эж}$ ) до температуры насыщения в барабанах котла-утилизатора;
- диаметров трубопроводов острого пара и пара промперегрева.

Изменение вышеперечисленных параметров ПГУ приводит, с одной стороны к изменению электрической мощности ПГУ, а с другой стороны, одновременно изменяются капитальные вложения в КУ, паропроводы и питательный насос. При этом, стоимости газотурбинной установки с ее вспомогательным оборудованием и паротурбинной установки, при неизменных  $p_k$  и площади выхлопа ЦНД, в рассматриваемом диапазоне изменения параметров пара утилизационной части ПГУ не изменяются. Стоимость оставшегося оборудования, затраты на проектные изыскания, строительные работы и ряд других издержек остаются также неизменными или изменяются незначительно.

В результате проведенной пошаговой технико-экономической оптимизации отдельных параметров, в которой на следующем шаге исследования были использованы оптимальные параметры предыдущего шага, были получены оптимальные значения исследуемых параметров.

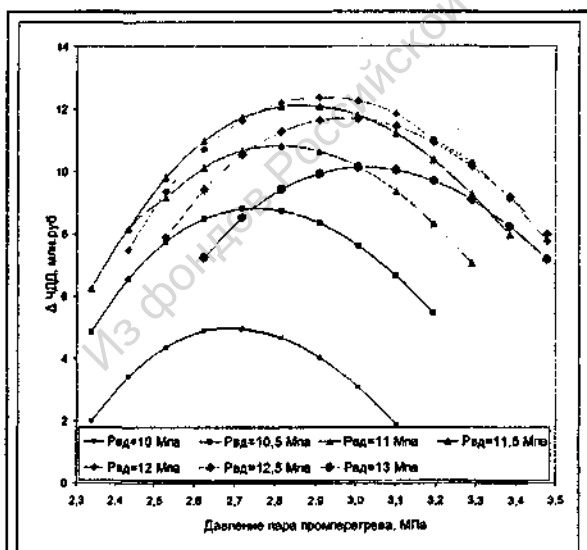


Рис. 4. Влияние давления пара промперегрева перед стопорными клапанами ЦСД на изменение ЧДД при различных давлениях пара высокого давления.

На рис.4 приведены изменения ЧДД в зависимости от давления пара промперегрева перед стопорными клапанами ЦСД при различных давлениях острого пара для ПГУ на базе ГТУ типа SGT5-4000F производства фирмы Siemens при оптимальных параметрах тепловой схемы. Как хорошо видно из этого рисунка, существует экономический оптимум давлений пара

контура ВД и контура СД, причем с ростом давления пара ВД возрастают оптимальные значения давления пара промперегрева. Это связано с тем, что с ростом давления пара ВД оптимальное отношение скоростей прироста электрической мощности ПГУ нетто и дополнительных инвестиций в строительство ПГУ смещаются в сторону более высокого давления пара промперегрева.

При сравнении оптимальных значений давлений контура СД, полученных при наибольшем приросте ЧДД, с данными рис. 3 видно, что значения давления СД сместились влево на 3 – 5 бар в зависимости от давления острого пара.

Наибольший экономический эффект при заданных условиях принесет ПГУ с давлением свежего пара перед стопорными клапанами ЦВД 12 МПа и при давлении пара горячего промперегрева перед стопорными клапанами ЦСД 2,9 МПа. Эти параметры хорошо согласуются с предполагаемыми параметрами ПГУ на ТЭЦ Мосэнерго для аналогичных газовых турбин.

Проведенные исследования показали, что оптимальные параметры значительно зависят от температуры уходящих газов ПГУ, цен на оборудование, ставки дисконтирования, режима эксплуатации ПГУ и цены на электроэнергию.

Пятая глава посвящена технико-экономической оптимизации параметров тепловой схемы трехконтурных теплофикационных ПГУ.

В отличие от программы расчета ПГУ, использованной в предыдущих главах, в которых проводился фактически термодинамический расчет котла-утилизатора (за исключением расчетов по выбору диаметров трубопроводов) и паровой турбины (за исключением ПНД), в настоящей главе все результаты расчетов выполнены с помощью программ, в которых моделируются работы котлов-утилизаторов и паровых турбин с заданной геометрией, подобранной по данным оптимального базового режима работы.

Впервые проведенная технико-экономическая оптимизация схемы теплофикационной установки трехконтурной ПГУ показала, что:

- экономически целесообразно оснащать каждый сетевой подогреватель собственным охладителем дренажа. Это позволит дополнительно получить в отопительный период 2,3 МВт электроэнергии, а в летний период - 0,26 МВт.

- экономически целесообразно применять газовый подогреватель конденсата с увеличенной поверхностью теплообмена для использования рециркуляции конденсата в целях дополнительного подогрева сетевой воды. Это позволит дополнительно получить в отопительный период ~13 Гкал/час тепла, а в летний период ~0,6 МВт электроэнергии.

Основные показатели тепловой экономичности работы ПГУ приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Показатели тепловой экономичности ПГУ.

Температура наружного воздуха, °С	-3,6	15	4,1
Электрическая мощность ПГУ брутто, МВт	365,8	391,5	417,6
Электрический КПД брутто, %	50,5	56,1	57,7
Тепловая мощность ПГУ, Гкал/ч	237,2	41,8	-
Коэффициент использования тепла топлива, %	88,5	64,1	57,7

Анализ экономической эффективности инвестиций в строительство ПГУ показал, что комбинированная выработка тепла и электроэнергии теплофикационной ПГУ экономически почти в 2 раза выгоднее выработки электроэнергии конденсационной ПГУ.

В сложившихся экономических условиях особенно актуальным стал вопрос снижения капитальных затрат в строительстве энергоустановок. Одним из вариантов снижения удельной стоимости энергоблока является модернизация существующих паросиловых энергоблоков с использованием парогазовой технологии, которая может осуществляться с последующим использованием части старого оборудования, путем сооружения во временном торце ТЭС газотурбинного отделения с котлами-утилизаторами, пар от которых будет направляться в существующую паровую турбину.

Среди паросиловых установок значительный интерес для реконструкции представляют теплофикационные газомазутные энергоблоки, включающие паровые турбины на сверхкритические начальные параметры пара Т-250/300-240 ТМЗ.

Исходя из особенностей тепловой схемы (наличие промежуточного перегрева пара), номинальных параметров и расходов пара данной турбоустановки, в работе была разработана схема перевода существующего паросилового энергоблока в ПГУ по



дубль-блочной схеме трех давлений пара с промежуточным перегревом. В состав парогазовой надстройки будут входить две ГТУ типа SGT5-4000F производства *Siemens* и два трехконтурных котла-утилизатора с промперегревом.

Основные показатели тепловой экономичности модернизированного парогазового энергоблока приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Показатели тепловой экономичности ПГУ на базе паровой турбины Т-250/300-240.

Температура наружного воздуха, °С	-3,6	15	4,1
Электрическая мощность ПГУ брутто, МВт	756,4	757,7	783
Электрический КПД брутто, %	52,2	55,1	55,3
Тепловая мощность ПГУ, Гкал/ч	379	64,7	-
Коэффициент использования тепла топлива, %	82,6	60,5	55,3

Таким образом, электрическая мощность блока на тепловом потреблении при этом возросла почти в 3 раза. Для повышения экономичности ПГУ, каждый сетевой подогреватель в тепловой схеме оборудуется охладителем дренажа, что позволяет увеличить тепловую мощность блока в зимнем режиме на ~ 37 Гкал.

Анализ экономической эффективности инвестиций показал, что модернизация существующих теплофикационных паросиловых энергоблоков с турбинами Т-250-240 по парогазовой технологии приводит к значительному увеличению Чистого Дисконтируемого Дохода, чем продолжение эксплуатации существующих энергоблоков.

## ВЫВОДЫ

1. Усовершенствована и реализована в программах на персональном компьютере методика расчета тепловых схем трехконтурных парогазовых установок, позволяющая с высокой точностью и скоростью определять показатели тепловой экономичности ПГУ.
2. Проведенные термодинамические исследования влияния отдельных параметров тепловой схемы на тепловую экономичность ПГУ показали, что оптимальное давление пара промежуточного перегрева в основном зависит от давления острого пара.

3. Установлено, что площадь выхлопа ЦНД ПТУ следует выбирать в зависимости от давления пара в конденсаторе определенного для среднегодовой температуры наружного воздуха, при чем с ростом его значения, при постоянном расходе пара, целесообразно применять ЦНД с меньшей площадью выхлопа, что повышает тепловую экономичность с одновременным уменьшением стоимости паровой турбины. При этом скорость пара в последней ступени должна быть меньше критической при всех режимах работы ПТУ.
4. Разработана методика технико-экономического выбора оптимальных параметров пара трехконтурных ПТУ (давление и температура пара высокого давления, давление и температура пара горячего промперегрева и др.) при оптимальных поверхностях нагрева котла-утилизатора (газового подогревателя конденсата, экономайзеров, испарителей и пароперегревателей) и оптимальных диаметрах основных паропроводов для выбранной паровой турбины при различных режимах эксплуатации энергоблока.
5. Впервые проведенная комплексная технико-экономическая оптимизация при помощи предложенного в этой работе Модифицированного метода Базового варианта показала наличие технико-экономических оптимумов параметров тепловой схемы ПТУ, при которых достигается максимум Чистого Дисконтируемого Дохода. К таким параметрам относятся:
- давление острого пара и пара промперегрева;
  - температуры острого пара и пара промперегрева;
  - температурные напоры на холодном конце испарительных поверхностей котла-утилизатора;
  - недогревы питательной воды в экономайзерах до температуры насыщения в барабанах котла-утилизатора;
  - диаметры трубопроводов острого пара и пара промперегрева.
6. Полученные в результате технико-экономической оптимизации параметры свежего пара и пара горячего промперегрева хорошо согласуются с имеющимися в распоряжении автора параметрами тепловых схем ПТУ зарубежных фирм.

производителей основного оборудования, предложенных в России для условий, аналогичным принятым в диссертационной работе.

7. Впервые проведенная технико-экономическая оптимизация схемы теплофикационной установки трехконтурной ПГУ показала:
  - экономически целесообразно оснащать каждый сетевой подогреватель собственным охладителем дренажа;
  - экономически целесообразно примесить в котле-утилизаторе газовый подогреватель конденсата с увеличенной поверхностью теплообмена для использования рециркуляции конденсата в целях получения дополнительной тепловой мощности.
8. Впервые проведенные исследования экономической эффективности инвестиций в строительство трехконтурных ПГУ с оптимальными параметрами показали, что при существовании возможности отпуска тепла на отопление или промышленные нужды целесообразно сооружать теплофикационную ПГУ, которая при работе в базовом режиме позволит получить Чистый Дисконтируемый Доход почти в 2 раза превышающий ЧДД, который был бы получен при эксплуатации аналогичной конденсационной ПГУ в одинаковых условиях эксплуатации.
9. Проведенные расчеты разработанной автором тепловой схемы трехконтурной ПГУ на базе паровой турбины Т-250/300-240 показали техническую возможность модернизации существующих теплофикационных паросиловых энергоблоков по парогазовой технологии. При этом происходит значительное увеличение Чистого Дисконтируемого Дохода за расчетный период эксплуатации ПГУ, по сравнению с продолжением эксплуатации существующих паросиловых энергоблоков.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Техническое перевооружение паросиловой теплоэлектроцентрали в парогазовую теплофикационную установку / Девянин А.В., Цанев С.В., Буров В.Д. // Вестник МЭН, 2005, №2. с. 29 – 33.
2. Оптимизация параметров тепловых схем конденсационных и теплофикационных ПГУ с котлами-утилизаторами трех давлений / Девянин А.В.,

09 - 07629

2009A  
7629

Цанев С.В., Буров В.Д. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – №1  
– С. 23-27.

3. Техническое перевооружение и модернизация российских тепловых электростанций с использованием мирового опыта / Девянин А.В., Цанев С.В., Буров В.Д., Девянин В.А. // Материалы науч.-техн. конф. «Повышение экономичности, надежности и экологической безопасности». МЭИ, 2005. с. 102-110.
4. Исследование характеристик парогазовой теплофикационной установки на базе паровой турбины Т-250/300-240 / Девянин А.В., Цанев С.В., Буров В.Д. // Тез. докл. XII Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». МЭИ, 2006. с. 185-187.
5. Проект парогазовой ТЭЦ с паровой турбиной Т-250/300-240 / Девянин А.В., Цанев С.В., Буров В.Д. // Тез. докл. XIII Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». МЭИ, 2007.
6. Разработка методики оптимизации параметров тепловой схемы парогазовых ТЭЦ с котлами-утилизаторами трех давлений / Девянин А.В., Цанев С.В. Тез. докл. XIV Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». МЭИ, 2008. с. 147.
7. Парогазовые установки с котлами-утилизаторами трех давлений / Девянин А.В., Сигидов Я.Ю., Буров В.Д., Цанев С.В., Старостин Д.Н. // Сборник трудов 3-й международной школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика». С. 104-110.

Подписано к печати 06.04.09 г. л.

Печ. л. 1,25

Тираж 100

Заказ 77

Типография МЭИ (ТУ), Красноказарменная, 13.