Филиал ОАО «Силовые машины» «Ленинградский Металлический завод» в Санкт-Петербурге

На правах рукописи

Лебедев Александр Серафимович

РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ СРЕДНЕГО КЛАССА МОЩНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСА СОВРЕМЕННЫХ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Специальность 05.04.12 - Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Санкт-Петербург, 2007г.

2

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Основные условные обозначения и сокращения 6

Введение 12

1. Обзор технического уровня ГТУ в России и за рубежом 20

1.1. Развитие энергетического газотурбостроения в России 20

1.2. Технический уровень энергетического газотурбостроения в

России и за рубежом, классификация ГТУ 26

1.2.1. Технический уровень ГТУ, производимых в России и СНГ 26

1.2.2. Классификация ГТУ по уровню мощности, областям

применения и технико-экономическим показателям 31

1.3. Тенденции совершенствования ГТУ по технико-экономическим

показателям и технический облик разрабатываемой ГТУ среднего класса мощности 34

1.4. Потребности рынка энергетического газотурбостроения в мире 48

1.5. Роль газотурбостроения в Концепции технической политики

РАО «ЕЭС России» 52

1.6. Перспективы внедрения ГТУ среднего класса мощности 53

2. Выбор и обоснование основных показателей ГТУ среднего

класса мощности 60

2.1. Методологические основы анализа тепловых схем и основных

характеристик ГТУ 60

2.1.1. Тепловая схема одновальной ГТУ простого цикла 60

2.1.2. Определение параметров рабочего процесса в характерных

сечениях проточной части ГТУ 67

2.1.3. Возможности повышения показателей современных

энергетических ГТУ, оптимизация и выбор их параметров 70

2.2. Методология создания компрессора ГТУ средней мощности

методами численного моделирования 77

з

77

80

93

95

95

101

103

112

114

114

115

130

134

144

156

156

156

158

161

Выбор и обоснование параметров компрессора

3D расчеты течения на номинальном режиме

CFD расчеты входного устройства и закомпрессорного

диффузора

Принципы построения низкоэмиссионных кольцевых камер сгорания ГТУ

Концепция создания низкоэмиссионной камеры сгорания Основные принципы формирования конструктивных решений по камере сгорания

Теоретическая модель физических процессов в камере сгорания Алгоритм работы низкоэмисионной камеры сгорания Теоретические основы создания высокоэффективной охлаждаемой турбины ГТУ среднего класса мощности Общие принципы формирования проточной части турбины Численные исследования оптимальных параметров проточной части турбины

Выбор и обоснование необходимой системы воздушного охлаждения для турбин высокотемпературных ГТУ Разработка схем охлаждения лопаточного аппарата турбинных ступеней ГТУ

Теоретическое обоснование необходимых характеристик прочности основных узлов ГТУ

Материально-техническая база для исследования узлов ГТУ среднего класса мощности

Стенд для испытаний модельных компрессоров Описание стенда Экспериментальная модель Методика и средства и измерений

4

169

174

174

182

183

190

192

192

196

198

199

205

205

218

229

229

242

Стенды для определения потерь в закомпрессорном диффузоре и усталостных испытаний лопаток компрессора Стенды для испытаний камер сгорания Описание стендов

Испытуемый модуль камеры сгорания Методика и средства измерений Погрешности измерений

Стенд для испытаний охлаждаемых лопаточных аппаратов

турбины

Описание стенда

Объекты исследований

Методика исследований пропускной способности систем охлаждения и теплового состояния лопаток турбины с конвективной и конвективно-пленочной системами охлаждения Схемы измерений

Результаты исследований экспериментальных узлов ГТУ, сравнение опытных и расчетных данных

Характеристики модельного компрессора по результатам испытаний, результаты тензометрирования рабочих лопаток Характеристики экспериментального отсека камеры сгорания, технические решения по доработке штатного варианта Экспериментальные теплогидравлические характеристики лопаток турбины с конвективным и конвективно-пленочным охлаждением, сравнение опытных результатов и теоретических расчетов

Результаты исследований сопловых лопаток турбины с конвективной системой охлаждения (2-ой ступени)

Результаты исследований рабочих лопаток турбины с конвективной системой охлаждения (2-ой ступени)

5

249

253

253

279

286

288

291

295

297

304

307

319

Результаты исследований рабочих и сопловых лопаток турбины с конвективно-пленочной системой охлаждения (1-ой ступени)

Разработка конструктивного облика энергетической ГТУ среднего класса мощности на примере ГТЭ-65 и ее использование в блоках ПГУ

Описание конструкции ГТУ в целом, технологии изготовления основных узлов и сборки

Основные принципы организации системы автоматического управления и регулирования ГТУ среднего класса мощности Возможности использования разработанной ГТУ среднего класса мощности в парогазовых блоках, привязка головного образца к объекту эксплуатации

Конденсационные ПГУ с ГТУ среднего класса мощности Теплофикационные ПГУ с ГТУ среднего класса мощности Теплофикационные ПГУ для схем с поперечными связями Рекомендации по внедрению результатов исследований и их использованию для дальнейшего совершенствования ГТУ среднего класса мощности

Основные результаты и выводы по работе

Литература

Приложение. Программа специальных испытаний (НИОКР) головного образца ГТЭ-65 на ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго»

6

РазработанаотечественнаяэнергетическаягазотурбиннаяустановкасреднегоклассамощностиВосновуметодологииразработкиположеноприменениекомплексатеоретическихметодовтрехмерногочисленногомоделированияосновныхузловГТУмаксимальноеиспользованиеотработанныхнапрототипахконструкторскотехнологическихрешенийпроведениестендовыхмодельныхиспытанийкомпрессоракамерысгоранияиохлаждаемыхтурбинныхлопатоксопоставлениечисленныхмоделейсэкспериментальнымиданнымиоптимизациятехническихрешенийпорезультатамиспытанийивнедрениеотработанныхтакимобразомузловвконструкциюГТУ

Основныенаучноисследовательскиерезультатыработызаключаютсявследующем

 оптимизированытермодинамическиепараметрыосновныхузловгазотурбиннойустановкикомпрессоракамерысгоранияитурбиныаиххарактеристикивзаимоувязаныдляработывединомтурбоагрегатечтообеспечилоэлектрическийКПДэнергетическойГТУсреднегоклассамощности

 разработанаизготовленавмасштабеииспытананастендемодельпервыхшестинаиболеенагруженныхступенейкомпрессораопределеныгазодинамическиехарактеристикимодельногоотсекаивибрационноесостояниелопаточногоаппаратакоторыепозволилиуточнитьтеоретическуюмодель

 спроектировантиступенчатыйосевойкомпрессорсостепеньюсжатияиадиабатическимКПДнаноминальномрежимеисоответственноимеющийтриступениповоротныхнаправляющихаппаратовдлярегулировкирасходаиподдержанияпостояннойтемпературынавыходеизГТУотдоеемощности





 созданспециализированныйстендиспытанийкамерсгоранияиихэлементовнагазообразномтопливепридавлениивоздухадоМПанатурныхтемпературахгазадо°Сивоздухадо°СнакоторомпроведеныиспытаниямодулясегментакольцевойкамерысгоранияприменительнодляГТУсреднегоклассамощности

 наоснованиирасчетноэкспериментальныхисследованийразработанакольцеваямалоэмиссионнаякамерасгоранияобеспечивающаязаданнуюрадиальнуюиокружнуюэпюрытемпературпередтурбинойсмаксимальнымизначениямивпределахисоответственноотподогревавкамересгоранияидопустимыйнормативнымидокументамиуровеньвыбросовмгнмпри

 разработанлопаточныйаппараттурбинысконвективнопленочнойсистемойохлажденияойступениобеспечивающейглубинуохлаждениявсреднемсечениииконвективнойсистемойохлажденияойступенитурбинысглубинойохлаждениявсреднемсечениикоторыйможетбытьизготовленметодомосвоеннойравнооснойтехнологииповыплавляемыммоделям

 проведенытеплогидравлическиеиспытанияполноразмерныхтурбинныхлопатоксконвективнопленочнойиконвективнойсистемамиохлаждениякоторыеприблизкихкнатурнымтемпературамгазадо°Сивоздухадо°Сатакженоминальныхотношенияхдавленияохлаждающеговоздухакстатическомудавлениюгазанавыходнойкромкепозволилиопределитьрасходныехарактеристикисистемохлаждениялопатокихтемпературноесостояниеибезразмернуюглубинуохлаждения

 спроектированахступенчатаятурбинасвнутреннимКПДимеющаясемьохлаждаемыхвенцоввоздухнаохлаждениеиуплотнениезазороввсуммарномколичествеотбираетсякакиззакомпрессоратакиотпромежуточныхегоступеней

 врезультатемодельныхиспытаниймасштабированногокомпрессора



модулякамерысгоранияиполноразмерноголопаточногоаппаратаэкспериментальнымпутемвыявленыосновныеособенностиаэродинамическихитепловыххарактеристикэтихузловчтопозволилоидентифицироватьтеоретическиемоделииуточнитьинженерныеметодикиихрасчетовтрансформироватьполученныерезультатынанатурныеусловияэксплуатацииГТУ

 набазеизложенныхвработеметодовирекомендациймогутбытьразработаныисозданыГТУсреднегоклассамощностиМВтсКПДнеменееатакжеГТУбольшегоклассамощностивплотьдоМВтпутемаэродинамическогоитепловогомасштабирования

 разработаннаяГТУпозволяетрекомендоватьеедляширокогоиспользованиявразличныхсхемахкомбинированногоциклабинарныхКПДнеменеесхемахнадстройкипаросиловыхблоковидлядругихрегенеративныхвариантов

ПрактическимвнедрениемявляетсяиспользованиенаучнотехническихрезультатовработыприсозданиивФилиалеОАОСиловыеМашиныЛМЗголовногообразцаотечественнойэнергетическойгазотурбиннойустановкиГТЭдляэксплуатациивсоставеблокаПГУпосхемеспараллельнымисвязяминаТЭЦОАОМосэнерго