
На правах рукописи

МЕЛЬНИКОВ Юрий Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫБОРА
ТЕПЛОВЫХ СХЕМ И ПАРАМЕТРОВ
ОДНОЦЕЛЕВЫХ УТИЛИЗАЦИОННЫХ
ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические
системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2009

Работа выполнена на кафедре тепловых электрических станций ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор **Мошкарин Андрей Васильевич**

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор **Андрюшин Александр Васильевич**

кандидат технических наук, доцент **Масленников Владимир Владимирович**

Ведущая организация: ОАО «Зарубежэнергопроект»

Защита состоится «26» июня 2009 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» по адресу:

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Автореферат разослан «25» мая 2009 г.

И.О. учёного секретаря
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Митькин Ю.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсивное развитие газотурбостроения в течение последних десятилетий, обусловленное успехами в материаловедении, технологиях проектирования и эксплуатации газотурбинных установок (ГТУ) и их элементов, привело к росту КПД ГТУ до 45 % и единичной мощности до 350 МВт. Парогазовые установки утилизационного типа (ПГУ) на основе современных ГТУ являются наиболее совершенными энергетическими установками на газообразном топливе по показателям экономичности и маневренности. По различным оценкам, доля ПГУ в мировой генерации электроэнергии в ближайшем будущем составит до 49 %.

Обзор создаваемых в настоящее время парогазовых энергоблоков показывает широкое разнообразие как типов используемых ГТУ, так и схем и параметров паротурбинной части ПГУ. Установки различаются по числу главных двигателей (моноблоки, дубль-блоки, трипл-блоки), числу контуров котла-утилизатора (КУ) (одно-, двух-, трехконтурные и котлы-утилизаторы с промежуточным перегревом), типу их питания (последовательное и параллельное), признаку наличия камер дожигания выхлопных газов ГТУ и т.д. Разброс значений давлений в контурах КУ однотипных ПГУ достигает 20..30 %.

Первые исследования, посвященные оптимизации параметров ПГУ по критерию их максимальной тепловой экономичности, проводились еще в 60-е годы прошлого века. К настоящему времени сотрудниками кафедры тепловых электростанций МЭИ, ИГЭУ, СГТУ, СПбГТУ проработаны методические основы выбора оптимальных параметров одноцелевых ПГУ с различным числом контуров КУ. Базой для этого выбора принято считать параметры номинального режима работы ГТУ.

Исследования параметров ПГУ, основанные на показателях номинального режима ГТУ, имеют существенный недостаток. Важнейшей особенностью газотурбинных установок является зависимость показателей их работы от параметров наружного воздуха (давление, температура) и относительной мощности установки. Вопрос влияния этих зависимостей на показатели работы ПГУ в целом остается малоизученным. В ряде работ отечественных и зарубежных авторов приводятся результаты испытаний конкретных установок, подтверждающие факт существенного влияния параметров наружного воздуха и загрузки ГТУ на показатели парогазовых блоков, но отсутствует анализ причин этих изменений. Между тем, сравнение парогазовых блоков по их параметрам в стандартных условиях явно недостаточно, так как не отражает условий работы этих блоков. В силу этих же причин оптимизация схем и параметров паротурбинной части ПГУ, основанная на номинальных параметрах работы ГТУ, не всегда приводит к корректным результатам.

Таким образом, анализ влияния режимов работы ГТУ на показатели ПГУ, выявление отличительных особенностей режимов работы ПГУ по сравнению с паротурбинными установками (ПТУ), внесение в методику выбора опти-

мальных параметров ПГУ учета режимных факторов и технических ограничений являются актуальными задачами энергетики.

Целью диссертации является совершенствование выбора тепловых схем и параметров одноцелевых ПГУ на основе исследований режимов их работы.

Задачи диссертации:

- разработка методики численного исследования статических режимов работы ПГУ с использованием программного комплекса «Boiler Designer»;
- проведение исследований режимов работы ПГУ с выявлением диапазонов изменения параметров ПГУ в регулировочном диапазоне с учетом климатических характеристик ГТУ;
- определение отличительных особенностей режимов работы ПГУ разных типов в сравнении с ПТУ и разработка рекомендаций к совместной работе ПГУ и ПТУ;
- проведение оптимизации параметров ПГУ различных типов с учетом режимных и технических ограничений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые на основе численного анализа показателей работы утилизационных ПГУ двух и трех давлений на частичных нагрузках показано, что КПД парогазовых блоков менее устойчив к снижению нагрузки по сравнению с КПД паросиловых блоков, поэтому при совместной работе ПГУ и ПТУ разгрузка последней выгоднее по условию минимального прироста расхода условного топлива;
- в методику выбора оптимальных параметров утилизационных ПГУ внесены дополнения, обеспечивающие учет режимных и технических ограничений по минимальным значениям давлений пара в нижнем контуре и температуре уходящих газов котла-утилизатора.

Практическая ценность результатов состоит в следующем:

- для блоков ПГУ мощностью 325 и 400 МВт выявлены пределы изменения параметров в регулировочном диапазоне ГТУ различных типов производства Siemens, Alstom, ОАО «Сатурн-Газовые турбины» с учетом их климатических характеристик;
- показано, что применение дожигания на ПГУ с ГТУ SGT5-4000F фирмы Siemens при незначительном снижении КПД (0,1..0,4 %) позволяет при низких температурах наружного воздуха обеспечить температуру пара перед паровой турбиной 540 °С;
- показано, что в качестве паротурбинной части блока ПГУ-800 может использоваться паровая турбина К-300-23,5 после перевода ее на пониженные параметры пара и реконструкции проточной части;
- показано, что с разгрузкой до 50 % КПД моноблоков ПГУ снижается на 3,5..5 %, а КПД паротурбинных блоков – на 1,5 %, поэтому при совместной работе ПГУ и ПТУ разгрузка последней выгоднее по критерию минимального прироста удельного расхода условного топлива;
- показано, что перевод дубль-блоков ПГУ на малых нагрузках (менее 50 %) в режим «полублока» позволит сохранить КПД ПГУ на высоком уровне

не и получить экономию в удельном расходе топлива около 12 % по сравнению с работой в режиме «блока».

Автор защищает:

- алгоритм численного исследования показателей утилизационных моно- и дубль-блоков ПГУ в режимах частичных нагрузок с учетом климатических характеристик ГТУ;
- результаты анализа показателей блоков ПГУ-325 и ПГУ-400 с газовыми турбинами SGT5-4000F (Siemens), GT26 (Alstom) и ГТД-110 (Сатурн-Газовые турбины) в переменных режимах работы;
- результаты оптимизации параметров утилизационных ПГУ двух и трех давлений с учётом режимов их работы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием нормативного метода расчета котельных агрегатов и совпадением результатов расчетного анализа с результатами теплотехнических испытаний эксплуатируемых ПГУ.

Личный вклад автора состоит в постановке задач и цели исследования, разработке алгоритма исследования показателей ПГУ в регулировочном диапазоне с учетом климатических характеристик ГТУ; проведении анализа этих показателей для ряда современных ПГУ; дополнении методических основ выбора оптимальных параметров ПГУ.

Внедрение результатов работы. Ряд выводов, полученных в ходе диссертационного исследования, использовались экспертами на тендерных торгах на поставку ГТУ для ПГУ генерирующих компаний.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на региональных и международных научно-технических конференциях:

- IV Российская научно-практическая конференция «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования» (г. Иваново, 2005 г.);
- XII, XIII, XV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2006, 2007, 2009 гг.);
- IV Региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (г. Ульяновск, 2006);
- Региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Теплоэнергетика» (г. Иваново, 2006, 2007, 2008, 2009 гг.);
- III Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы энергетике» (г. Екатеринбург, 2007);
- IV Межрегиональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика» (г. Смоленск, 2007 г.);

- XIV, XVI Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии - Бернадосовские чтения» (г. Иваново, 2007, 2009 г.).

Список публикаций. По материалам диссертационной работы опубликовано 32 печатных работы, в том числе 11 статей в журналах по списку ВАК, 4 статьи в других журналах, 15 тезисов докладов, а также в учебном и учебно-методическом пособиях.

Содержание и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, библиографического списка использованной литературы из 96 наименований и 4 приложения. Объем диссертации, включая приложения, составляет 207 страниц машинописного текста. Работа содержит 100 рисунков и 42 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена аналитическому обзору развития парогазовых технологий и исследований по выбору структуры и параметров тепловых схем утилизационных ПГУ.

Первые ПГУ появились в Германии в 1913-1917 гг. Их развитие в первой половине XX в. связывают с именами европейских инженеров Парсонса, Кузьминского, Штольца, Шюле, Хольцварта, Арманго, Лавалья, Караводина. В СССР исследования ПГУ проводились сотрудниками и учеными ЦКТИ (А.Н. Ложкин и др.), Одесского политехнического института (Д.П. Гохштейн и др.), Саратовского политехнического института (А.И. Андрющенко и др.), Ленинградского политехнического института (И.И. Кириллов, В.А. Зысин и др.), а также учеными ЭНИНа, ВТИ и др. Показано, что начиная с 60-х годов XX в., практическое внедрение газотурбинных и парогазовых технологий в СССР существенно отставало от ведущих стран мира. К настоящему времени в мировых лидерах находятся энергомашиностроительные компании Европы, США и Японии – Siemens, Alstom, General Electric, Mitsubishi. С конца 1990-х годов ежегодный ввод ГТУ составляет не менее 100 ГВт.

Отмечено, что на тепловую эффективность утилизационных ПГУ в условиях заданной ГТУ оказывают влияние число контуров КУ, начальные параметры пара в контурах, а также величины температурных напоров в пароперегревательных и испарительных поверхностях КУ.

Выполнен обзор существующих тепловых схем утилизационных ПГУ. Выявлено большое разнообразие схем ПГУ (моноблоки, дубль-блоки, трипл-блоки, наличие или отсутствие промежуточного перегрева, наличие или отсутствие дожигания топлива в среде уходящих газов ГТУ, различия в компоновке поверхностей нагрева КУ и др.) и их параметров. Отмечено, что разброс значений давлений пара в контурах однотипных ПГУ может достигать 20 %.

блоков 300 МВт), а также действующих паровых турбин К-300-23,5 (дубль-блок 800 МВт).

Проект ПГУ-285 предложен в 2006 г. сотрудниками кафедры ТЭС ИГЭУ при участии автора. ПГУ-285 включает в свой состав ГТУ SGT5-3000E Siemens, паровую турбину К-90-9 ЛМЗ, котел-утилизатор трех давлений с промперегревом (см. рис. 1). Для условий Костромской ГРЭС получены следующие энергетические показатели: мощность нетто 287 МВт, КПД ПГУ 54,5 %. Размещать турбинное оборудование ПГУ предлагается по одновальной схеме в существующих строительных конструкциях главного корпуса ГРЭС.

Дубль-блок ПГУ-800 включает в свой состав две ГТУ мощностью не менее 270 МВт, котлы-утилизаторы трех давлений с промперегревом, а также паровую турбину К-300-23,5, переведенную на докритические параметры пара за счет модернизации системы паровпуска, регулирующих ступеней, последних ступеней ЦНД, закрытия патрубков нерегулируемых отборов и т.д. На основе вариантных расчетов тепловой схемы показано, что существующие на мировом рынке ГТУ фирм Siemens, Alstom, General Electric, Mitsubishi требуемого класса мощности обеспечивают ПГУ-800 близкие энергетические показатели: мощность 770..800 МВт, КПД нетто 54,9...56,4 %.

Для оценки возможности использования турбины К-300-23,5 в паротурбинном цикле ПГУ выполнен анализ изменения объемных пропусков по цилиндрам паровой турбины после ее перевода на пониженные параметры. Расчеты показали, что это изменение составляет не более 18 % (рис. 2). Наибольшее изменение объемных пропусков наблюдается в ЦНД, что потребует его реконструкции.

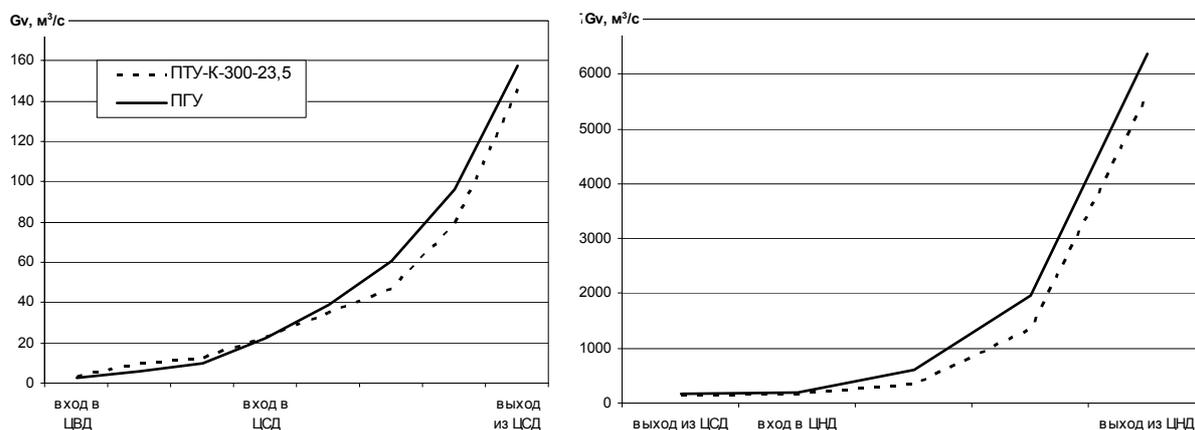


Рис. 2. Сравнение объемных пропусков пара в турбине К-300-23,5 до и после реконструкции (ПГУ-800 с 2хГТУ SGT5-4000F)

Результаты расчетов и технические рекомендации были использованы ЛМЗ и Подольским машиностроительным заводом при разработке проекта ПГУ-800 для Киришской ГРЭС – филиала ОГК-6.

Моноблок ПГУ-400 включает в свой состав мощную ГТУ (от 270 МВт) и паровую турбину мощностью около 120 МВт. Этот энергоблок – один из

наиболее распространенных типов генерирующих установок на природном газе в мировой энергетике. Расчеты показали, что использование ГТУ SGT5-4000F Siemens и GT26 Alstom дает следующие энергетические показатели: мощность 406...416 МВт и КПД ПГУ нетто 55,8...56,1 % (большие значения – для GT26).

В третьей главе выполнена оценка зависимости показателей ПГУ от относительной нагрузки ГТУ и температуры наружного воздуха. Изложен алгоритм численного исследования показателей ПГУ на частичных нагрузках с учетом климатических характеристик ГТУ. Приведены результаты исследований ПГУ-285, ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F Siemens (с дожиганием и без) и GT26 Alstom, а также ПГУ-325 с ГТД-110 «Сатурн-Газовые Турбины». Дан сравнительный анализ эффективности снижения нагрузки на паротурбинных и одноцелевых утилизационных парогазовых установках.

Энергетические ГТУ большую часть жизненного цикла работают в режимах, отличных от номинального. Для их расчета некоторые авторы рекомендуют использовать методы теории газодинамического подобия, основанные на приведении параметров работы ГТУ в таких режимах к стандартным условиям. Однако использовать эти методы для расчета реальных ГТУ часто представляется невозможным, так как они не учитывают работу вспомогательных систем. Так, осевые компрессоры ГТУ оснащаются входными и поворотными направляющими лопаточными аппаратами, способными изменять проходные сечения воздушного тракта установки в различных режимах; имеются системы подогрева воздуха перед компрессором, обеспечивающие стабильную работу установки при низких температурах наружного воздуха. Практический интерес представляют только климатические и режимные характеристики, предоставляемые производителями.

В утилизационных ПГУ параметры выхлопных газов ГТУ оказывают определяющее влияние на работу котла-утилизатора. Изменение как температуры, так и расхода выхлопных газов ГТУ обуславливает изменение теплоты, утилизируемой в КУ, и интенсивность теплообмена (за счет изменения плотности, расхода газов и скорости обтекания ими поверхностей нагрева КУ).

В свою очередь, режим работы КУ определяет условия работы паротурбинной установки. Изменение давлений в контурах КУ ведёт к изменению теплоперепадов в цилиндрах ПТУ, а изменение расхода пара в этих контурах влияет на значение внутренних относительных КПД цилиндров и величину вырабатываемой мощности.

Использование промежуточного перегрева еще более усложняет систему: теплосъем в промежуточном пароперегревателе зависит от параметров пара на выхлопе ЦВД и, в то же время, определяет тепловой режим во всех последующих по ходу газов поверхностях нагрева КУ.

Комплексное изучение характеристик ПГУ в режимах работы, отличных от номинального, возможно только с учетом всех отмеченных взаимосвязей элементов установки, и невозможно без помощи ЭВМ и современных специализированных программных продуктов.

В целях исследования характеристик парогазовых энергоблоков был разработан алгоритм расчета показателей ПГУ утилизационного типа в режимах, отличных от номинального, с использованием САПР Boiler Designer. (рис. 3).

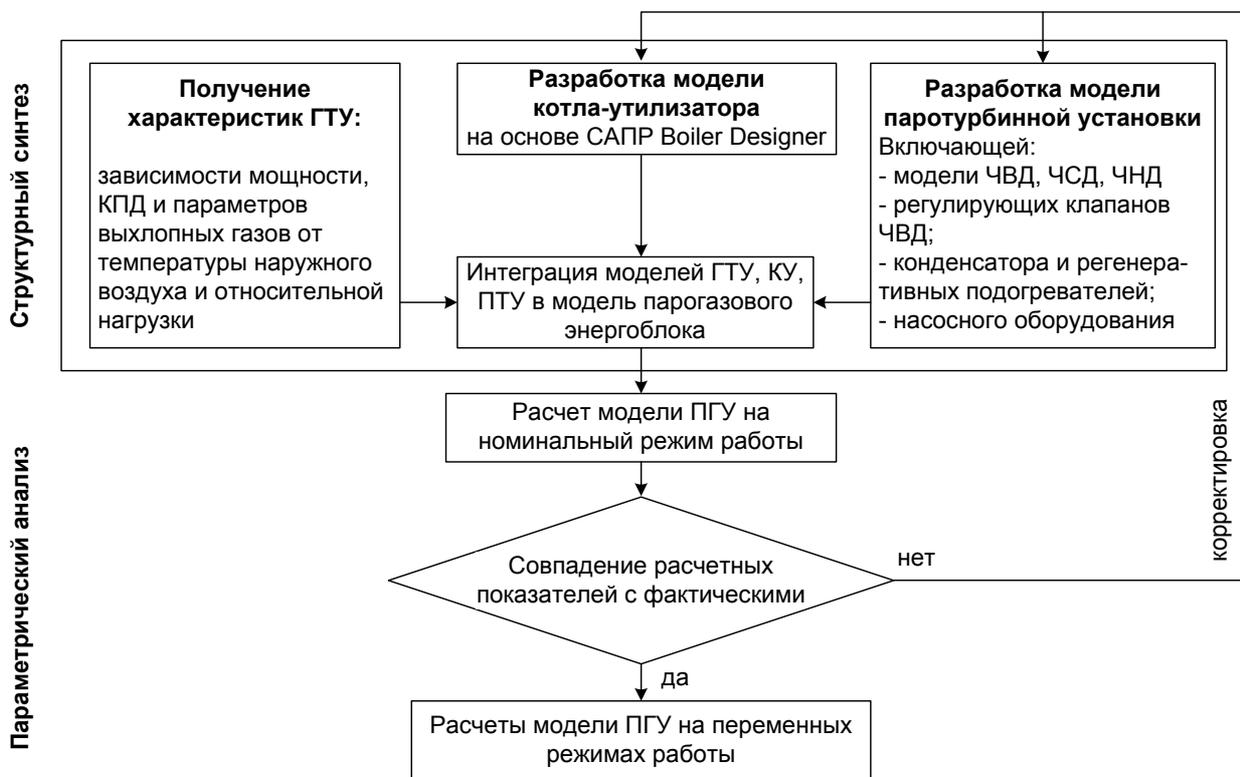


Рис. 3. Алгоритм исследования показателей ПГУ на частичных нагрузках

На основе данных компаний Siemens и Alstom получены регрессионные зависимости, позволяющие определить показатели ГТУ SGT5-3000E, SGT5-4000F и GT26 (расход $G_{ВЫХ}$ и температуру $t_{ВЫХ}$ выхлопных газов, мощность $N_{ГТУ}$ и КПД $\eta_{ГТУ}$) в зависимости от температуры наружного воздуха t_{HB} [°C] и относительной нагрузки n [%].

Зависимости $G_{ВЫХ}$ [кг/с], $t_{ВЫХ}$ [°C], $N_{ГТУ}$ [МВт] и $\eta_{ГТУ}$ [%] для GT26 Alstom имеют вид:

$$\eta_{ГТУ} = 42,5224 - \frac{694,49}{n} + 0,111T_{HB} - 6,624 \times 10^{-4} T_{HB}^2; \quad (1)$$

$$G_{ВЫХ} = -\frac{55936}{n-176,55} + \frac{0,1573}{n-176,55} T_{HB}^2; \quad (2)$$

$$t_{ВЫХ} = 786,21 - 1,782n + 0,4035T_{HB} + 0,002216T_{HB}^2 - 54,636 \frac{T_{HB}}{n}; \quad (3)$$

$$N_{ГТУ} = 3,4911n - 8,95 + T_{HB}^2 (-0,000043605n + 0,0001214); \quad (4)$$

$$T_{HB} = t_{HB} + 100. \quad (5)$$

Аналогичные зависимости получены для ГТУ SGT5-4000F и SGT5-3000E Siemens. Полученные модели использованы для формирования исходных данных к вариантным расчетам статических режимов блоков ПГУ-285 и ПГУ-400.

Для каждого энергоблока (ПГУ-285, ПГУ-400 с GT26 и ПГУ-400 с SGT5-4000F) на основе конструкторских разработок созданы модели котлов-утилизаторов горизонтальной компоновки. В ходе разработки предполагалось, что поверхности нагрева КУ собираются из унифицированных секций, которые изготовлены из вертикально расположенных в два ряда оребренных труб, вверху и внизу сообщаемых с коллекторами. Диаметры труб, шаги, параметры оребрения и компоновки секций принимались стандартными для продукции Подольского машиностроительного завода – крупнейшего производителя котлов-утилизаторов в России.

Разработка моделей паротурбинных установок ПГУ и синтез ГТУ, КУ и ПТУ в модель единого энергоблока осуществлялась в сотрудничестве с компанией «ОПТСИМ-К» - разработчиком САПР Boiler Designer – и сопровождалась доработкой и отладкой программы до состояния, обеспечивающего проведение расчетов схем ПГУ в переменных режимах.

Выполнен анализ показателей работы моноблока ПГУ-285 с ГТУ SGT5-3000E Siemens в режимах частичной нагрузки при различных значениях температуры наружного воздуха.

При разгрузке до 60 % КПД ПГУ-285 снижается с 54,6 до 51,5 %. Температура наружного воздуха слабо влияет на КПД ПГУ: во всем диапазоне $t_{\text{НВ}}$ КПД сохраняется в пределах 54...54,5 %. Мощность ПГУ со снижением $t_{\text{НВ}}$ линейно растет: при снижении температуры с +25 до -15 °С мощность возрастает с 264 до 311 МВт (на 18 %).

Увеличение мощности ПГУ в зимний период вызвано снижением потребляемой мощности компрессора ГТУ из-за уменьшения удельных объемов воздуха при снижении его температуры. Показано, что значения давлений пара во всех контурах при разгрузке до 60 % снижаются в среднем на 25-30 %. Это связано с уменьшением теплоты, отводимой от ГТУ в котел-утилизатор, вследствие резкого снижения температуры выхлопных газов, при низких $t_{\text{НВ}}$ сопровождающегося еще и уменьшением их расхода.

Расчёты показали, что расходы пара в цилиндры ПТУ также в основном определяются величиной относительной нагрузки ГТУ и расходом выхлопных газов.

По результатам расчетов установлено, что параметры работы котла-утилизатора ПГУ на частичных нагрузках ГТУ изменяются аналогично показателям энергетических паровых котлов.

Ввиду незначительного изменения теплоперепадов в паровой турбине определяющее влияние на изменение ее мощности оказывает изменение паропроизводительности КУ. Мощность, потребляемая главными насосами ПТУ (питательные и конденсационный), значительно снижается с разгрузкой

блока. Это снижение достигает 40 % при разгрузке ГТУ до 60 % от номинальной мощности.

КПД ПГУ практически не зависит от n и $t_{НВ}$ при условии разгрузки ПГУ на скользких параметрах пара до 50 %.

Таким образом, на изменение КПД ПГУ влияние оказывает только изменение КПД ГТУ и КПД КУ, причем превалирует влияние первого фактора. Влияние $t_{НВ}$ на КПД ГТУ и КПД КУ противоположно, поэтому КПД ПГУ от $t_{НВ}$ практически не зависит, хотя при высоких и низких температурах наружного воздуха КПД ПГУ чуть меньше из-за снижения КПД КУ (в первом случае) и КПД ГТУ (во втором).

Диапазон изменения мощности при температуре 5 °С составляет 190..290 МВт, пределы изменения КПД 52..55 %. Снижение $t_{НВ}$ с 15 °С до -15 °С приводит к падению КПД ПГУ примерно на 1 % и росту мощности на 12 %.

Проведен анализ показателей работы моноблока ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F Siemens (рис. 4) и GT26 Alstom (рис. 5) в режимах частичной нагрузки при различных значениях температуры наружного воздуха (табл. 1).

Энергоблок ПГУ-400 с ГТУ GT26 обеспечивает лучшие энергетические показатели как при разгрузке, так и при снижении $t_{НВ}$. Температура выхлопных газов ГТУ при разгрузке не уменьшается, как у SGT5-4000F, а увеличивается на 50 °С. Расход выхлопных газов GT26 при снижении $t_{НВ}$ увеличивается значительно (12 % против 5 %), в результате чего паропроизводительность КУ возрастает на 7 % (0 % у SGT5-4000F), а тепловая мощность КУ – на 8 % (0 % у SGT5-4000F). Мощность ПГУ энергоблока с GT26 при снижении $t_{НВ}$ не уменьшается на 4 %, а увеличивается на 8 %. КПД ПГУ-400 с GT26 при разгрузке до 60 % снижается всего на 2,3 % (абс.), а мощность на 36 % (у ПГУ с SGT5-4000F соответственно 4,5 % и 40 %). Снижение $t_{НВ}$ до -30 °С увеличивает мощность ПГУ на 15 %, при этом КПД практически не меняется (у ПГУ с SGT5-4000F он снижается на 1,8 % (абс.)).

Такие отличия объясняются конструктивными особенностями GT26. ГТУ снабжена двумя индивидуально управляемыми камерами сгорания с последовательным горением топлива (за счет которых организуется промежуточный подогрев газов, способствующий «карнотизации» газотурбинного цикла с повышением его КПД) и тремя регулируемые направляющими лопаточными аппаратами в воздушном компрессоре.

Преимущества GT26 в тепловой эффективности особенно очевидны при работе ее на пониженных $t_{НВ}$, что позволяет признать ГТУ GT26 более предпочтительной для сооружения ПГУ-400 на территории России, на большей части которой среднегодовая $t_{НВ}$ отрицательна.

При низких $t_{НВ}$ для повышения температуры газов на входе в КУ можно применить дожигание топлива. Дожигание позволит повысить температурные напоры в поверхностях КУ, паропроизводительность, теплоперепады и мощность ПГУ. Дожигание будет особенно целесообразно для ПГУ с газовыми турбинами, температура выхлопных газов которых падает со снижением $t_{НВ}$ (например, SGT5-4000F Siemens).

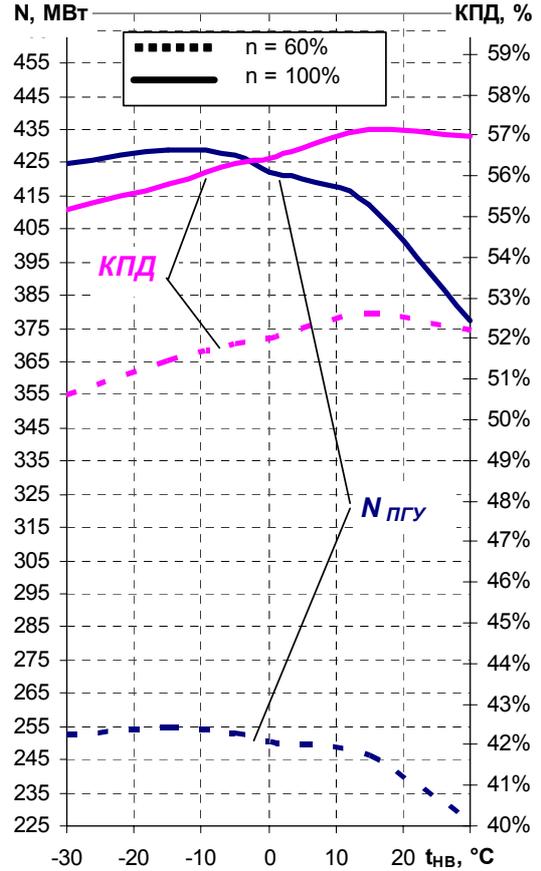
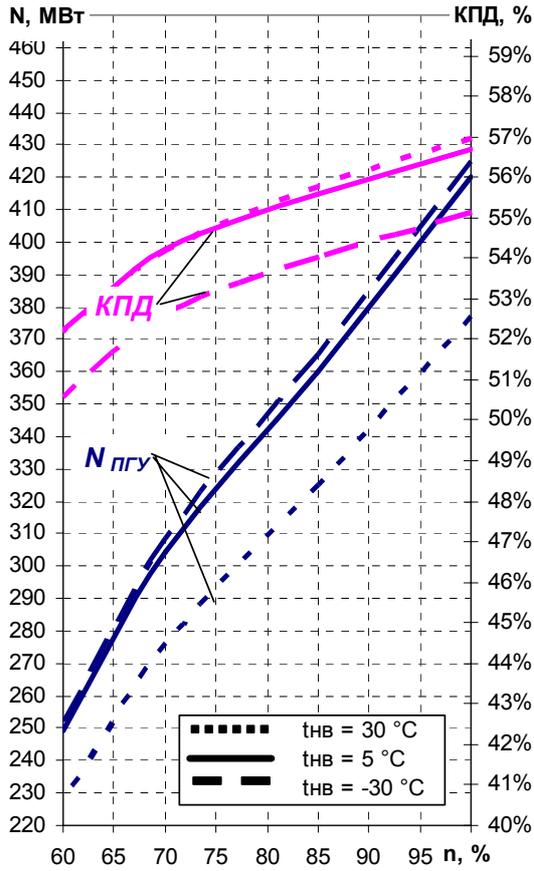


Рис. 4. Зависимость КПД и мощности ПГУ-400 с SGT5-4000F Siemens от n и t_{нв}

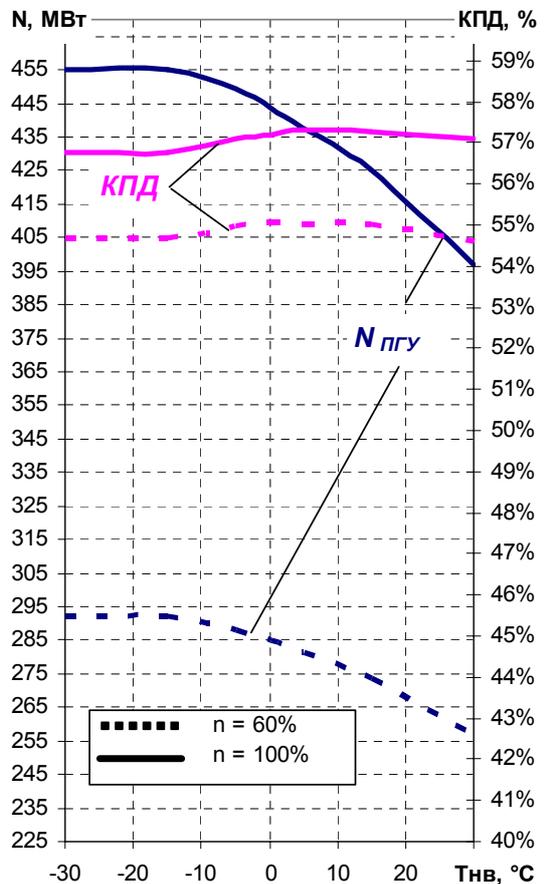
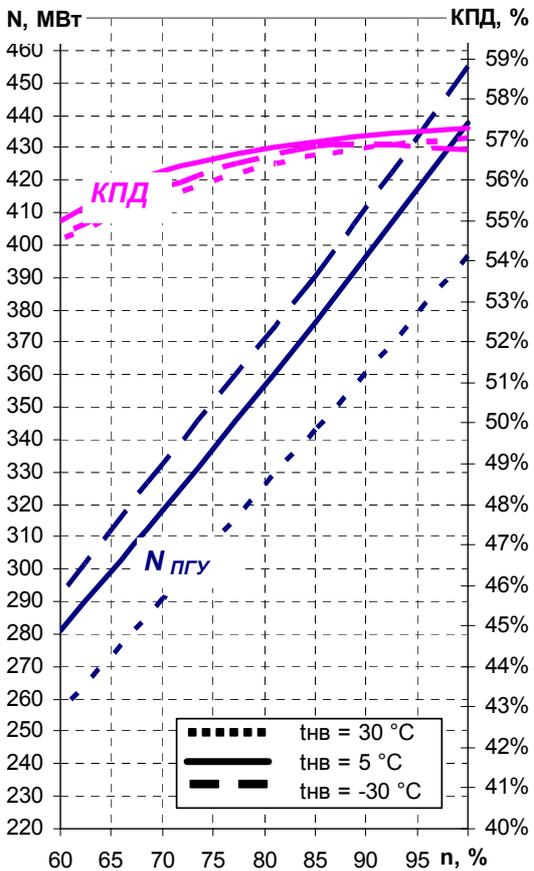


Рис. 5. Зависимость КПД и мощности ПГУ-400 с GT26 Alstom от n и t_{HB}
 Таблица 1. Результаты расчетов показателей ПГУ-400 с ГТУ фирм Alstom и Siemens

Показатели	Тип ГТУ	
	SGT5-4000F	GT26
Максимальное изменение температуры выхлопных газов ГТУ при разгрузке до 60 %, °С	- 10	+ 50
Падение температуры выхлопных газов при снижении t_{HB} с 15 до -30°С, %	40	30
Увеличение расхода выхлопных газов при снижении t_{HB} с 15 до -30 °С, %	5	12
Уменьшение расхода выхлопных газов при разгрузке до 60 %, %	27	29
Снижение КПД ГТУ при разгрузке до 60 %, % (абс.)	4,8	4,6
Увеличение КПД ГТУ при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, % (абс.)	1,4	1,1
Увеличение мощности ГТУ при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, %	20	19
Снижение давлений в контурах ПГУ при разгрузке до 60 %, %	30	30
Уменьшение расхода пара при разгрузке до 60 %, %	30	24
Увеличение расхода пара при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, %	0	7
Относительное изменение скоростей среды при изменении n и t_{HB} , %	10...30	10...30
Снижение скоростей газов при разгрузке до 60 %, %	30	29
Увеличение скоростей газов при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, %	13	14
Уменьшение коэффициента теплопередачи при разгрузке до 60 %, %	24	22
Увеличение коэффициента теплопередачи при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, %	10	9
Уменьшение теплопроизводительности КУ при разгрузке до 60 %, %	29	24
Увеличение теплопроизводительности КУ при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, %	0	8
Уменьшение теплоты газов при разгрузке до 60 %, %	31	28
Увеличение теплоты газов при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, %	5	9
Увеличение КПД КУ при разгрузке до 60 %, % (абс.)	1,7	3
Уменьшение КПД КУ при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, % (абс.)	2,8	1,2
Уменьшение мощности ПГУ при разгрузке до 60%, %	32	26
Изменение мощности ПГУ при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, %	-4	+8
Уменьшение мощности насосов ПГУ при разгрузке до 60%, %	26	26
Изменение мощности насосов ПГУ при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, %	-4	+8
Изменение КПД ПГУ при разгрузке до 60 %, % (абс.)	+0,7	-0,3
Уменьшение КПД ПГУ при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, % (абс.)	1,3	0
Уменьшение КПД ПГУ при разгрузке до 60 %, % (абс.)	4,5	2,3
Уменьшение КПД ПГУ при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, % (абс.)	1,8	0,3
Уменьшение мощности ПГУ при разгрузке до 60 %, %	40	36
Увеличение мощности ПГУ при снижении t_{HB} с 30 до -30 °С, %	13	15

Для расчетной оценки влияния дожигания топлива на показатели ПГУ-400 принималось, что камера дожигания расположена перед КУ и обеспечивает получение равномерного температурного поля по ширине газотока;

температуры пара высокого давления и пара на выходе из промперегревателя поддерживаются на уровне 540 °С.

Установлено, что:

- для обеспечения температуры острого пара 540 °С необходимо поддерживать температуру газов на входе в КУ не ниже 585–590 °С, что достигается на различных режимах при степени дожигания от 0 до 6,8 % (максимальное значение соответствует $t_{НВ}$ –30 °С и 100 % нагрузке);

- применение дожигания ведет к снижению КПД ПГУ на 0,1..0,4 % абс. (рис. 6);

- дожигание позволяет увеличить паропроизводительность КУ, теплоперепад в ПТУ и ее мощность (рис. 7);

- конечная влажность пара не превышает 7 % и уменьшается с разгрузкой.

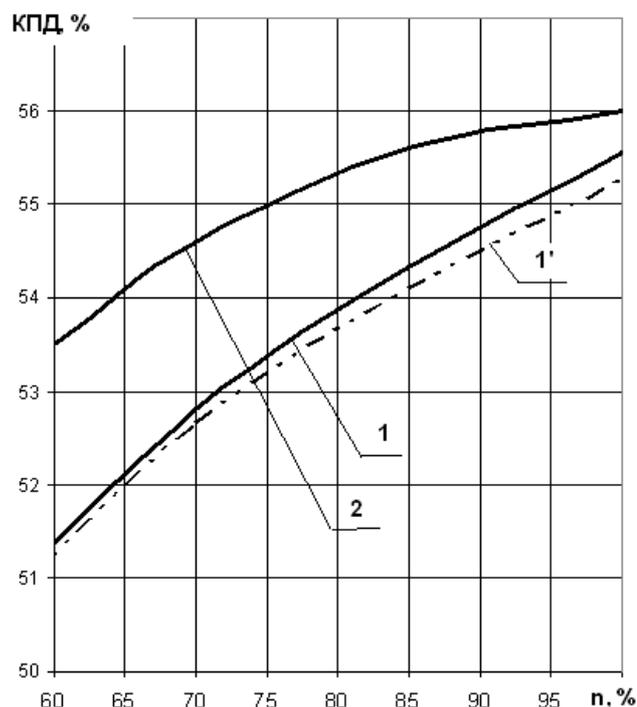


Рис. 6. Изменение КПД ПГУ-400 при разгрузке ГТУ ($t_{НВ} = 5$ °С): 1 – для SGT5-4000F без дожигания; 1' – для SGT5-4000F с дожиганием; 2 – для GT26

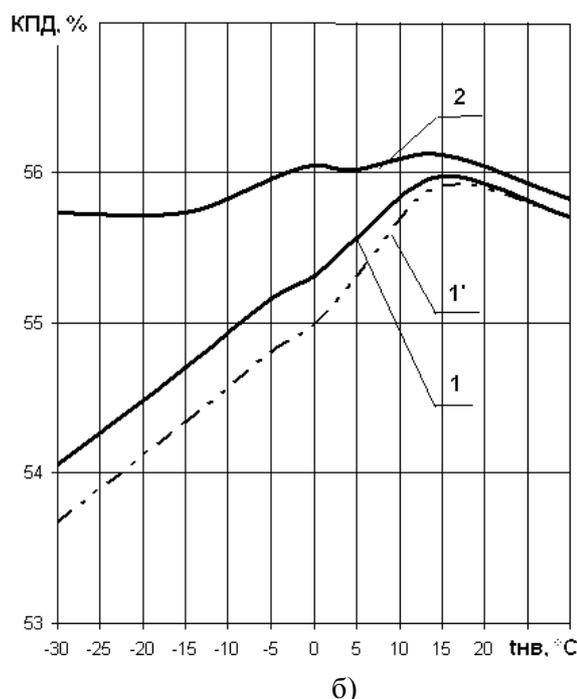
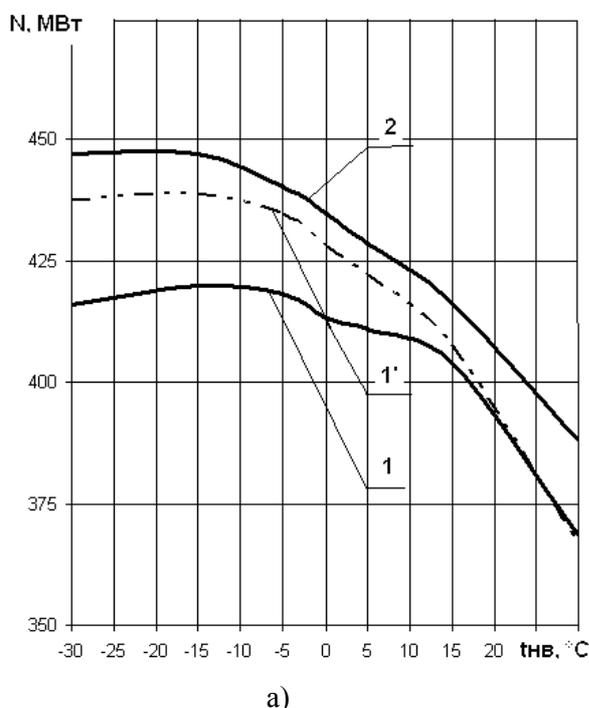


Рис. 7. Климатические характеристики мощности (а) и КПД ПГУ-400 (б) на 100 %-й нагрузке ГТУ: 1 – для SGT5-4000F без дожигания; 1' – для SGT5-4000F с дожиганием; 2 – для GT26

Падение значения КПД в ПГУ-400 с ГТУ SGT5–4000F со снижением температуры наружного воздуха от 15° до –30 °С достигает 2 %, и при использовании дожигания – 2,3 % (абс.).

В результате перевооружения ТЭС на основе ПГУ вероятной становится ситуация, при которой одной генерирующей компании будут принадлежать как паросиловые энергоблоки, так и парогазовые. Следовательно, возникнет необходимость оптимизации их параллельной работы по критерию минимального прироста удельного расхода условного топлива.

По тепловой экономичности паротурбинные блоки уступают парогазовым, но более устойчивы к сохранению высоких значений КПД при снижении нагрузки (рис. 8). Это означает, что при разгрузке блоков разных типов приоритет (по критерию тепловой экономичности) следует отдавать паросиловым блокам.

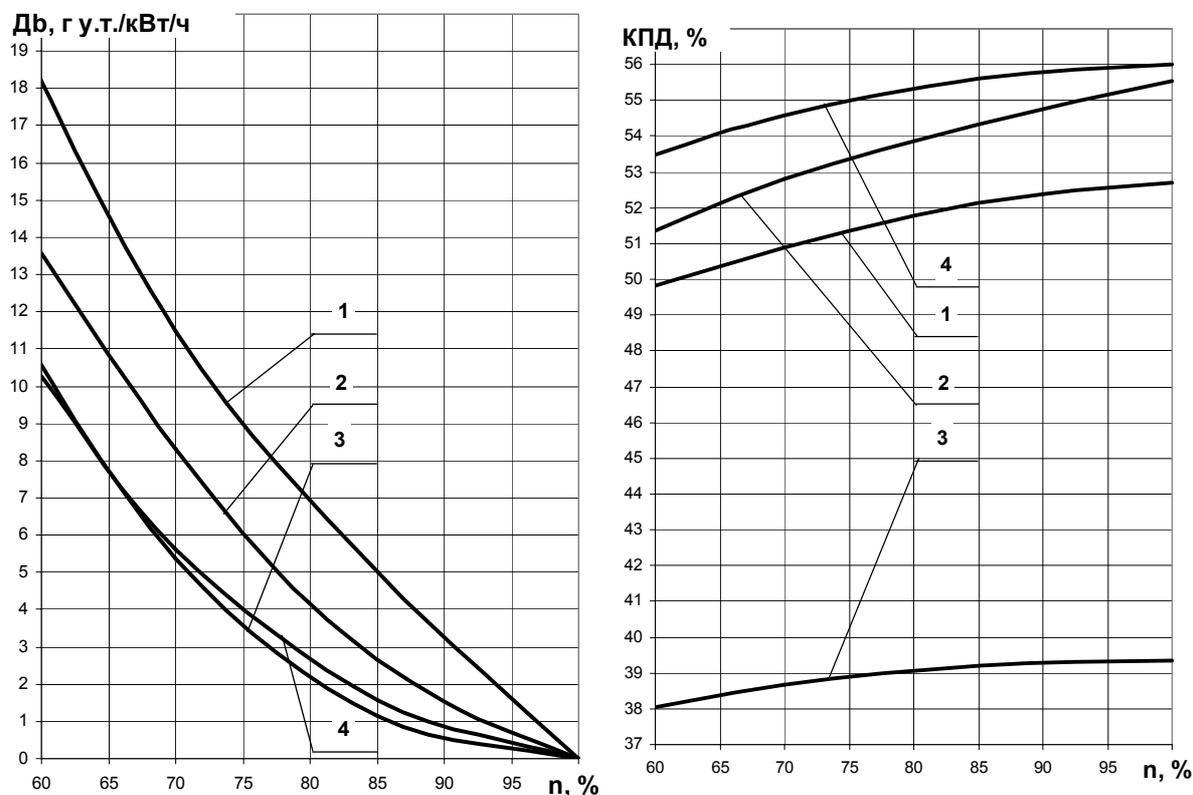


Рис. 8. Увеличение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии и снижение КПД нетто при разгрузке ряда мощных энергоблоков ($t_{\text{нв}} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$): 1- ПГУ-400 с SGT5-4000F, 2 – ПГУ-285 с SGT5-3000E, 3 – ПГУ К-300-23,5; 4 – ПГУ-400 с GT26

Численная оценка показателей дубль-блока ПГУ-325 в режимах глубокой разгрузки выполнена на основе математической модели ПГУ-325 в программе Boiler Designer. Модель верифицирована с использованием результатов испытаний ПГУ-325 «Ивановских ПГУ».

В первой серии расчетов предполагалось, что разгрузка энергоблока осуществляется за счет сброса нагрузки на обеих работающих ГТУ (режим «блока») (рис. 9).

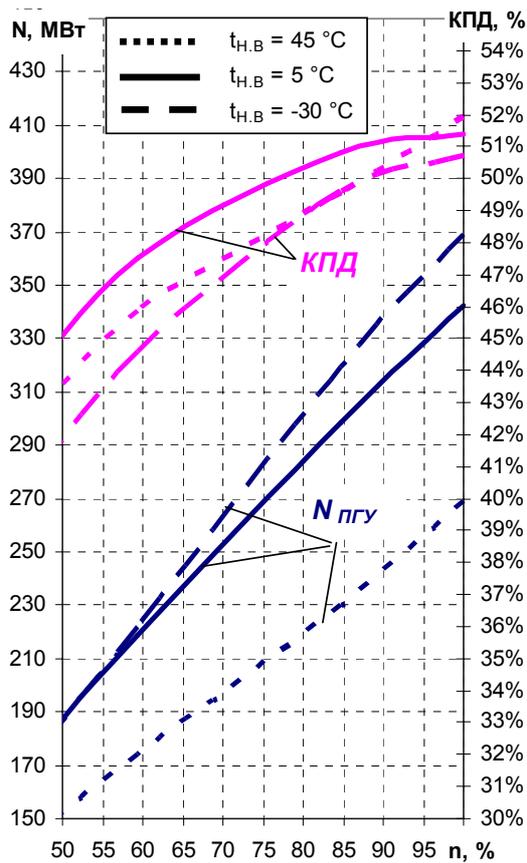


Рис. 9. Зависимость мощности и КПД ПГУ-325 от n и $t_{НВ}$

КПД ПГУ с разгрузкой на 47 % (на 150 МВт) снижается с 51,5 до 45 %. Номинальный КПД сохраняется на уровне 50..52 % в интервале $t_{НВ}$ от -40 до +45 °С. Вместе с тем, из-за эффекта ухудшения утилизации теплоты выхлопных газов при низких значениях $t_{НВ}$ и n КПД ПГУ падает вместе с мощностью ПТУ.

При разгрузке до 50 % удельный расход топлива на ПГУ-325 возрастает примерно на 13 %.

Вторая серия расчетов ПГУ-325 была проделана для случая глубокой разгрузки с отключением одной из ГТУ и котла-утилизатора, подключенного к ней (режим «полублока»).

В этом случае расход пара через цилиндры паровой турбины (при работе одной ГТУ в номинальном режиме) будет примерно в 2 раза меньше проект-

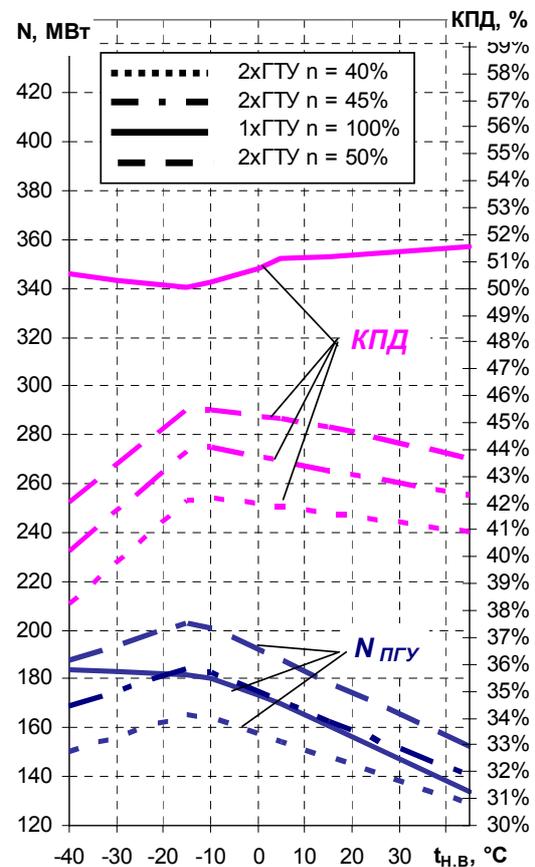
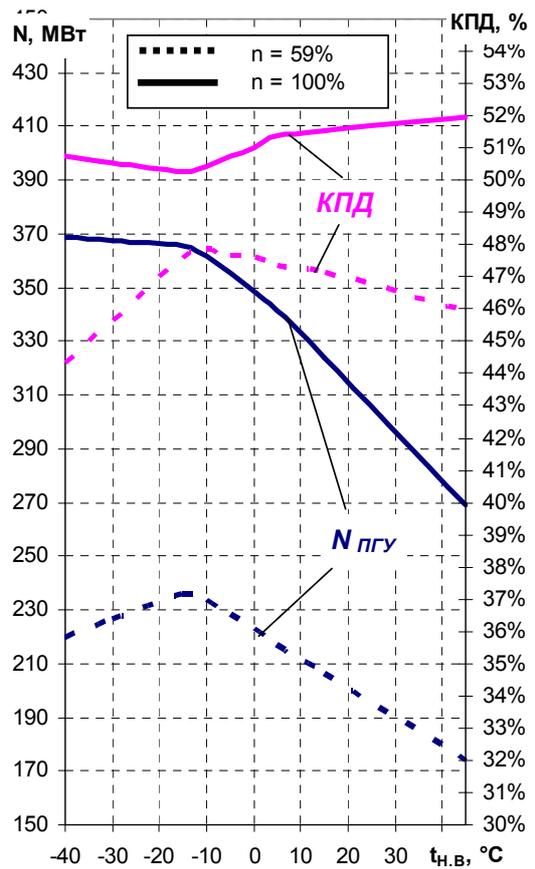


Рис. 10. Зависимость мощности и КПД ПГУ-325 от n и $t_{НВ}$

ного, однако это не оказывает заметного влияния на внутренние относительные КПД цилиндров паровой турбины.

Во всем диапазоне температур наружного воздуха работа с одной ГТУ позволяет поддерживать мощность ПГУ не меньше, чем в режиме «блока» с загрузкой обеих ГТУ около 44 % (рис. 10).

В режиме «блока» мощность и КПД ПГУ при низких значениях нагрузки ГТУ падают при снижении $t_{\text{НВ}}$ ниже $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. В режиме «полублока» наблюдается обратный эффект. Если при температурах наружного воздуха выше $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ мощность «полублока» и мощность «блока» ($n = 45\%$) примерно равны, то при меньших $t_{\text{НВ}}$ мощность «полублока» больше. Таким образом, при низких $t_{\text{НВ}}$ эффективность использования режима «полублока» повышается.

КПД в режиме «полублока» составляет 50..51,5 % против 38..45 % в режиме «блока» (при $n = 45\%$).

Четвертая глава посвящена оптимизации параметров и схем ПГУ с учетом режимов работы ПГУ. Анализируются режимные и технические ограничения изменения оптимизируемых параметров.

Отмечено, что в условиях заданной ГТУ главными оптимизируемыми переменными в ПГУ являются давления пара в контурах КУ.

На значения давлений пара в контурах ПГУ накладываются следующие ограничения:

1. Верхняя граница давления (для верхнего контура КУ) – 30 МПа для прямоточных котлов и 15-19 МПа – для барабанных котлов с естественной циркуляцией (по условию надежности естественной циркуляции);

2. Нижняя граница давления (для нижнего контура КУ) для номинального режима – 0,15 МПа, так как при работе ПГУ на скользящем давлении давление в нижнем контуре с разгрузкой ПГУ снижается и может достичь величины меньше 0,12 МПа.

3. Предельное значение конечной влажности в ЦНД паровой турбины составляет 12 %. В случае превышения этого значения конструкция турбины усложняется включением сепаратора, что нежелательно.

4. Минимальная температура уходящих из котла-утилизатора газов составляет 90..100 $^{\circ}\text{C}$. Меньшие ее значения могут быть обеспечены только применением развитых поверхностей нагрева в нижнем контуре КУ и газовом подогревателе конденсата. Это удорожает установку, ее эксплуатацию и обслуживание. Кроме того, при снижении температуры уходящих газов повышается вероятность конденсации водяных паров на внешней поверхности трубок ГПК и последующей их коррозии.

Для определения степени влияния среднегодового режима работы ГТУ на оптимальные сочетания давлений для утилизационных ПГУ были проведены расчеты тепловых схем двухконтурной ПГУ-90 с ГТУ SGT-1000F Siemens и ПГУ-160 с ГТЭ-160 с промперегревом и без. Расчеты проводились для ряда температур наружного воздуха от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нагрузок 80 % и 100 %.

Расчеты показывают, что учёт влияния температуры наружного воздуха и нагрузки на характеристики ГТУ практически не вносит корректировки в выбор оптимальных давлений для нижнего цикла.

В целях учета ряда технических ограничений при выборе оптимальных параметров трехконтурных ПГУ были проведены расчеты тепловых схем ПГУ-400 с газовыми турбинами SGT5-4000F Siemens и GT26 Alstom.

Анализ полученных результатов (рис. 11) показывает, что для каждого значения давления во втором контуре имеет место явно выраженный оптимум, соответствующий давлению в третьем контуре. Оптимальные значения давлений в контурах среднего и низкого давлений увеличиваются с ростом значений давлений в первом контуре. Однако относительные значения оптимальных давлений снижаются с ростом давления пара в первом контуре.

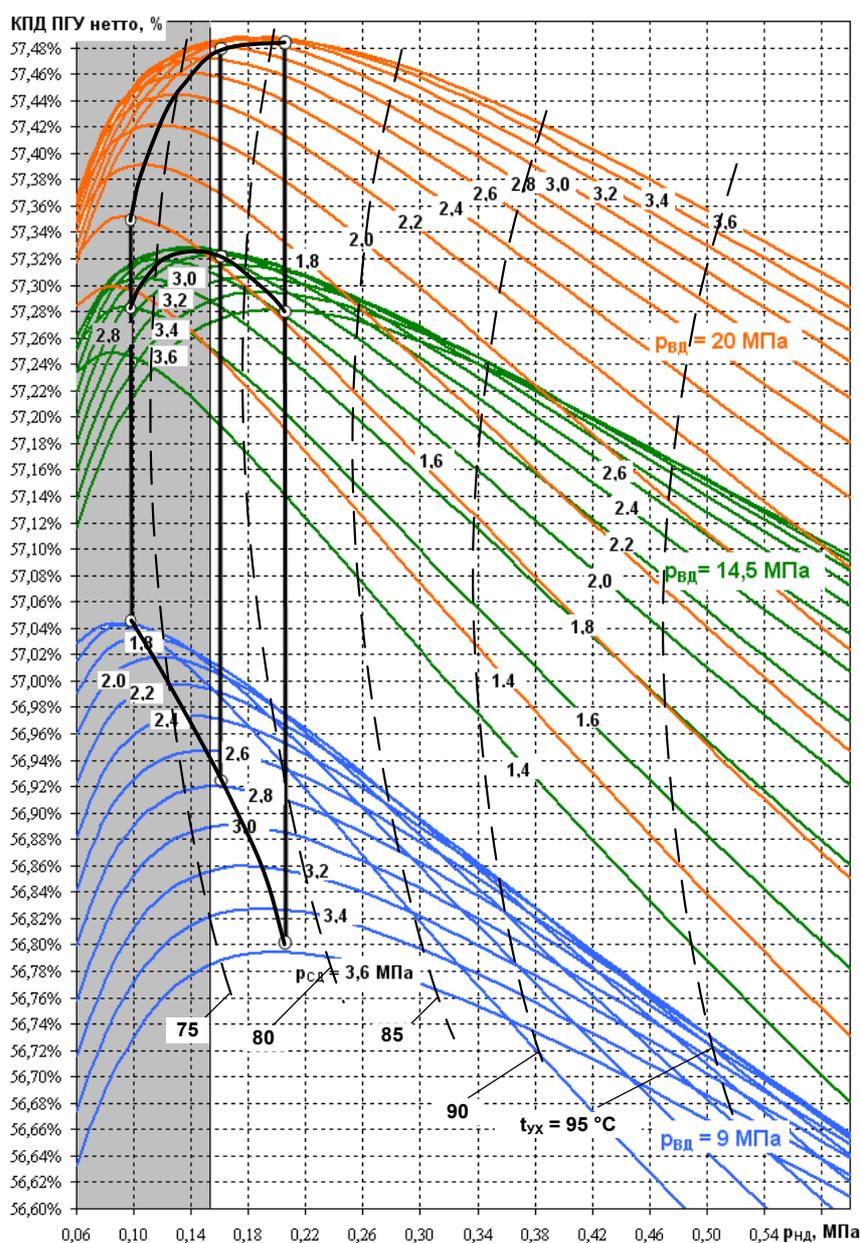


Рис. 11. Результаты оптимизации давлений в контурах ПГУ-400 с ГТУ GT26 Alstom

В ПГУ-400 максимальный КПД достигается при низких значениях давления пара в третьем контуре – в пределах 0,08..0,24 МПа в зависимости от давлений в контуре ВД и СД.

Анализ параметров в нижнем цикле существующих блоков ПГУ-400 на основе полученных результатов показывает, что сооружаемые блоки имеют давление в нижнем контуре КУ, в 3-4 раза превышающее оптимальное значение. Давление в среднем контуре также завышено по сравнению с оптимальным его значением. Это приводит к потере в КПД ПГУ от 0,2 % абс., однако позволяет использовать

менее развитые поверхности нагрева в хвосте котла-утилизатора (с температурой уходящих газов 90..100 °С), избежать конденсации водяных паров на них и предотвратить попадание контура НД на нагрузку ПГУ около 50 % под вакуум.

Для ПГУ-400 с GT26 Alstom получены аналитические зависимости оптимальных давлений в среднем и нижнем контурах от давления в верхнем контуре и температуры уходящих газов ПГУ:

$$p_{НД} = f(t_{УХ}) = 0,016t_{УХ} - 1,09; \quad p_{НД} \geq 0,15 \text{ МПа}; \quad (6)$$

$$p_{СД}^{ОПТ} = f(p_{ВД}, p_{НД}) = 3,1673 + 5,3547 p_{НД} - \frac{16,2074 + 20,9439 p_{НД}}{p_{ВД}}. \quad (7)$$

Аналогичные зависимости получены для ПГУ-400 с SGT5-4000F Siemens и блоков ПГУ двух давлений - ПГУ-90 с ГТУ SGT-1000F Siemens.

Результаты оптимизации трехконтурных ПГУ показали:

- что оптимальные значения давлений в нижнем контуре КУ растут с увеличением начального давления. Так, оптимальное давление в нижнем контуре растет с 0,1 до 0,2 МПа с увеличением начального давления от 9 до 20 МПа;

- повышение начального давления пара в ПГУ с 9 до 14,5 МПа приводит к увеличению КПД ПГУ на 0,29 % (абс.), с 14,5 до 20 МПа – на 0,15 % (абс.), что в 2 раза меньше, чем у паротурбинных блоков суперсверхкритических параметров с двукратным промперегревом;

- оптимальные значения относительных давлений в ПГУ уменьшаются на 1,5 % с ростом начального давления с 9 до 20 МПа;

- оптимальные значения относительных давлений в ПГУ ($p_{СД} = 0,16..0,17p_{ВД}$ и $p_{НД} = 0,009..0,012p_{ВД}$) значительно меньше, чем у паротурбинных блоков суперсверхкритических параметров с двукратным промперегревом ($p_{III} = 0,2..0,38p_0$ и $p_{IIII} = 0,06..0,1p_0$);

- увеличение давления в третьем контуре ПГУ выше его оптимального значения позволяет без существенного снижения КПД уменьшить диаметры паропроводов, однако, в отличие от ПТУ, важными дополнительными ограничениями на минимальное значение этого давления становится ограничение по температуре уходящих газов и режимное ограничение по условию надежности работы контура НД при глубокой разгрузке.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе анализа технических решений по созданию парогазовых энергоблоков, замещающих устаревшие паротурбинные блоки 300 МВт, проведена оценка показателей тепловых схем одноцелевых ПГУ мощностью 285, 400 и 800 МВт. Проанализировано влияние типов ГТУ на их эффективность. Показана возможность использования существующих зданий и сооружений и

паровой турбины К-300-23,5 в проектах перевода паросиловых блоков 300 МВт на парогазовый цикл.

2. Выполнен комплекс научно-технических исследований показателей одноцелевых ПГУ с ГТУ SGT5-4000F Siemens, GT26 Alstom, ГТД-110 «Сатурн-Газовые турбины» в режимах частичной загрузки с учетом климатических характеристик. Выявлены зависимости параметров паротурбинного цикла ПГУ от режима работы ГТУ.

3. Для поддержания температуры острого и перегретого пара на уровне 540 °С в ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F рекомендуется применять дожигание перед КУ, которое позволит увеличить температуру выхлопных газов ГТУ, температурные напоры в КУ, теплоперепады в ПТУ и повысить мощность ПГУ на величину до 6,1 % (25 МВт). Дожигание целесообразно использовать для ПГУ с газовыми турбинами, температура выхлопных газов которых падает со снижением $t_{НВ}$.

4. Показано, что снижение КПД паротурбинных энергоблоков при разгрузке до 60 % составляет 1,5 % против 3...5 % у парогазовых. Для обеспечения минимального прироста расхода условного топлива при регулировании нагрузки разгружать следует в первую очередь паротурбинные блоки.

5. Разгрузка дубль-блоков ПГУ-325 одновременным снижением мощности на обеих ГТУ экономически целесообразна до нагрузки 45..50 %. Снижение нагрузки ниже 45..50 % может быть осуществлено переводом ПГУ-325 в режим «полублока» с одной ГТУ, работающей на нагрузке, близкой к номинальной, что позволит получить экономию в удельном расходе топлива до 12 %.

6. На основе расчетов вариантов тепловых схем двух- и трехконтурных ПГУ проведена оптимизация давлений пара в контурах КУ. Установлено, что давления в нижних контурах, при которых достигается оптимальная температура уходящих газов (90..100 °С), как правило, выше оптимальных с точки зрения максимальных КПД ПГУ (в двухконтурных ПГУ – в 2 раза, в трехконтурных – в 3-4 раза). Это приводит к потере в КПД ПГУ до 0,2 % абс., однако позволяет использовать менее развитые поверхности нагрева в хвосте котла-утилизатора, избежать конденсации водяных паров на них и предотвратить попадание контура низкого давления под вакуум в режимах глубокой разгрузки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Мошкарин, А. В. О влиянии характеристик газовых турбин на показатели работы мощных парогазовых блоков в переменных режимах / А. В. Мошкарин, **Ю. В. Мельников** // Энергосбережение и водоподготовка. - №4. – 2007. – С. 32-35.

2. **Мельников, Ю. В.** Расчетная оценка энергетических показателей ПГУ-325 в режиме «полублока» / Ю. В. Мельников, А. В. Мошкарин // Энергосбережение и водоподготовка. - №2 - 2009. – С. 32-37.

3. Мошкарин, А. В. Техническое предложение по замене оборудования блока 300 МВт утилизационной ПГУ трёх давлений / **Ю. В. Мельников**, А. В. Мошкарин, Б. Л. Шельгин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2006. – вып. 2. – С. 3-6.
4. Мошкарин, А. В. Оценка показателей работы парогазовой установки трёх давлений в установившихся режимах / **Ю. В. Мельников**, А. В. Мошкарин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2006. – вып. 4. – С. 6-8.
5. Мошкарин, А. В. Климатические характеристики энергетических газотурбинных установок большой мощности / **Ю. В. Мельников**, А. В. Мошкарин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2006. – вып. 6. – С. 13-15.
6. Мошкарин, А. В. Оценка показателей работы мощных одноцелевых парогазовых и паросиловых энергоблоков на частичных нагрузках / **Ю. В. Мельников**, А. В. Мошкарин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2007. – вып. 2. – С. 3-6.
7. Мошкарин, А. В. Сравнительная оценка вариантов реконструкции энергоблоков К-300-23,5 на основе парогазовых технологий / **Ю. В. Мельников**, А. В. Мошкарин, О. Е. Таран // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2004. – вып. 5. – С. 3-6.
8. Мошкарин, А. В. Оптимизация давлений в трехконтурной ПГУ с учетом технических ограничений / **Ю. В. Мельников**, А. В. Мошкарин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2007. – вып. 4. – С. 3-6.
9. Шельгин, Б. Л. Расчет котлов-утилизаторов с использованием программного продукта Boiler Designer / Б. Л. Шельгин, А. В. Мошкарин, **Ю. В. Мельников** // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2008. – вып. 2. – С. 3-9.
10. Мошкарин, А. В. Оценка показателей паротурбинной части парогазовых блоков парогазового блока мощностью 400 МВт на частичных нагрузках / **Ю. В. Мельников**, А. В. Мошкарин, Б. Л. Шельгин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2008. – вып. 2. – С. 9-16.
11. Мошкарин, А. В. Оптимизация давлений в утилизационной ПГУ двух давлений с учетом технических ограничений / **Ю. В. Мельников** и др. // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2008. – вып. 2. – С. 23-26.

Публикации в других изданиях

12. Мошкарин, А. В. Проект утилизационной ПГУ трех давлений для замены паротурбинного оборудования энергоблока 300 МВт / А. В. Мошкарин, Б. Л. Шельгин, **Ю. В. Мельников** // Газотурбинные технологии. - №5- 2006. – С. 23-26.
13. Мошкарин, А. В. Оценка технической возможности замены основного оборудования энергоблоков 300 МВт на утилизационную ПГУ трёх давлений / А. В. Мошкарин, Б. Л. Шельгин, **Ю. В. Мельников** // Новое в российской электроэнергетике. - №6 - 2006.
14. **Мельников, Ю. В.** Анализ характеристик энергоблока ПГУ-400 на частичных нагрузках / Ю. В. Мельников, А. В. Мошкарин, Б. Л. Шельгин // Газотурбинные технологии. - №9 - 2008. – С. 2-6.
15. **Мельников, Ю. В.** Расчетная оценка показателей работы энергоблока ПГУ-325 в режимах глубокой разгрузки / Ю. В. Мельников, А. В. Мошкарин // Газотурбинные технологии. - №1 - 2009. – С. 2-6.
16. **Мошкарин, А.В.** Расчет тепловых схем парогазовых установок утилизационного типа / А. В. Мошкарин, Ю. В. Мельников: Учебно-методическое пособие. – Иваново: ИГЭУ, 2007. – 44 с.
17. Доверман, Г. И. Расчет котельных агрегатов с использованием современных программных продуктов : учеб. пособие / Г. И. Доверман, Б. Л. Шельгин, А. В. Мошкарин, **Ю. В. Мельников**. - Иваново. : ГОУВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», 2007. – 220 с.
18. Мошкарин, А. В. Оптимизация давлений в трехконтурной утилизационной ПГУ / А. В. Мошкарин, **Ю. В. Мельников** // Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования: материалы Четвёртой Рос. науч.-практ. конф., 18-19 ноября 2005 г. / Под

ред. А. В. Мошкарин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО <Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина>. – Иваново, 2005. – С. 3-6.

19. **Мельников, Ю. В.** ПГУ утилизационного типа для ОАО «Костромская ГРЭС» / Ю. В. Мельников, А. В. Мошкарин, М. А. Девочкин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. Двенадцатой Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 2-3 марта 2006 г. : в 3 т. / Московский энергетический институт (технический университет) - М.: МЭИ, 2006. – Т.3. - С. 196-197.

20. **Мельников, Ю. В.** Проект утилизационной ПГУ трех давлений для замены энергоблоков 300 МВт / Ю. В. Мельников, Б. Л. Шельгин, А. В. Мошкарин // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: тез. докл. Четвёртой региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. / Ульяновский государственный технический университет, 2006. - С. 150-155.

21. **Мельников, Ю. В.** Оптимизация давлений в трехконтурной утилизационной ПГУ / А. В. Мошкарин, Ю. В. Мельников // Теплоэнергетика: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 28 апреля 2006 г. / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО <Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина>. - Иваново, 2006. - С. 4-5.

22. **Мельников, Ю. В.** Методика и результаты расчёта котла-утилизатора на ЭВМ / Ю. В. Мельников, Б. Л. Шельгин, А. В. Мошкарин // Теплоэнергетика: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 28 апреля 2006 г. / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО <Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина>. - Иваново, 2006. - С. 4-5.

23. **Мельников, Ю. В.** Результаты проектирования котла-утилизатора трёх давлений для ПГУ / Ю. В. Мельников, Б. Л. Шельгин, А. В. Мошкарин // Теплоэнергетика: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 28 апреля 2006 г. / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО <Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина>. - Иваново, 2006. - С. 5-6.

24. **Мельников, Ю. В.** Сравнительная оценка вариантов реконструкции блоков мощностью 300 МВт на основе парогазовых технологий / Ю. В. Мельников, А. В. Мошкарин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. Тринадцатой Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 1-2 марта 2007 г. : в 3 т. / Московский энергетический институт (технический университет) - М.: МЭИ, 2007. – Т.3. - С. 166-167.

25. **Мельников, Ю. В.** Оценка показателей работы ПГУ трех давлений в установленных режимах / Ю. В. Мельников, А. В. Мошкарин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. Тринадцатой Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 1-2 марта 2007 г. : в 3 т. / Московский энергетический институт (технический университет) - М.: МЭИ, 2006. – Т.3. - С. 167-168.

26. **Мельников, Ю. В.** Анализ вариантов реконструкции энергоблоков К-300-23,5 с использованием парогазовых установок / Ю. В. Мельников, М.А. Коротков // Информационные технологии, энергетика и экономика: сб. трудов Четвёртой Межрегион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 12-13 апреля 2007 г.: в 3 т. / Филиал МЭИ (ТУ) в г. Смоленск – Смоленск, 2007. – Т.1. – С. 102-107.

27. **Мельников, Ю. В.** Анализ работы мощных парогазовых и паросиловых блоков на частичных нагрузках / Ю. В. Мельников // Информационные технологии, энергетика и экономика: сб. трудов Четвёртой Межрегион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 12-13 апреля 2007 г.: в 3 т. / Филиал МЭИ (ТУ) в г. Смоленск – Смоленск, 2007. – Т.1. – С. 107-111.

28. Коротков, М. А. Анализ вариантов реконструкции блока 300 МВт в ПГУ / М. А. Коротков, **Ю. В. Мельников**, А. В. Мошкарин // Теплоэнергетика: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 27 апреля 2007 г. / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО <Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина>. - Иваново, 2007. - С. 4-5.

29. Мошкарин, А. В. Анализ вариантов реконструкции блока 300 МВт в ПГУ / А. В. Мошкарин, **Ю. В. Мельников**, М. А. Коротков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. Четырнадцатой междунар. науч.-техн. конф. «Бенардосовские чтения», 29-31 мая 2007 г. / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО <Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина>. - Иваново, 2007. – Т.1. - С. 159.

30. **Мельников, Ю. В.** Результаты численного анализа работы котлов-утилизаторов в переменных режимах / Ю. В. Мельников, А. В. Мошкарин, Е. В. Шомов, Т. А. Жамлиханов // Теплоэнергетика: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 24 апреля 2008 г. / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО <Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина>. - Иваново, 2008. - С. 2-3.

31. **Мельников, Ю. В.** Оптимизация давлений в утилизационной ПГУ двух давлений с учетом технических ограничений / Ю. В. Мельников, А. В. Мошкарин // Теплоэнергетика: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 24 апреля 2008 г. / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО <Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина>. - Иваново, 2008. - С. 4-5.

32. **Мельников, Ю. В.** Расчетный анализ показателей ПГУ-325 в режиме «полублока» / В. В. Торгов, Ю. В. Мельников, А. В. Мошкарин // Теплоэнергетика: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 28 апреля 2009 г. / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО <Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина>. - Иваново, 2006. - С. 5-6.

МЕЛЬНИКОВ Юрий Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫБОРА
ТЕПЛОВЫХ СХЕМ И ПАРАМЕТРОВ
ОДНОЦЕЛЕВЫХ УТИЛИЗАЦИОННЫХ
ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать 19.05.2009. Формат 50Х84 1/16

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,39.

Тираж 100 экз. Заказ № 80.

ГОУ ВПО «Ивановский государственный
энергетический университет им. В.И. Ленина»

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.