

На правах рукописи



ФАМ ХОАИ АН

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ГАЗОПАРОВЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ
УСТАНОВОК ВЬЕТНАМА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ
ЭКОНОМИЧНОСТИ И МОЩНОСТИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ
ВЫПУСКАЕМЫХ И УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ РОССИЙСКИХ
ПАРОВЫХ ТУРБИН**

Специальность – 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт–Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор
Рассохин Виктор Александрович
- Официальные оппоненты:** **Лисянский Александр Степанович**
доктор технических наук, главный конструктор паровых турбин ОАО «Силовые машины», г. Санкт - Петербург
- Елифанов Андрей Андреевич**
кандидат технических наук, ведущий инженер ООО «Комтек-Энерговервис», г. Санкт - Петербург
- Ведущая организация:** ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», г. Санкт - Петербург

Защита состоится 26 января 2016 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте (<http://www.spbstu.ru>) и в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «_____» _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
Д 212.229.06, к.т.н., доцент



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основой современной мировой энергетики являются: тепловые электростанции (ТЭС), атомные электростанции (АЭС) и гидравлические электростанции (ГЭС), суммарно вырабатывающие за год свыше 20 трлн. кВт/час электроэнергии.

В настоящее время во Вьетнаме установленная мощность всех электростанций 25000 МВт в год. Основными производителями электрической энергии являются тепловые электростанции с паротурбинными, газотурбинными и парогазотурбинными установками. Для производства электроэнергии используются агрегаты гидроэнергетики, солнечные и ветряные электростанции.

Во Вьетнаме есть два главных источника электроэнергии: гидроэнергетика и тепловая энергия. Для производства тепловой энергии используется уголь, нефть и природный газ. На данный момент в энергетическом балансе энергии Вьетнама 38% приходится на гидро, 35% — на газ, 21% — на уголь, 1,8% — на нефть, 4% — на другие источники энергии (см. рис.1).

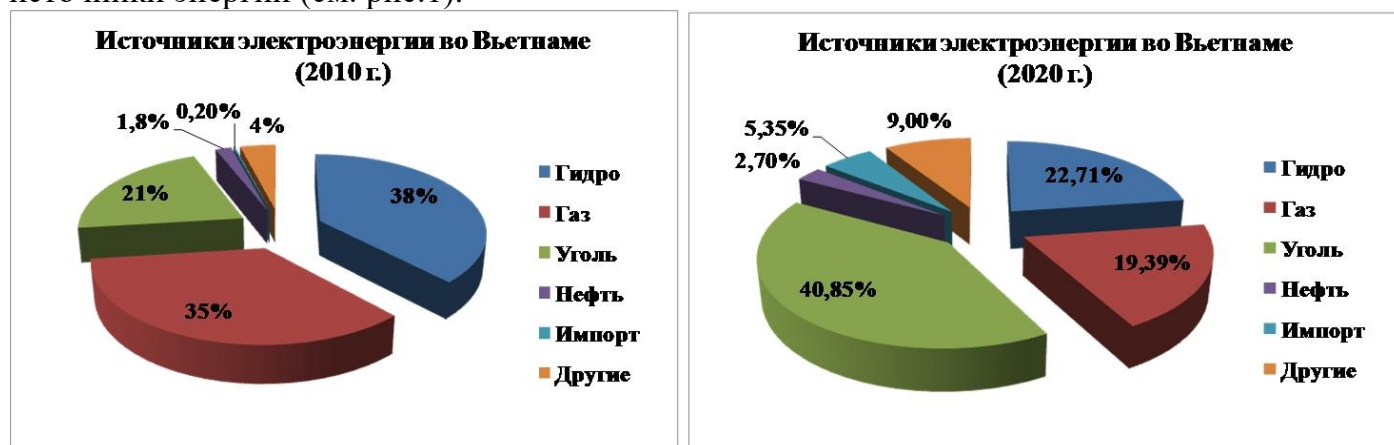


Рисунок 1. Источники электроэнергии во Вьетнаме (2010г. и 2020г.)

В настоящее время во Вьетнаме возникла необходимость в создании новых тепловых электростанций традиционных типов и внедрение перспективных комбинированных установок, обладающих высоким коэффициентом полезного действия. Решить задачу повышения выработки электроэнергии можно не только за счет строительства новых электростанций, но и путем модернизации действующих. Поэтому в работе рассмотрены вопросы модернизации комбинированных газопаровых установок (ГПУ) во Вьетнаме.

Модернизация может быть осуществлена за счет создания комбинированных газопаровых установок на базе существующих газотурбинных установок (ГТУ) во Вьетнаме, а также подбором новых паровых турбин для работы в составе газопаровых установок во Вьетнаме. В работе для этих целей используются современные паровые турбины российского производства. Исследование в этой области является актуальным для Вьетнама.

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение экономичности и мощности тепловых комбинированных электростанций Вьетнама за счет применения в комбинированном цикле российских паровых турбин.

Для достижения указанной цели необходимо были решить следующие задачи:

- выполнить обзор и изучение состояния и перспективы развития энергетики во Вьетнаме;
- изучить и обобщить опытные данные, параметры и типы существующих ГТУ и ПТУ для преобразования их в ГПУ;
- выполнить обзор и анализ тепловых схем комбинированных газопаровых турбинных установок во Вьетнаме;
- сравнить три программных продукта для расчета тепловых схем комбинированных газопаровых установок: программа P1GPU, написанная автором; программа КГПТУ, разработанная Морским техническим университетом (г. Санкт-Петербург) и программа Gate Cycle компании General Electric;
- рассмотреть характеристики российских паровых турбин различных предприятий и выбрать паровые турбины для работы в составе газопаровых установок во Вьетнаме;
- сравнить результаты расчетов показателей тепловой схемы ГПУ на базе российской и штатной паровой турбины;
- произвести оценку влияния КПД российской паровой турбины К-300-240-2 (ОАО «ЛМЗ») на КПД и мощность ГПУ-1090 (станция ФуМи-1, Вьетнам);
- предложить способы повышения экономичности ЦВД и ЦНД паровой турбины К-300-240-2 для его использования в составе ГПУ.

Научная новизна настоящего исследования заключается в том, что:

- аналитическое исследование возможностей увеличения выработки электрической энергии за счёт модернизации существующих комбинированных газопаровых установок показало, что повышение экономичности и мощности газотурбинных тепловых электростанций Вьетнама возможно за счет применения газотурбинного комбинированного цикла с российскими паровыми турбинами;

- показано влияние КПД ЦВД и ЦНД российской паровой турбины К-300-240-2 (ОАО «ЛМЗ») на КПД и мощность ГПУ-1090 (станция ФуМи-1, Вьетнам). Результаты расчетов показали, что с повышением КПД ЦВД и ЦНД паровой турбины показатели установки резко возрастают. После модернизации КПД ЦВД и ЦНД паровой турбины увеличивают на 7,3% и 8,3%. Так, повышение КПД ЦВД приводит к значительному росту КПД и мощности ГПУ, которые при $\eta_{\text{цвд}}=85,625\%$ достигают $\eta_{\text{гпу}}=54,977\%$ и $N_{\text{гпу}}=1057,409$ МВт. Повышение КПД ЦНД приводит к значительному росту КПД и мощности ГПУ, которые при $\eta_{\text{цнд}}=93,571\%$ достигают $\eta_{\text{гпу}}=55,505\%$ и $N_{\text{гпу}}=1067,531$ МВт.

Личный вклад автора: все обобщения и расчётно-теоретические исследования, результаты которых приведены в настоящей работе, выполнены непосредственно автором.

Практическая значимость работы. Полученные в работе результаты имеют важное практическое значение для Вьетнама. Решить задачу повышения выработки электроэнергии можно не только за счет строительства новых электростанций, но и путем модернизации действующих. Модернизация может быть осуществлена за счет создания комбинированных газопаровых установок на базе имеющихся во Вьетнаме газотурбинных двигателей, а также за счет применения газотурбинного комбинированного цикла с

российскими паровыми турбинами. В результате расчетных исследований ГПУ-450, ГПУ-750, ГПУ-1090 было показано, что российские паровые турбины **T-150-7,7; K-300-23,5; K-300-240-2** (ОАО «ЛМЗ») могут заменить **KA13E2-2** фирмы Alstom в ГПУ-450, при этом КПД ГПУ составит 54,6% вместо 53%; **SST5-5000** фирмы Siemens в ГПУ-750, при этом КПД ГПУ составит 57,47% вместо 57%; **TC2F40** фирмы Mitsubishi в ГПУ-1090, при этом КПД ГПУ составит 54,85% вместо 54,4%. Как следует из сравнения полученных результатов, для совершенствования и модернизации комбинированных газопаровых установок во Вьетнаме целесообразно использование новых российских паровых турбин: **T-150-7,7; K-300-23,5 и K-300-240-2**.

Методология и методы исследования. В работе использовались как теоретические методы (идеализации, формализации), так и методы моделирования, сравнения. Решение поставленных задач осуществлялось с применением методов системного анализа и программных продуктов: программа PIGPU, написанная автором; программа КГПТУ, разработанная Морским техническим университетом (г. Санкт-Петербург); программа GateCycle компании General Electric.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- в докладе на научно-практической конференции Института энергетики и транспортных систем СПбПУ. — 1-6 декабря 2014 г.;
- в докладе на XIV международной научно-практической конференции: «Современные концепции научных исследований» — Россия, г. Москва, 29-30 мая 2015 г.;
- в докладе на X Международной научно-практической конференции: «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени» Россия, г. Екатеринбург, 05-06 июня 2015 г.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах, в их числе 3 статьи в ведущих российских рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы.

Основной текст изложена на 143 страницах, диссертация содержит 62 рисунка, 25 таблиц, список использованных источников, включающий 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена научная и практическая ценность работы, дано описание структуры диссертации.

В первой главе представлен обзор и современное состояние развития энергетики во Вьетнаме. Приведена структура выработки электроэнергии, и рассмотрены объемы выработки электрической энергии на тепловых станциях (см. рис.2). Приведен обзор комбинированных электростанций, предназначенных для выработки электрической энергии, установленных во Вьетнаме (см. табл.1).

Для выработки электрической энергии используются новые для Вьетнама альтернативные источники энергии для покрытия пиковых нагрузок при электрификации отдалённых районов страны, так и традиционные источники для выработки базовой нагрузки. К ним относятся: гидроэлектростанции; комбинированные электростанции; тепловые электростанции; атомные электростанции; геотермальные электростанции; солнечные электростанции; ветряные электростанции.

Таблица 1. Перечень действующих тепловых электростанций во Вьетнаме

Название станции	Эффективная мощность, МВт			Используемое топливо	
	ГТУ	ПТУ	Всего	природный газ	дизтопливо
Ba Ria	2x23,4 6x37,5	1x58 1x59,1	388,9	+	-
Phu My 1	3x240	1x390	1090	+	+
Phu My 2.1	2x144	1x160	448	+	+
Phu My 2.1MP	2x138	1x160	436	+	+
Phu My4	2x145	1x160	450	+	+
Phu My 2.2	2x240	1x235	715	+	+
Phu My 3	2x240	1x236,8	716,8	+	+
Nhon Trach 1	2x150	1x150	450	+	+
Nhon Trach 2	2x250	1x250	750	+	+
Ca Mau 1	2x292	1x116	750	+	+
Ca Mau 2	2x292	1x116	750	+	+
Thu Duc	1x16 1x10 1x34 1x34	1x33 1x60 1x60	247	+	-
Σ	4947,8	2243,9	7191,7	+	+

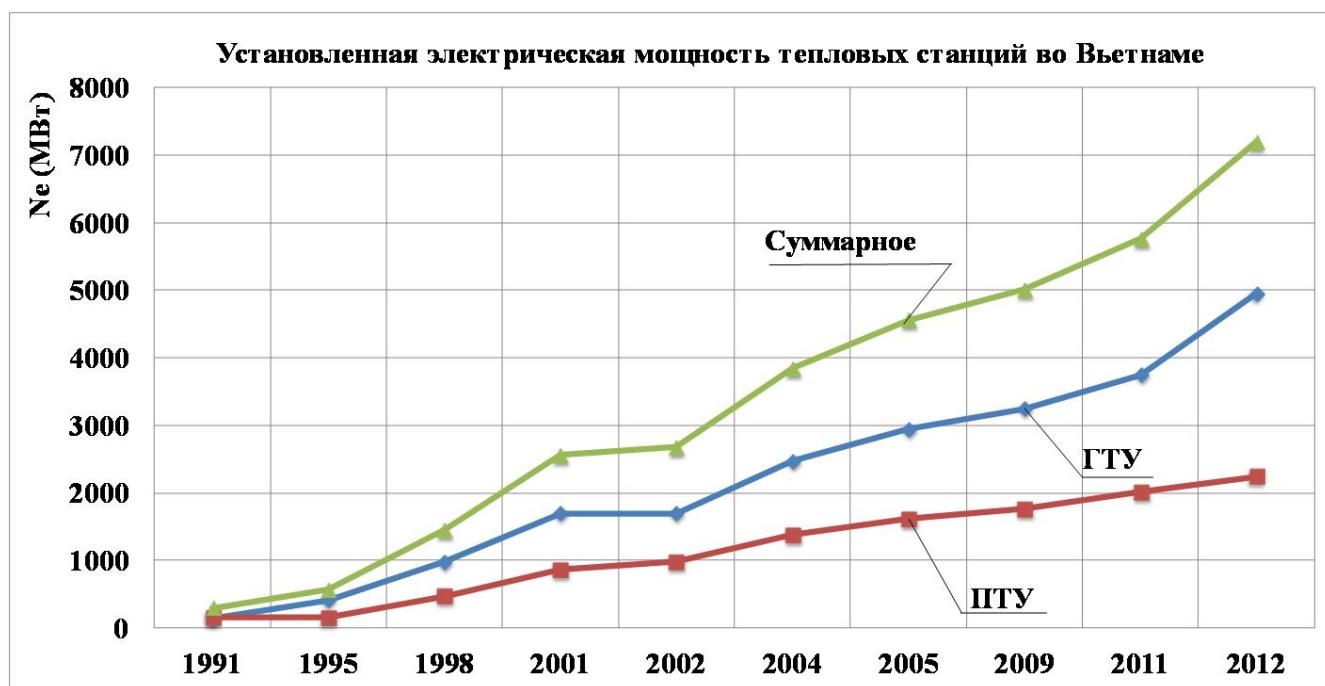


Рисунок 2. Установленная электрическая мощность тепловых станций во Вьетнаме.

В работе рассмотрены основные пути повышения выработки электроэнергии на существующих комбинированных установках во Вьетнаме. Комбинированные газопаротурбинные установки (КГПТУ) получили развитие в ряде областей промышленности, особенно в электроэнергетике. В последние годы газотурбинные и газопаровые установки (ГПУ) заняли важное место в электроэнергетике мира. Уже много стран в мире применяют КГПТУ с утилизационными котлами для новых электростанций, работающих на природном газе. Сейчас их КПД уже достиг 52..60 %. Поэтому исследования в области использования газопаровых установок для электростанций являются актуальными для Вьетнама.

Во второй главе рассмотрены газотурбинные и паротурбинные установки, работающих на комбинированных электростанциях во Вьетнаме; представлен анализ типовых тепловых схем энергетических комбинированных установок во Вьетнаме.

Таблица 2. Основные характеристики ГТУ и ПТУ, работающих на комбинированных электростанциях

Наименование станции	Модель		Мощность, МВт			Схема ГПУ	КПДГПУ, %
	ГТУ	ПТУ	ГТУ	ПТУ	ГПУ		
Phu My 2-1	GT13E2-2	KA13E2-2	145	160	450	2x1	53
Phu My 2-1 plus	GT13E2-2	KA13E2-2	145	160	450	2x1	53
Phu My 1	M701F	TC2F40	243	360	1090	3x1	54,4
Phu My 3	SGT5-4000F	STT5-5000	225	270	720	2x1	57
Phu My 4	GT13E2-2	KA13E2-2	145	160	450	2x1	53
Phu My 2-2	MS9001FA	D11-TC2F	226,2	277	715	2x1	57,1
Ca Mau 1	SGT5-4000F	STT5-5000	250	250	750	2x1	57
Ca Mau 2	SGT5-4000F	STT5-5000	250	250	750	2x1	57
Nhon Trach 1	GT13E2-2	KA13E2-2	145	160	450	2x1	53
Nhon Trach 2	SGT5-4000F	STT5-5000	250	250	750	2x1	>57

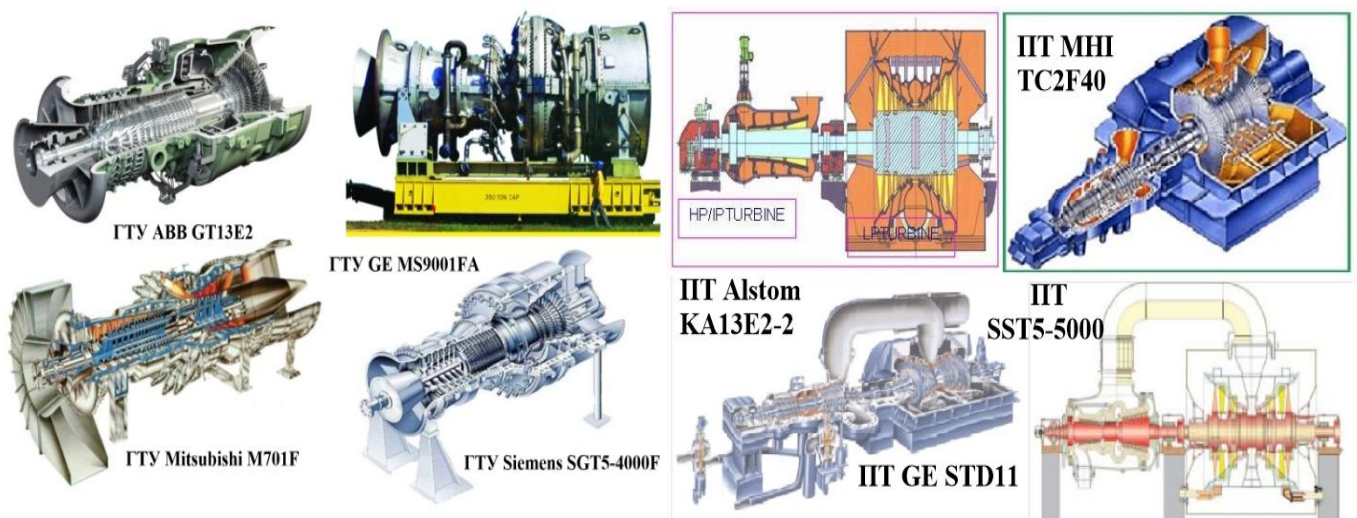


Рисунок 3. ГТУ и ПТУ, работающих на комбинированных электростанциях во Вьетнаме

Во Вьетнаме работает ряд различных тепловых электростанций, построенных по комбинированному газопаровому циклу. Среди них — установки Siemens, ABB, Alstom, General Electric, Mitsubishi (см. табл.2 и рис.3).

В таблице 2 приведены основные характеристики ГТУ и ПТУ, работающих на комбинированных электростанциях во Вьетнаме.

Рассматривались следующие частные случаи использования схем конденсационных теплоутилизирующих контуров (ТУК) во Вьетнаме: Одноконтурный ТУК с промперегревом (2ПТ и 3ПТ); одноконтурный ТУК без промперегрева (1ПТ и 2ПТ); двухконтурный ТУК с промперегревом (2ПТ и 3ПТ); двухконтурный ТУК без промперегрева (1ПТ и 2ПТ); трехконтурный ТУК с промперегревом (2ПТ и 3ПТ); трехконтурный ТУК без промперегрева (2ПТ и 3ПТ). На рис.4 показана обобщенная тепловая схема ГПУ: трехконтурный ТУК с промперегревом (а) и без промперегрева (3ПТ).

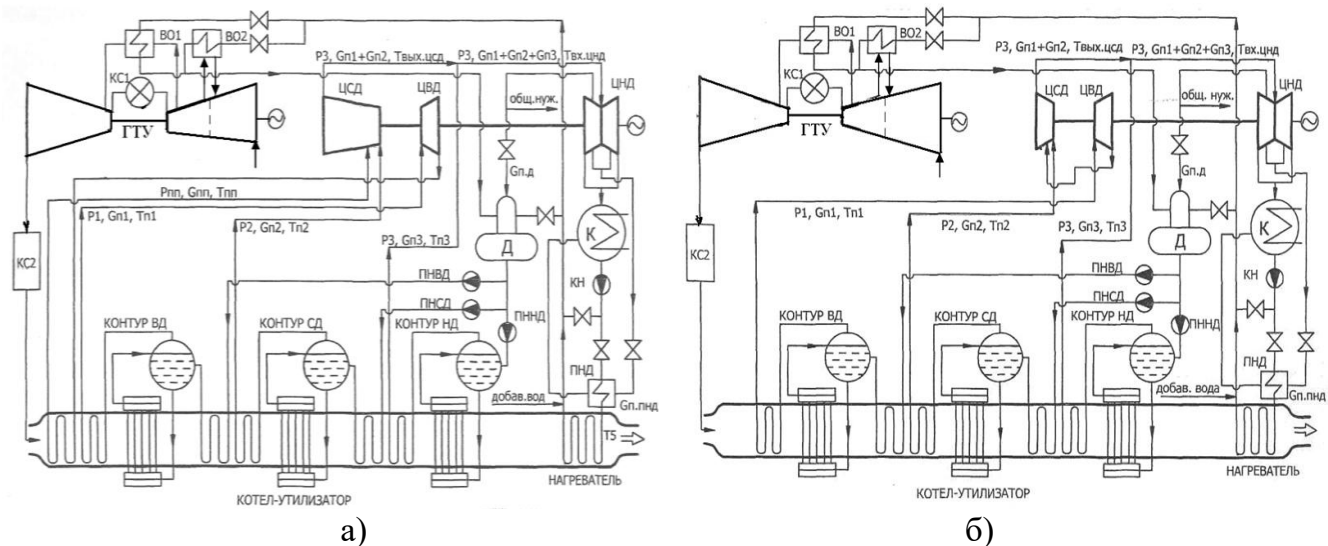


Рисунок 4. Тепловая схема ГПУ: трехконтурный ТУК с промперегревом (а) и без промперегрева (б), где: ВО1, ВО2 – воздухоохладитель №1,2; Д – деаэратор; К – конденсатор; КН – конденсатный насос; КС1 – камера сгорания; КС2 – камера дожига топлива; ПНВД, ПНСД, ПННД – питательные насосы высокого, среднего, низкого давления; ПНД – подогреватель низкого давления; ЦВД, ЦСД, ЦНД – цилиндры высокого, среднего, низкого давления; ПТ – паровая турбина; ЭД – электродвигатель; ЭГ – электрогенератор.

В третьей главе представлено краткое описание трех компьютерных программ расчета тепловых схем газотурбинных и комбинированных энергоустановок: P1GPU, КППУ и Gate Cycle. Для оценки разброса результатов проведены сравнительные расчеты двух комбинированных установок и сделаны выводы о применимости программ. Приведены некоторые результаты расчетного анализа комбинированной установки, предназначенной для энергетической системы Вьетнама.

Программы расчета тепловых схем комбинированных турбоустановок. Для сравнения были выбраны три программных продукта: программа P1GPU, написанная автором; программа КППУ, разработанная Морским техническим университетом

(г. Санкт-Петербург); программа Gate Cycle компании General Electric. Выбор именно этих программ диктовался: прежде всего, их доступностью.

Собственная программа P1GPU. Программа P1GPU предназначена для расчета параметров газотурбинных установок и комбинированных газопаротурбинных установок. Она позволяет выполнить расчеты параметров тепловой схемы и основных показателей ГТУ, включая установки с охлаждением. Программа P1GPU позволяет также выполнить расчеты КГПТУ с котлом-утилизатором одного уровня давления и двух уровней давлений, с комбинацией различных сочетаний газовых, паровых контуров и котлутилизаторов (например, 2 ГТУ+ 2 КУ+1ПТУ с двумя уровнями давлений в котле-утилизаторе).

Программа КГПТУ Морского технического университета. Программа КГПТУ предназначена для расчета параметров тепловых и судовых комбинированных газопаротурбинных установок. Компьютерная программа КГПТУ может быть использована для расчета разных вариантов (12) тепловых схем энергетических КГПТУ — трехконтурной тепловой схемы КГПТУ с промежуточным перегревом (две или три паровые турбины) и без него (две или три паровые турбины), двухконтурной тепловой схемы КГПТУ с промежуточным перегревом (две или три паровые турбины) и без него (одна или две паровые турбины), одноконтурной тепловой схемы КГПТУ с промежуточным перегревом (две или три паровые турбины) и без него (одна или две паровые турбины), а также 4 вариантов схем судовых КГПТУ (см. рис. 5). Программа имеет отдельное окно для расчета энтальпии продуктов сгорания при использовании в качестве топлива природного газа или жидкого топлива и окно для расчета свойств воды и водяного пара.

Электроэнергетические КГПТУ

	Трехконтурная	Двухконтурная	Одноконтурная
С промперегревом	Две паровые турбины	Две паровые турбины	Две паровые турбины
	Три паровые турбины	Три паровые турбины	Три паровые турбины
Без промперегревом	Две паровые турбины	Одна паровая турбина	Одна паровая турбина
	Три паровые турбины	Две паровые турбины	Две паровые турбины

Судовые КГПТУ

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Открытая схема ТУК
-----------	-----------	-----------	--------------------

Выход

Рисунок 5. Окно для выбора схем КГПТУ

Таблица 3. Исходные данные и результаты расчета тепловой схемы КГПТУ с одноконтурным и двухконтурным КУ

Параметры	КГПТУ с одноконтурным КУ			КГПТУ с двухконтурным КУ		
	Программа расчета КГПТУ					
	P1GPU	КГПТУ У	Gate Cycle	P1GPU	КГПТУ	Gate Cycle
Мощность ГТД, МВт	110	110	110	110	110	110
Расход газов, кг/с	356	356	356	356	356	356
Температура газа за турбиной, °С	550	550	550	550	550	550
КПД ГТД, %	35,08	35,08	35,08	35	35	35
Температура наружного воздуха, °С	15	15	15	15	15	15
Давление наружного воздуха, МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ддавление в конденсаторе, МПа	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
(Высокое/ низкое) Давление в контурах КУ, МПа:	5	5	5	5/0,5	5/0,5	5/0,5
Давление в деаэраторе, МПа	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
КПД (части высокого/низкого давления) парового контура	89	89	89	89/84	89/84	89/84
Параметры пара за (высокими/низкими) контурами:						
- давление, МПа	5	5	5	5/0,5	5/0,5	5/0,5
- температура, °С	520	520	520	520/204,7	520/205	520/205
- расход, кг/с	43,76	43,76	43,76	87,4/21,4	87,5/21,4	87,5/21,4
Температура уходящих газов, °С	194	195,4	195,4	121	120	120
Мощность КГПТУ, МВт	157,1	157,38	157,37	326,4	326,3	326,3
КПД КГПТУ, %	50,17	50,2	50,2	51,9	51,9	51,9

Программа GateCycle фирмы General Electric. Программа GateCycle предназначена для расчета термодинамических параметров оборудования и применяется, в частности, при проектировании тепловых и парогазовых электростанций. Она позволяет анализировать и отрабатывать различные схемы на предмет их эффективности и рассчитывать термодинамические показатели оборудования при переменных режимах работы. Пользователи имеют возможность моделировать турбинные и транспортные наземные энергоустановки практически любого типа с помощью одного пакета программ, позволяющего вводить характеристики узлов в виде уравнений или таблиц, моделировать контуры управления и изменять неограниченное количество параметров модели в процессе оптимизации. Программа GateCycle успешно применяется как инструмент оптимизации проекта или моделирования работы существующей энергоустановки и станции в целом.

Однако, доступная авторам версия GateCycle не позволяет рассчитывать тепловые схемы с паровым охлаждением газовой турбины.

Сравнение результатов расчетов. Ниже приведены результаты расчетов показателей двух КГПТУ с одноконтурным и двухконтурным КУ (см. табл.3). Схема КГПТУ с одноконтурным и двухконтурным КУ, в которой в качестве ГТУ использована известная установка V.64.2 фирмы Siemens, приведена на рисунке 6.

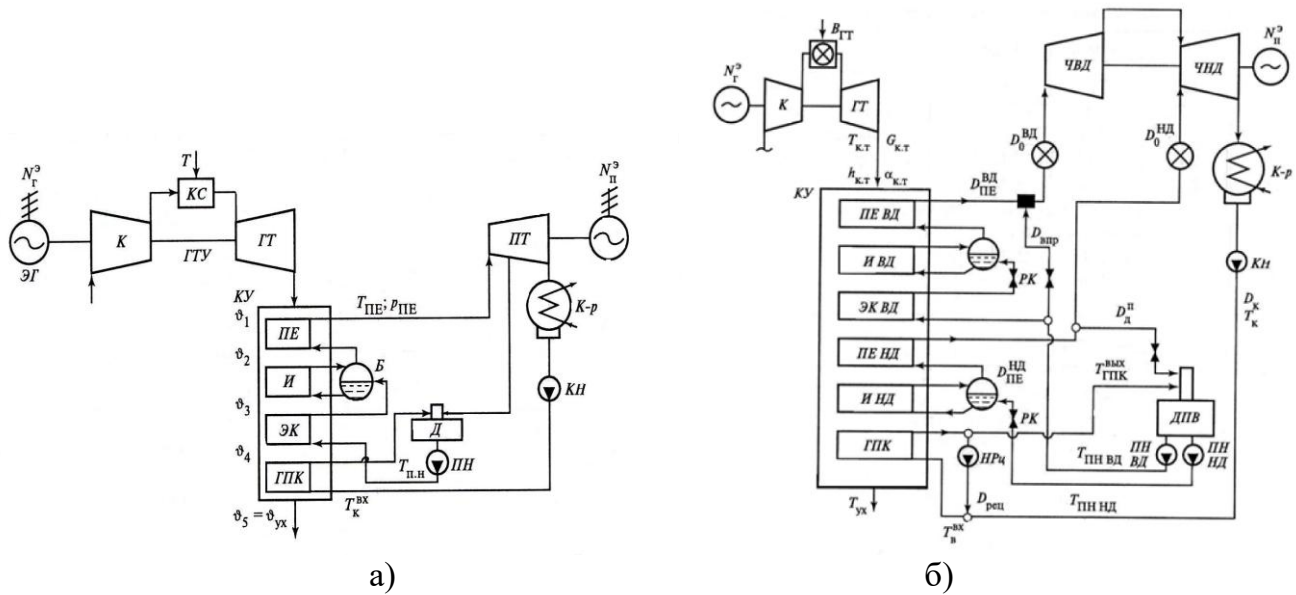


Рисунок 6. Тепловая схема КГПТУ: (а) — с одноконтурным КУ; (б) — с двухконтурным КУ, где: ЭГ — электрогенератор; К — компрессор; КС — камера сгорания; ГТ — газовая турбина; ГТУ — газотурбинная установка; КУ — котел-утилизатор; ПТ — паровая турбина; Д — деаэратор; ПН — питательный насос; КН — конденсационный насос; ЭК — экономайзер; ПЕ — пароперегреватель; И — испаритель; ГПК — газовый подогреватель конденсата.

Как следует из сравнения полученных данных, все три программы дают весьма близкие и хорошо совпадающие с опубликованными данными результаты для обеих схем КГПТУ. Поэтому при проведении расчетных исследований использовалась программа P1GPU. Поскольку программа P1GPU не позволяла проектировать КГПТУ с тремя уровнями давления в котле-утилизаторе, то для таких расчетов была выбрана простая и удобная при использовании программа Морского технического университета.

В четвертой главе рассмотрены вопросы выбора российских паровых турбин для работы в составе газопаровых установок с целью замены паротурбинных установок производства фирмы Alstom, Siemens, GE и Mitsubishi на российские при реконструкции существующих во Вьетнаме ГПУ. Приведены результаты расчетов показателей тепловой схемы ГПУ на базе российской и штатной паровой турбины.

Рассмотрен краткий обзор российских паровых турбин: турбины ЛМЗ «Ленинградский металлический завод»; турбины НЗЛ «Невский завод»; турбины КТЗ «Калужский турбинный завод»; турбины УТЗ «Уральского турбинного завода»; турбины ХТЗ «Харьковский турбинный завод», который позволил выбрать для расчета исследования необходимые паровые турбины.

В настоящее время во Вьетнаме используется более десятка комбинированных газопаровых установок. Комбинированные газопаровые установки во Вьетнаме состоят из трех типов: ГПУ с мощностью 450 МВт: 2 ГТ + 1 ПТ; ГПУ с мощностью 750 МВт: 2 ГТ + 1 ПТ; ГПУ с мощностью 1090 МВт: 3 ГТ + 1 ПТ.

- для ГПУ 2x1 с мощностью 450 МВт предлагается использование паровой турбины **Т-150-7,7** при реконструкции действующих комбинированных установок во Вьетнаме;
- для ГПУ 2x1 с мощностью 750 МВт предлагается использование паровой турбины **К-330-23,5** при реконструкции действующих комбинированных установок во Вьетнаме;
- для ГПУ 3x1 с мощностью 1090 МВт предлагается использование паровой турбины **К-300-240-2** при реконструкции действующих комбинированных установок во Вьетнаме.

Таблица 4. Основные технические характеристики рекомендуемых для реконструкции российских паротурбинных установок

Наименование показателя	Типоразмер турбины		
	Т-150-7,7	К-300-23,5	К-300-240-2
Мощность номинальная, МВт	150	300	300
Давление пара на входе в ЦВД, МПа	7,6	16	23,5
Температура пара на входе в ЦВД, °С	510	540	540
Давление в конденсаторе, МПа	0,005	0,004	0,00705

В работе рассмотрены следующие варианты модернизации и реконструкции существующих ГПУ во Вьетнаме:

- реконструкция блоков ПТ в ГПУ-450 с использованием российской паровой турбины Т-150-7,7 (ОАО «ЛМЗ»);
- реконструкция блоков ПТ в ГПУ-750 с использованием российской паровой турбины К-300-23,5 (ОАО «ЛМЗ»);
- реконструкция блоков ПТ в ГПУ-1090 с использованием российской паровой турбины К-300-240-2 (ОАО «ЛМЗ»).

В результате расчетных исследований ГПУ-450, ГПУ-750, ГПУ-1090 было показано, что российские паровые турбины **Т-150-7,7; К-300-23,5; К-300-240-2** (ОАО «ЛМЗ») могут заменить **KA13E2-2** фирмы Alstom в ГПУ-450, при этом КПД ГПУ составит 54,6% вместо 53%; **SST5-5000** фирмы Siemens в ГПУ-750, при этом КПД ГПУ составит 57,47% вместо 57%; **TC2F40** фирмы Mitsubishi в ГПУ-1090, при этом КПД ГПУ составит 54,85% вместо 54,4%. Как следует из сравнения полученных результатов, для совершенствования и модернизации комбинированных газопаровых установок во Вьетнаме целесообразно использование новых российских паровых турбин: **Т-150-7,7; К-300-23,5 и К-300-240-2.**

В пять главе выполнено исследование способов повышения экономичности российских паровых турбин; рассмотрено влияние КПД цилиндра высокого давления (ЦВД) и цилиндра низкого давления (ЦНД) паровой турбины К-300-240-2 (ОАО «ЛМЗ») на КПД и мощность ГПУ-1090 (станция ФуМи-1, Вьетнам). На рис.7. видно, что с повышением КПД цилиндра высокого давления паровой турбины показатели установки резко возрастают. Так, повышение КПД ЦВД приводит к значительному росту КПД и мощности ГПУ, которые при $\eta_{\text{ЦВД}}=85,625\%$ достигают $\eta_{\text{ГПУ}}=54,977\%$ и $N_{\text{ГПУ}}=1057,409$ МВт.

По расчётам Ленинградского Металлического Завода (ЛМЗ) применение новой проточной части с реактивным облопачиванием и со старым наружным корпусом ЦВД на номинальном режиме увеличивает КПД ЦВД на 7,3%.

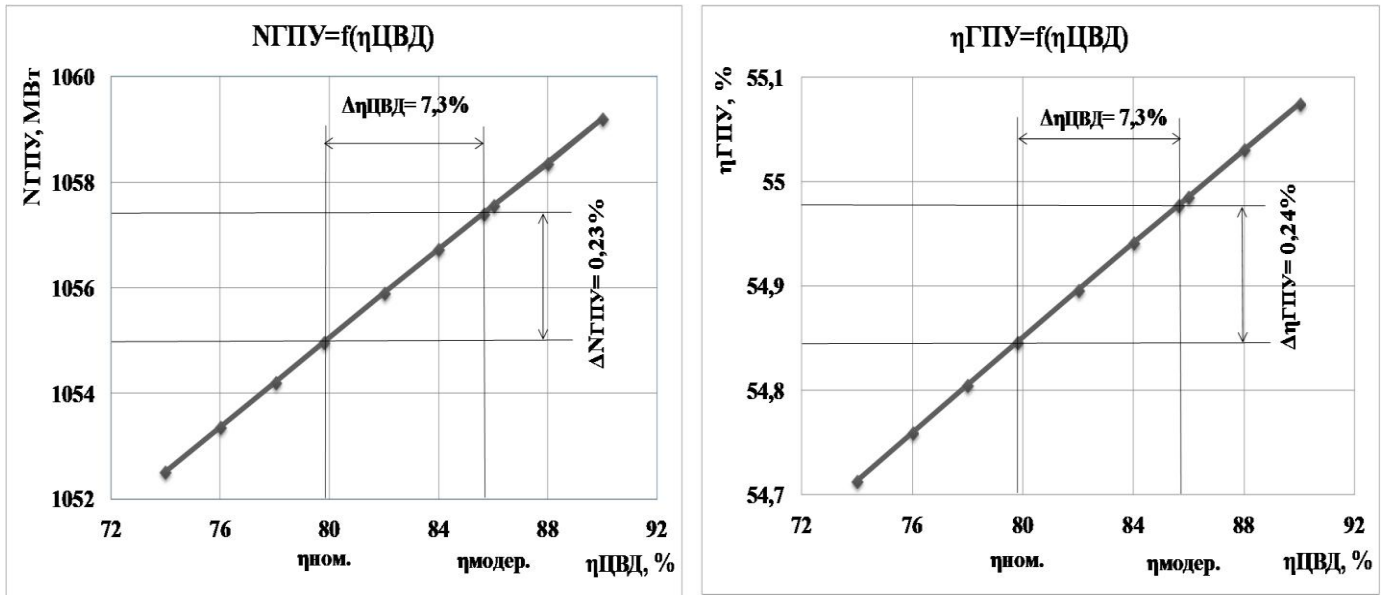


Рисунок 7. Влияние КПД ЦВД паровой турбины К-300-240-2 на мощность и КПД ГПУ-1090

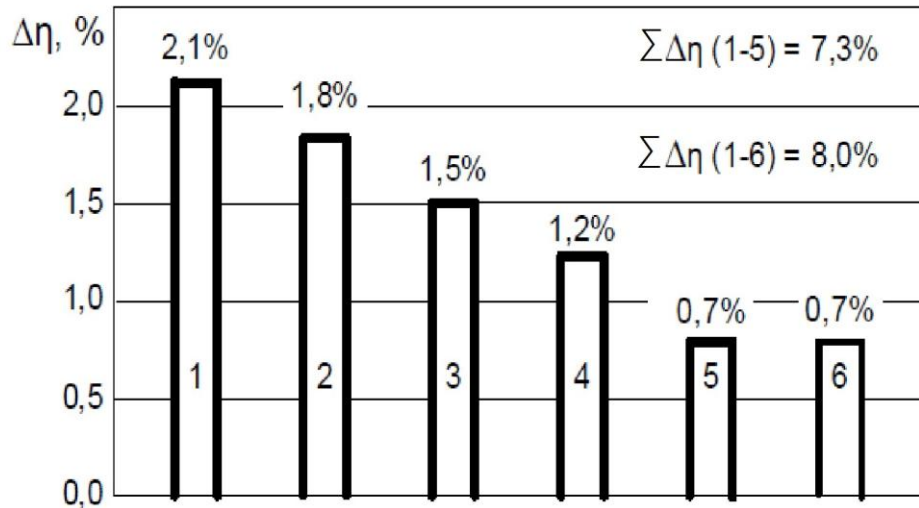


Рисунок 8. Составляющие повышения экономичности ЦВД

Составляющие повышения экономичности ЦВД (рис. 8):

1. – увеличение числа ступеней;
2. – применение развитых уплотнений;
3. – увеличение высоты лопаток и уменьшение диаметра проточной части;
4. – новые эффективные профили направляющих и рабочих лопаток, согласованные с поточными углами;
5. – уменьшение перепада на регулируемую ступень;
6. – новый наружный корпус.

Рассмотрено повышение КПД цилиндра высокого давления паровой турбины за счет применения сотовых надбандажных уплотнений (Результаты тепловых испытаний т/а К-300-240 ст.№4 Каширской ГРЭС). Результаты представленных тепловых испытаний паровых турбин К-300-240 ст.№4 Каширской ГРЭС (см. рис.9) подтверждают, что применение сотовых надбандажных уплотнений в проточных частях позволяет повысить относительный внутренний КПД ЦВД за счёт снижения перетоков пара в уплотнениях, при

этом, в течение межремонтного периода сохраняются стабильными термодинамические характеристики цилиндра

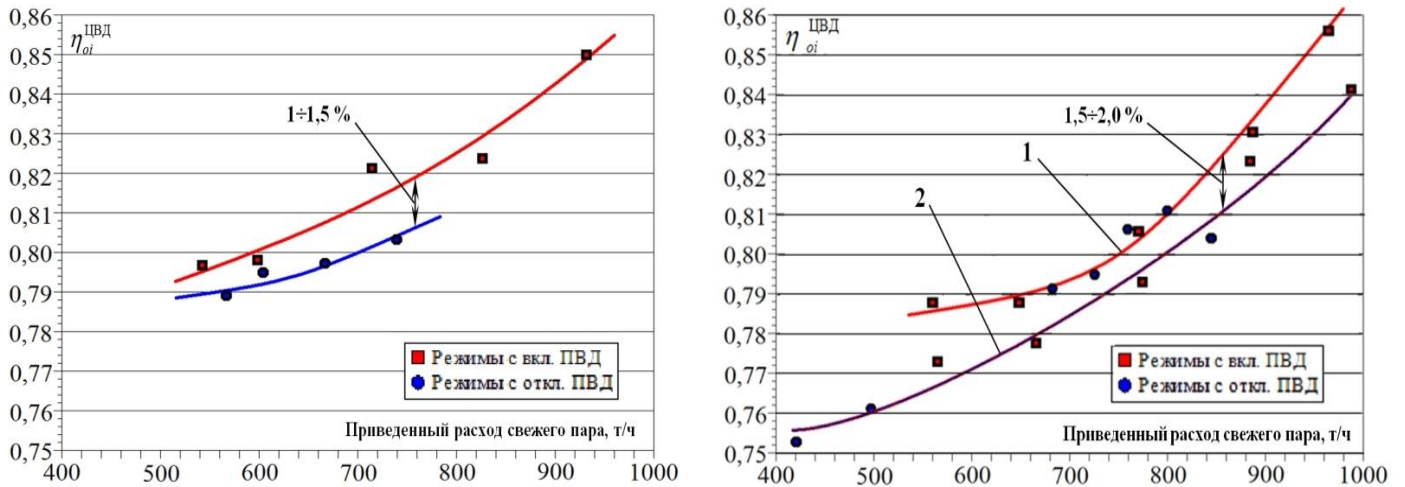


Рисунок 9. Изменение внутреннего относительного КПД ЦВД турбины К-300-240, ст.№4 (I-II-III этапы испытаний, 2004-2009г.): 1 - после установки сотовых уплотнений (II этап испытаний); 2 - после шести лет эксплуатации сотовых уплотнений (III этап испытаний)

Рассмотрено как влияние КПД цилиндра низкого давления (ЦНД) паровой турбины К-300-240-2 (ОАО «ЛМЗ») на КПД и мощность ГПУ-1090 (станция ФуМи-1, Вьетнам).

На рис.10 видно, что с повышением КПД цилиндра низкого давления паровой турбины показатели установки резко возрастают. Так, повышение КПД ЦНД приводит к значительному росту КПД и мощности ГПУ, которые при $\eta_{цнд}=93,571\%$ достигают $\eta_{гпу}=55,505\%$ и $N_{гпу}=1067,531$ МВт.

По данным Ленинградского Металлического Завода (ЛМЗ) модернизация ЦНД приводит к увеличению его средневзвешенного относительного внутреннего КПД по состоянию перед соплами (η_{oi}) на 8,3% (рис.11).

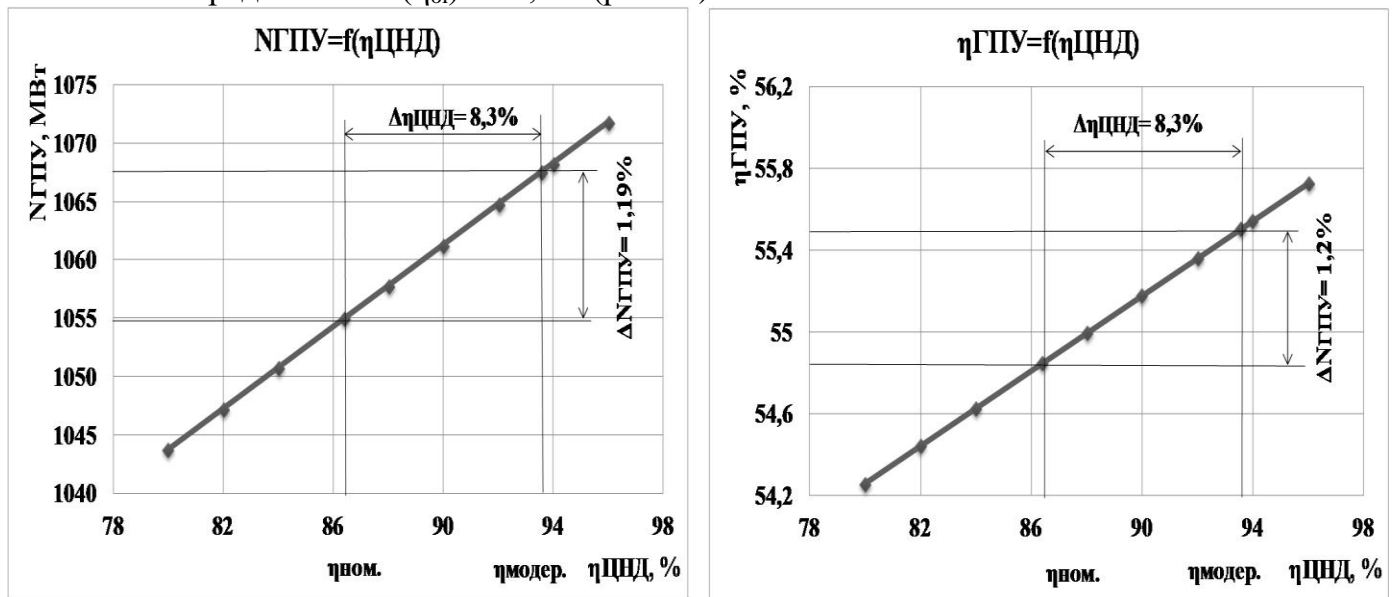


Рисунок 10. Влияние КПД ЦНД паровой турбины К-300-240-2 на мощность и КПД ГПУ

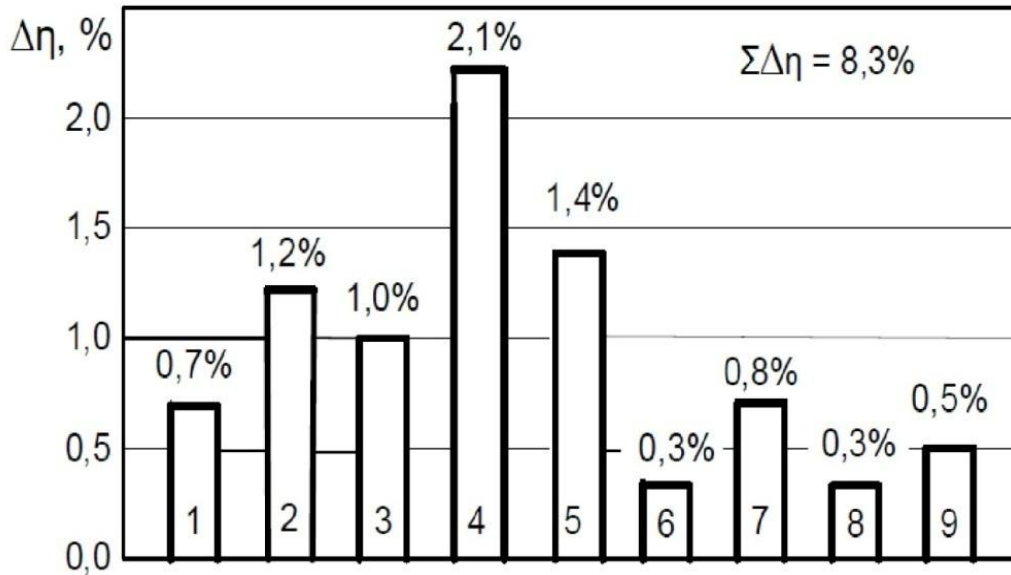


Рисунок 11. Составляющие повышения экономичности ЦНД

Составляющие повышения экономичности ЦНД (см. рис.11):

1. – удаление демпферных связей из проточной части;
2. – направляющие лопатки с тангенциальным навалом;
3. – цельнофрезерованные бандажи, сварные диафрагмы;
4. – согласование поточных и скелетных углов;
5. – плавные меридиональные обводы;
6. – отсос плёночной влаги;
7. – модернизация выхлопного патрубка;
8. – развитые диафрагменные уплотнения;
9. – новая конструкция надбандажных уплотнений.

Рассмотрены способы модернизации турбины К-300-240-2 (Блок №2 на Зуевской ТЭС)

Модернизация турбоагрегата предусматривала:

- модернизацию ЦНД (см. рис.12);
- восстановление проточной части ЦВД с элементами модернизации;
- восстановление проточной части ЦСД с элементами модернизации;
- увеличение пропускной способности турбины.

Таблица 5. КПД ЦВД, ЦСД и ЦНД модернизированной турбины К-300-240-2

Расход свежего пара, т/ч	1050	960	914,6	750	500	400
$\eta_{oi \text{ ЦВД}}, \%$	79,8	78,6	78,3	74,2	65,1	60,6
$\eta_{oi \text{ ЦСД}}, \%$	89,05					
$\eta_{oi \text{ ЦНД}}, \%$	88,6	88,7	88,7	88,3	84,6	83,7

– КПД ЦНД указаны при давлении пара в конденсаторе 6 кПа.

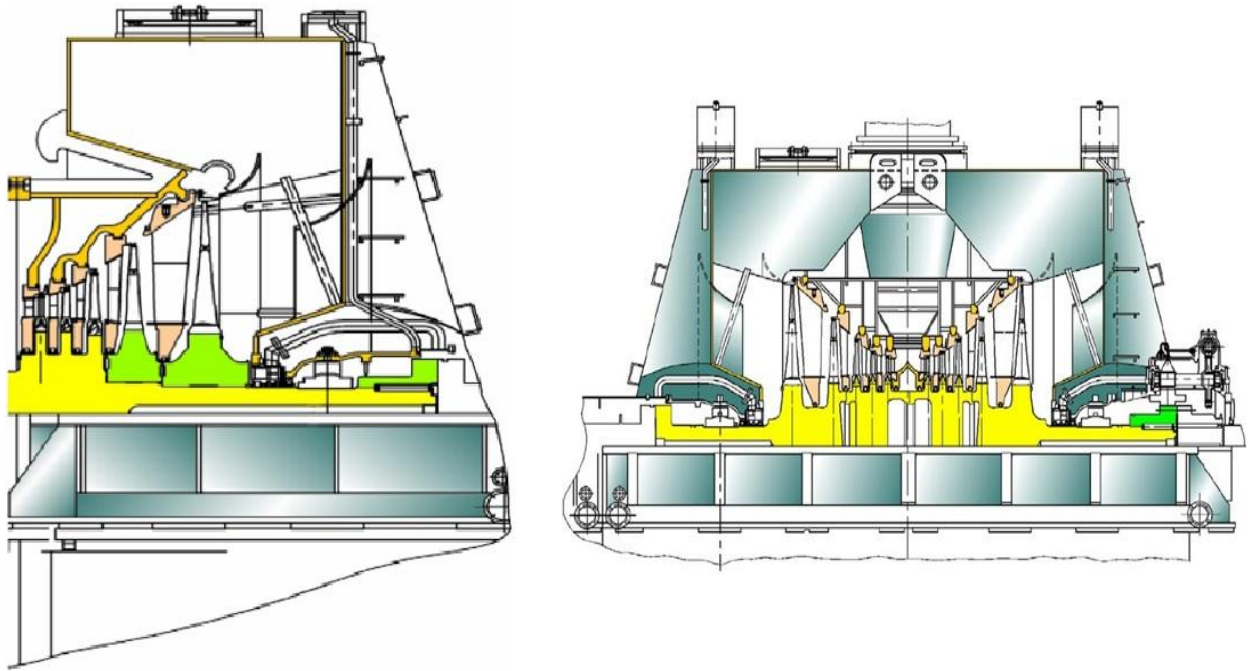


Рисунок 12. Проточная часть I-го, II-го и III-го потока ЦНД модернизированной ПТ К-300-240-2

В таблице 5 и на рисунке 13 показаны КПД турбины К-300-240-2 ст. № 2 Зуевской ТЭС с модернизированным ЦНД, восстановленными ЦВД и ЦСД, а также с внедренными мероприятиями для увеличения расхода свежего пара до 1050 т/ч. КПД ЦНД указанные при давлении пара в конденсаторе 6 кПа.

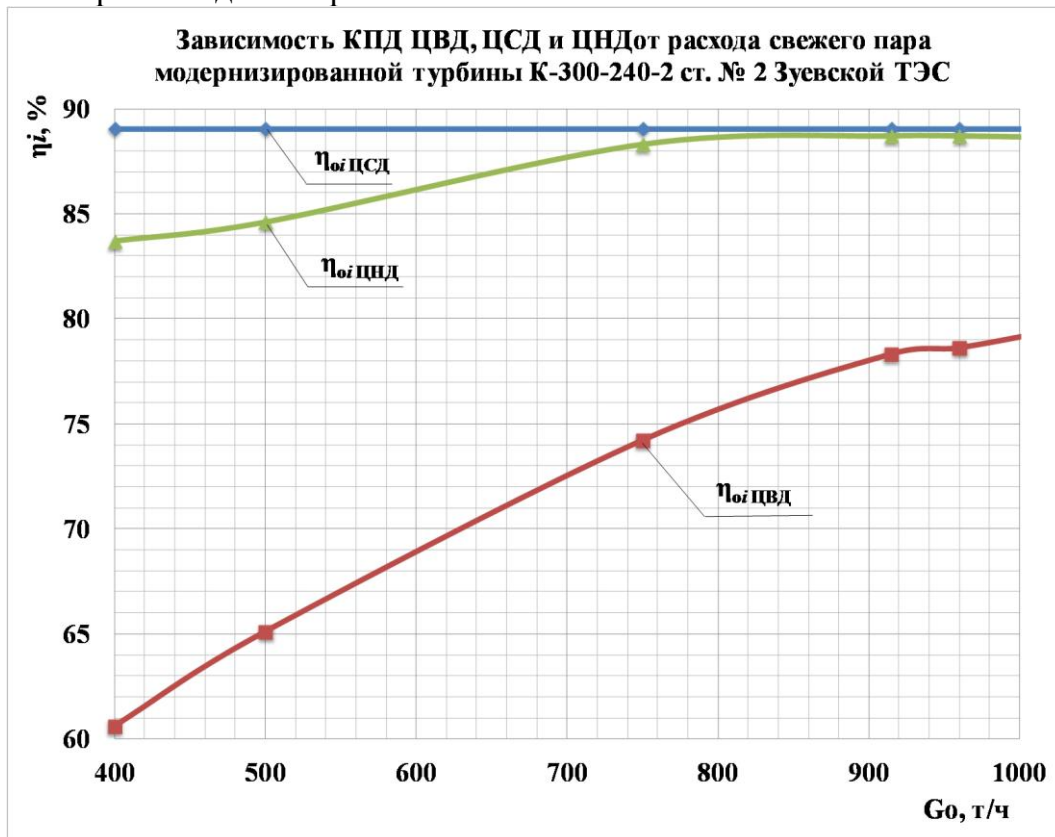


Рисунок 13. Зависимость КПД ЦВД, ЦСД и ЦНД от расхода свежего пара модернизированной турбины К-300-240-2 ст. № 2 Зуевской ТЭС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных теоретических исследований и анализа результатов расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Выполненный обзор современного состояния развития энергетики во Вьетнаме показал, что основными производителями электрической энергии являются гидроэлектростанции, тепловые электростанции с паротурбинными блоками, работающими на угле, и с комбинированными газопаротурбинными установками. Небольшой дефицит электрической энергии покрывается за счет импорта.
2. Для выработки электрической энергии используются новые для Вьетнама альтернативные источники энергии для покрытия пиковых нагрузок при электрификации отдалённых районов страны, так и традиционные источники для выработки базовой нагрузки. К ним относятся: гидроэлектростанции; комбинированные электростанции; тепловые электростанции; атомные электростанции; геотермальные электростанции; солнечные электростанции; ветряные электростанции.
3. Во Вьетнаме существует необходимость в создании тепловых электростанций традиционных типов, а также внедрении перспективных комбинированных установок, обладающих высоким коэффициентом полезного действия. Решить задачу повышения выработки электроэнергии можно не только за счет строительства новых электростанций, но и путем модернизации действующих. Модернизация может быть осуществлена за счет создания комбинированных газопаровых установок на базе имеющихся во Вьетнаме газотурбинных установок, а также за счет применения газопаротурбинного комбинированного цикла с российскими паровыми турбинами.
4. Комбинированные газопаровые установки во Вьетнаме состоят из трех типов: ГПУ с мощностью 450 МВт: 2 ГТ + 1 ПТ; ГПУ с мощностью 750 МВт: 2 ГТ + 1 ПТ; ГПУ с мощностью 1090 МВт: 3 ГТ + 1 ПТ.
 - для ГПУ 2х1 с мощностью 450 МВт предлагается использование паровой турбины **Т-150-7,7** при реконструкции действующих комбинированных установок во Вьетнаме;
 - для ГПУ 2х1 с мощностью 750 МВт предлагается использование паровой турбины **К-330-23,5** при реконструкции действующих комбинированных установок во Вьетнаме;
 - для ГПУ 3х1 с мощностью 1090 МВт предлагается использование паровой турбины **К-300-240-2** при реконструкции действующих комбинированных установок во Вьетнаме.
5. В работе рекомендованы следующие варианты модернизации и реконструкции существующих ГПУ во Вьетнаме:
 - реконструкция блоков ПТ в ГПУ-450 с использованием российской паровой турбины **Т-150-7,7** (ОАО «ЛМЗ»);
 - реконструкция блоков ПТ в ГПУ-750 с использованием российской паровой турбины **К-300-23,5** (ОАО «ЛМЗ»);
 - реконструкция блоков ПТ в ГПУ-1090 с использованием российской паровой турбины **К-300-240-2** (ОАО «ЛМЗ»).
6. В результате расчетных исследований ГПУ-450, ГПУ-750, ГПУ-1090 было показано, что российские паровые турбины **Т-150-7,7; К-300-23,5; К-300-240-2** (ОАО «ЛМЗ») могут быть использованы в проекте ГПУ во Вьетнаме. При этом энергетические показатели

ГПУ оказываются достаточно близкими: мощность в номинальном и КПД нетто. Выбор конкретной ПТУ необходимо проводить после детального технико-экономического анализа вариантов, так как все они обеспечивают весьма близкие по значениям энергетические показатели. Как следует из сравнения полученных результатов, для совершенствования и модернизации комбинированных газопаровых установок во Вьетнаме целесообразно использование новых российских паровых турбин: **Т-150-7,7;** **К-300-23,5** и **К-300-240-2**.

7. Рассмотрено влияние КПД ЦВД и ЦНД российской паровой турбины К-300-240-2 (ОАО «ЛМЗ») на КПД и мощность ГПУ-1090 (станция ФуМи-1, Вьетнам), так и способы повышения экономичности ЦВД и ЦНД паровой турбины К-300-240-2.
 - результаты расчетов показали, что с повышением КПД ЦВД и ЦНД паровой турбины показатели установки резко возрастают. После модернизации КПД ЦВД и ЦНД паровой турбины увеличивают на 7,3% и 8,3%. Так, повышение КПД ЦВД приводит к значительному росту КПД и мощности ГПУ, которые при $\eta_{\text{ЦВД}}=85,625\%$ достигают $\eta_{\text{ГПУ}}=54,977\%$ и $N_{\text{ГПУ}}=1057,409\text{МВт}$. Повышение КПД ЦНД приводит к значительному росту КПД и мощности ГПУ, которые при $\eta_{\text{ЦНД}}=93,571\%$ достигают $\eta_{\text{ГПУ}}=55,505\%$ и $N_{\text{ГПУ}}=1067,531\text{МВт}$.
 - применение сотовых надбандажных уплотнений турбины К-300-240 могут увеличить КПД до 1,5...2,0%.
8. При проведении мероприятий по повышению экономичности ЦВД и ЦНД КПД и мощности ГПУ могут быть увеличены на 1,4% до $\eta_{\text{ГПУ}}=55,633\%$ (вместо $\eta_{\text{ГПУном.}}=54,85\%$) и $N_{\text{ГПУ}}=1069,913\text{МВт}$ (вместо $N_{\text{ГПУном.}}=1055\text{МВт}$).

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Фам А.Х.** Состояние и перспективы развития энергетики Вьетнама / А.Х. Фам, А.В. Рассохин, К.Д. Андреев // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2013. – № 1(166). – С. 32–35.
2. **Фам А.Х.** Расчетный анализ тепловой схемы газопаровой установки для энергетики Вьетнама / А.Х. Фам, А.В. Рассохин, К.Д. Андреев // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2014. – № 2(195). – С. 34–40.
3. **Фам А.Х.** Выбор российских паровых турбин для работы в составе газопаровых установок во Вьетнаме. Влияние КПД цилиндра высокого давления паровой турбины к-300-240-2 на мощность ГПУ во Вьетнаме / Фам Ан Хоаи. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – №06(110). – IDA [article ID]: 1101506069. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/06/pdf/69.pdf>, 0,875 у.п.л.
4. **Фам. А.Х.** Современное состояние и перспективы использования комбинированных газопаротурбинных установок во Вьетнаме // Евразийский союз ученых (ЕСУ) – М., 2015. – № 5(14). – С. 170–173.
5. **Фам А.Х.** Повышение мощности комбинированных газопаровых установок Вьетнама за счет повышения КПД цилиндра высокого давления российских паровых турбин // Национальная ассоциация ученых (НАУ). Ч.2. – Екатеринбург., 2015. – № 5(10). – С. 93–96.
6. **Фам А.Х.** Выбор паровой турбины для работы в составе газопаровой установок во Вьетнаме // Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции. Институт энергетики и транспортных систем СПбПУ. Ч.2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015г. — С. 116–118.