

От редакции

6 Стране нужны современные ГТУ. Необходимо объединить промышленность и науку

А.Ю. Култышев, д.т.н., главный редактор — журнал «Турбины и Дизели»

Интервью

8 Сервис и ремонт иностранных ГТУ - подготовительный этап в создании передовых российских газовых турбин

О.В. Шевченко — ООО «ТурбоСервис Рус»

Газотурбинные установки

12 Аддитивные технологии для изготовления деталей и сборочных единиц камер сгорания газотурбинных установок

Д.Д. Печенкин, Ю.В. Матвеев (к.т.н.), В.А. Рассохин (д.т.н.), М.А. Крюкова – ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ключевые слова: камера сгорания, аддитивные технологии, газотурбинная установка, СЛС, ПЛВ, 3D-печать

Аннотация

Камера сгорания является одной из основных систем газотурбинной установки, в состав которой входят такие сложные конструктивные узлы, как горелочные устройства, завихрители, переходные секции, смесители и др. В настоящее время при изготовления подобных узлов помимо традиционных технологий применяются и аддитивные технологии из металлопорошковых композиций никелевых сплавов. Это упрощает и ускоряет изготовление сложных деталей и сборочных единиц камер сгорания.

В статье представлен обзор применения аддитивных технологий в производстве деталей и сборочных единиц камер сгорания в экспериментальных и в эксплуатируемых установках в России и за рубежом. Основным методом изготовления является селективное лазерное сплавление, позволяющее получать точные изделия с плотной микроструктурой. Крупногабаритные узлы камер сгорания изготавливаются методом прямого лазерного выращивания. Рассмотрены используемые материалы, аддитивные машины и шероховатость поверхностей. Селективным лазерным сплавлением возможно достичь шероховатости

поверхности менее Ra 5 мкм, снижения массы изделия на 25% и точной печати отверстий диаметром 0,5 мм. Сделаны выводы о современном состоянии темы и ее дальнейшем развитии.

18 Обоснование оптимальной мощности и тепловых схем газотурбинных ТЭЦ для объектов распределенной генерации

А.Ф. Рамазанов – АО «ГТ Энерго»

Аннотация

Возможность гибкого использования газотурбинных энергоблоков в многоагрегатных электростанциях для производства электрической и тепловой энергии позволяет максимально эффективно использовать топливо, продлять ресурс ГТУ и обеспечивать надежное снабжение потребителей энергией.

22 Влияние положения RS-интерфейсов структурированной расчетной сетки на характеристики многоступенчатого осевого компрессора ГТУ

Е.И. Давлетгареева, А.К. Воробьев, А.С. Золотухин – АО «Силовые машины»

Ключевые слова: RS-интерфейс, газотурбинная установка, осевой компрессор, газодинамические характеристики

Аннотация

В статье представлен обзор расчетных работ, проводимых в рамках исследования влияния положения RS-интерфейсов структурированной расчетной сети на характеристики многоступенчатого осевого компрессора ГТУ. RS-интерфейс в Ansys CFX – граничное условие между расчетными сетками статорных и роторных венцов компрессора, позволяющее передавать данные о потоке между вращающимся и невращающимся лопаточным аппаратом.

В ходе работы рассматривались варианты расчетных моделей 16-ступенчатого осевого компрессора ГТЭ-170.1 при смещении ротор-статор интерфейсов вниз по потоку: а) на 25% величины межвенцового зазора; б) на 50% величины межвенцового зазора (RS-интерфейсы находятся примерно посередине зазора); в) на 75% величины межвенцового зазора. Для определения запаса газодинамической устойчивости (DKy) проверялась работа компрессора на номинальном режиме, при повышенной/пониженной температуре на входе в компрессор, а также на режиме повышенной нагрузки на входной блок ступеней.

Аэродинамические расчеты проводились с использованием программных продуктов NUMECA AutoGrid5 и Ansys CFX.

В результате исследования установлено, что при смещении RS-интерфейсов вниз по потоку распределение нагрузки и фактор диффузорности по венцам компрессора изменяются, аэродинамическая нагруженность лопаток увеличивается, что приводит к уменьшению запасов газодинамической устойчивости компрессора.

Эксплуатация, сервис

26 Газовые турбины на Юго-Западной ТЭЦ обслуживаются компанией «Турбосервис»

М.М. Харитонов – ООО «ТурбоСервис Рус»

Аннотация

В марте текущего года станция выработала более 328 млн кВт·ч – такой показатель достигнут впервые с 2011 года. В феврале 2026 года коэффициент использования установленной мощности генерирующего оборудования превысил 96,8%. Такие показатели невозможны без надежной работы газотурбинных энергоблоков станции.

Газотурбинные установки

28 Основные уравнения методики определения степени эрозионного износа лопаток осевых компрессоров ГТУ в условиях эксплуатации

И.С. Зубков, В.Л. Блинов (к.т.н.) – ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ключевые слова: газотурбинная установка, осевой компрессор, техническое состояние, эрозионный износ, численное моделирование

Аннотация

Эрозионный износ лопаточного аппарата осевых компрессоров газотурбинных установок приводит к значительному ухудшению их эксплуатационных характеристик и повышению вероятности отказов и аварий для всего агрегата. Это обуславливает высокую актуальность исследований, связанных с оценкой фактического технического состояния

отдельных узлов ГТУ и определением наличия типов дефектов. Целью настоящего исследования является разработка методики для определения текущей степени эрозионного износа лопаток осевого компрессора по изменению характеристик ГТУ в процессе работы в условиях эксплуатации. В статье предложен подход к представлению интегральных характеристик компрессора в безразмерном виде в полярной системе координат. На базе данного подхода сформированы уравнения, позволяющие при известном изменении рабочих параметров компрессора определить характерную степень эрозионного износа. В основу уравнений легли как эксплуатационные и статистические данные об отказах ГТУ вследствие эрозионного износа ОК, так и результаты численных расчетов модельных ступеней Stage 37 и Stage 38, содержащих лопатки с износом. Полученная математическая зависимость представляет собой полином второй степени с рядом поправочных коэффициентов, учитывающих конструктивные особенности и режим работы. Проверка применимости уравнений в части определения характеристик изношенных компрессоров была выполнена для реально эксплуатируемых установок в составе газоперекачивающих агрегатов типа ГТК-10-4 и ГТН-16.

34 Восстановительный ремонт 15-й ступени компрессора SGT5-4000F:

реализация технического решения

Д.А. Егоров, Ю.С. Чичагов, Г.В. Даценко - ООО «ГЭХ Сервис газовых турбин»

Аннотация

ООО «ГЭХ Сервис газовых турбин», выполнив конструкторско-технологическую подготовку, самостоятельно провела ремонт компрессорной ступени газотурбинной установки SGT5-4000F версии SP8. Работоспособность ГТУ полностью восстановлена, парогазовый блок введен в промышленную эксплуатацию.

36 Проблема расчета пленочного охлаждения лопаток ГТУ средствами вычислительной аэродинамики

М.Г. Черкасова, Д.И. Крупнов – АО «Силовые машины»

Ключевые слова: конвективно-пленочное охлаждение, коэффициент эффективности охлаждения, газовая турбина, сопряженный теплогидравлический расчет, ламинарно-турбулентный переход

Аннотация

Для охлаждения сопловых лопаток первой ступени турбины ГТУ, работающих при температурах 1500 оС и выше, сегодня наиболее эффективно конвективно-пленочное охлаждение. Конвективная составляющая такого охлаждения хорошо изучена и довольно точно моделируется различными средствами вычислительной аэродинамики. Напротив, процесс выпуска воздуха на наружную поверхность лопатки, образование пелены и последующее смещение воздуха с газом не удается численно смоделировать, используя общепринятые модели турбулентности. Результаты расчетов не подтверждаются результатами экспериментов.

Предварительные исследования проводились на плоской пластине. Оценивалось влияние ряда сеточных параметров и настроек решателя. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало сильную зависимость результатов от параметров сетки и отсутствие сеточной сходимости. Расчетные значения приближаются к экспериментальным лишь на большом удалении от места выпуска воздуха на наружную поверхность пластины.

Аналогичные результаты показало расчетно-экспериментальное исследование сопловой лопатки с конвективно-пленочным охлаждением.

42 Вектор развития энергетики

Б.А. Рыбаков, к.т.н. - ООО «ИМПЕКС-1»

Аннотация

В 2015 году в рамках Рамочной конвенции ООН было принято Парижское соглашение по климату, согласно которому страны, подписавшие этот документ, взяли на себя обязательства по снижению выбросов в атмосферу парниковых газов.

46 Совершенствование системы охлаждения лопатки газовой турбины на основе разработки цифрового двойника

А.Д. Бодунова, Н.А. Забелин (д.т.н.), Ю.В. Матвеев (к.т.н.) —

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

С.В. Таборская — ООО «ТурбоСервис Рус»

Ключевые слова: цифровой двойник, газотурбинная установка, температура на входе в турбину, двухстенное конвективно-пленочное охлаждение, жизненный цикл, расход охлаждающего воздуха

Аннотация

Эффективность газотурбинных установок в цикле Брайтона в основном определяется температурой газа на входе в турбину, однако даже самые современные сплавы могут работать продолжительное время без охлаждения при температуре не более 1300 К (1013 °С). Показано, что из каждых 100 °С прироста температуры цикла 25 °С обеспечиваются разработкой новых материалов, еще 25 °С добавляют термобарьерные покрытия, а оставшиеся 50 °С приходится на долю совершенствования системы охлаждения лопаток. Таким образом, решающую роль играет совершенствование систем охлаждения, проектирование которых требует многовариантного анализа теплообмена, гидравлики и термомеханики.

Кардинальное решение подобных задач обеспечивает концепция цифрового двойника – виртуальной модели, включающей геометрию, свойства материалов и математическое описание процессов. В первой части статьи изложены принципы построения цифровых двойников, их классификация, жизненный цикл, ценность, ограничения и перспективы. Во второй части на примере системы охлаждения лопатки ГТУ показано, что двухстенное конвективно-пленочное охлаждение, при снижении расхода охлаждающего воздуха в 1,22 раза, обеспечивает работоспособность лопаточных аппаратов, несколько повышая эффективность, что численно выражается в уменьшении средней температуры стенки лопатки на 5 °С.

52 Влияние капельной влаги на эффективность фильтрации воздуха в КВОУ ГТУ и способы защиты фильтрующих материалов

Н.В. Рокотов, д.т.н. – Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

В.Д. Буров, к.т.н. – ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Ключевые слова: газотурбинная установка, комплексное воздухоочистительное устройство, капельная влага, коалесценция, гидрофобность, фильтр тонкой очистки, перепад давления, аэродинамическое сопротивление

Аннотация

Рассмотрено воздействие капельной влаги на фильтрующие элементы комплексных воздухоочистительных устройств ГТУ. Проанализированы формы содержания воды в атмосферном воздухе и механизмы их влияния на фильтрационные характеристики материалов. Показано, что ключевым фактором надежности системы является функциональное разделение ступеней: первая ступень должна обеспечивать влагозадержание и коалесценцию, вторая – тонкость очистки. Обоснован принцип приоритетности задач: фильтр первой ступени должен защитить вторую ступень от влаги.

Показаны гравитационный и аэродинамический методы удаления накопленной влаги. Особое внимание уделено влиянию ориентации складок на эксплуатационные характеристики. На основе эксплуатационных данных независимой организации Turbine Air для электростанции ПАО «Мосэнерго» и результатов диссертационных исследований Sothen (2009) приведены количественные оценки влияния аэродинамического сопротивления и неравномерности загрузки фильтров на мощность и экономичность ГТУ. Представлен практический опыт модернизации КВОУ в условиях высокой влажности (Сингапур) с применением коагулирующих предфильтров и гидрофобных фильтров тонкой очистки.

На основе лабораторных испытаний и эксплуатационных данных проанализировано влияние свойств фильтрующих материалов (гидрофобность, многослойная структура, тип волокон) на устойчивость к проникновению влаги и сохранение рабочих характеристик в условиях циклического увлажнения.

62 Апробация методики определения степени эрозионного износа лопаток осевых компрессоров ГТУ в условиях эксплуатации

И.С. Зубков, В.Л. Блинов (к.т.н.) – ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ключевые слова: газотурбинная установка, осевой компрессор, техническое состояние, эрозионный износ, численное моделирование

Аннотация

Эрозионный износ лопаточного аппарата осевых компрессоров ГТУ приводит к значительному ухудшению их эксплуатационных характеристик и повышению вероятности отказов и аварий для всей установки. Целью исследования является разработка методики для определения текущей степени эрозионного износа лопаток ОК по изменению характеристик ГТУ. В настоящей статье описана методика определения текущей степени износа лопаток компрессора по изменению характеристик работы ГТУ, измеряемых в условиях эксплуатации. Важным преимуществом предлагаемой методики является возможность ее использования в условиях ограниченного количества измеряемых параметров. В работе представлены результаты апробации методики в условиях действующего газотранспортного предприятия для установок в составе газоперекачивающих агрегатов типа ГТК-10-4. В рамках апробации осуществлялось натурное измерение геометрических размеров рабочих лопаток компрессоров после вывода ГТУ в плановый капитальный ремонт, фиксация действительной степени износа и сравнение ее с результатами применения оценочных уравнений для определения степени износа по эксплуатационным параметрам ГТУ. По результатам апробации установлено, что подход к оценке степени эрозионного износа лопаток компрессора обладает удовлетворительной точностью. Среднее значение абсолютного отклонения между результатами применения оценочных уравнений и непосредственными измерениями не превышало 0,07% при максимальной разнице равной 0,17%.

Эксплуатация, сервис

68 Инспекция С2 турбины GT13E2 на Новогорьковской ТЭЦ - первый ремонт в России

З.Т. Саидова – ООО «ТурбоСервис Рус»

Аннотация

Предприятие «Турбосервис» первым в России провело инспекции уровня С2 газовых турбин 13E2. В результате капитального ремонта ресурс газотурбинных установок продлен на 50 тыс. часов.

Паротурбинные установки

70 Новая конструкция высокоэффективных лабиринтных уплотнений осевых турбомашин

А.Д. Градусов, И.А. Тимофеев, А.Б. Богачев, С.Ю. Евдокимов – АО «Силовые машины»

Ключевые слова: паровая турбина, лабиринтное уплотнение, сотовые вставки, плотнение турбины, подпружиненный сегмент, уплотнительный гребень

Аннотация

В современном турбостроении повышение экономичности паровых и газовых турбин напрямую связано с минимизацией внутренних перетечек рабочего тела через зазоры между вращающимися и неподвижными элементами проточной части. Несмотря на многолетнюю историю применения, традиционные конструкции с симметричными уплотнительными гребнями на статоре и гладкой поверхностью ротора имеют ограничения по эффективности, что обусловлено неполной диссипацией кинетической энергии в камерах разрежения.

В последние десятилетия активно развиваются подходы, направленные на интенсификацию вихреобразования в зазорах уплотнений: применение сотовых вставок, наклонных гребней, а также комбинированных структур. Однако многие из предлагаемых решений либо представляют сложность в изготовлении, либо требуют увеличения осевых габаритов.

В данной работе представлена новая конструкция уплотнений, сочетающая наклонные гребни на статоре и кольцевые канавки на роторе, которая позволяет значительно повысить эффективность уплотнения без существенного усложнения технологии изготовления.

74 Проектирование регулирующей ступени ЦВД паровой турбины: анализ современных подходов

К.В. Иваничкин, И.А. Тимофеев, А.Д. Карпов, Л.Р. Белякова – АО «Силовые машины»

Ключевые слова: паровая турбина, регулирующая ступень, сопловая коробка, направляющий аппарат, камера регулирующей ступени, сопловое парораспределение, парциальность

Аннотация

На основе анализа многолетнего опыта эксплуатации паровых машин, у инженеров, специализирующихся на проектировании паровых турбин, есть возможность создать более эффективную и экономичную машину.

Повышение эффективности проточных частей паровых турбин является одной из основных задач в современном турбостроении. За последние годы методы численных и экспериментальных исследований, а также подходы к проектированию получили значительное развитие, открыв новые перспективы усовершенствования конструкции паровых турбин и, как следствие, показателей ее эффективности.

Статья посвящена исследованию существующих конструкций регулирующих ступеней паровых турбин с сопловым парораспределением, а также описанию подходов к ее проектированию. Под понятием «регулирующая ступень» рассматривается комплекс из сопловой коробки, направляющего аппарата, рабочего колеса и камеры за регулирующей ступенью (пространство между регулирующей ступенью и первой ступенью давления). Представлены подходы к проектированию регулирующих ступеней ЦВД мощной паровой турбины.

Технологии

78 Инженерно-техническое сопровождение ГТУ SGT-800 на Березовской ГРЭС

Н.В. Мартелов, А.С. Спиридонов, А.П. Титов – ООО «ДМЭнерджи»

Аннотация

В статье рассмотрен опыт инженерно-технического сопровождения газотурбинных установок SGT-800 производства Siemens, эксплуатируемых в составе пиково-резервных энергоисточников филиала «Березовская ГРЭС» РУП «Брестэнерго».

Показано, что в условиях ограниченной доступности сервисной поддержки со стороны производителей оборудования особое значение приобретают регулярный анализ эксплуатационных параметров, дистанционная техническая поддержка, выездные обследования и формирование практических рекомендаций для эксплуатирующей организации.

Работы выполнялись ООО «ДМЭнерджи» - специализированной инженерно-сервисной компанией, осуществляющей поддержание жизненного цикла импортных газотурбинных установок производства Siemens, General Electric, Solar и др.

84 Восстановление лопаток ГТД методом лазерной наплавки: опыт применения установки МЛ72

А.Л. Цыганцова, Е.С. Платов – ООО «НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»

Аннотация

Лопатки газотурбинных двигателей – одни из наиболее ответственных и дорогостоящих деталей энергетических установок. В процессе эксплуатации они испытывают колоссальные нагрузки: высокотемпературный газовый поток, центробежные силы, вибрации, агрессивная среда.

Закономерным следствием становится износ торцевых поверхностей и появление локальных дефектов. Полная замена лопатки обходится в разы дороже квалифицированного ремонта, поэтому технологии их восстановления находятся в фокусе внимания ведущих машиностроительных предприятий. В статье представлен практический опыт компании в реализации полного технологического цикла лазерной наплавки лопаток на установке МЛ72.

Интервью

86 Смазочный материал как элемент надежности

С. В. Гусев – ООО «С-Техникс»

Аннотация

Применение качественных отечественных масел и рабочих жидкостей в сложном, высокотехнологичном оборудовании позволяет эксплуатирующим организациям быть уверенными в сохранении ресурса машин и механизмов.

Эксплуатация, ремонт

90 Уфимский турбинный завод: курс на возрождение стационарного турбостроения и импортонезависимость

Д.А. Бернгардт, Д.В. Симонов, Е.Д. Ноздря, С.Н. Владимиров – ООО «ЦентрИнжиниринг»

Р.Э. Багаутдинов, В.Е. Спирин – ООО «Уфимский турбинный завод»

Аннотация

На территории Республики Башкортостан создается благоприятный инвестиционный климат для развития промышленных предприятий, осваивающих выпуск высокотехнологичного оборудования для топливно-энергетического комплекса страны. Правительством республики в 2024 г. поддержан и включен в перечень приоритетных инвестиционный проект Уфимского турбинного завода (производственный холдинг «ЦентрИнжиниринг»). В статье рассказывается об основных направлениях работы предприятия, достигнутых результатах и ближайших планах по развитию.

94 ООО «Энерголайн» создает в Туле ремонтно-сервисный комплекс для ГТУ иностранного производства

К.И. Леликов – ООО «Энерголайн»

Новые разработки

96 Газодизельный двигатель-генератор 16ГДГ прошел приемочные испытания

Д.А. Капралов – журнал «Турбины и Дизели»

98 Газотурбинные насосные установки – оптимальный вариант при ликвидации пожаров на объектах ТЭК

Н.С. Афонин – ПАО «КАДВИ»

К.Е. Миролубов – ООО «СПРИНТ»

Аннотация

Применение мобильных газотурбинных насосных установок позволяет качественно увеличить скорость разворачивания пожарных расчетов с пожарными системами большой мощности практически в любых точках страны.

Дискуссия

102 Микротурбинные установки: их назначение и применение в России

А.Я. Гольдинер, С.В. Соколов – ООО «Электросистемы»

Аннотация

Потребность в микротурбинах особенно высока в тех отраслях промышленности, где существует необходимость работы оборудования на «тяжелых» газах, имеющих большое количество примесей, вредных для ДВС, особенно при высоком содержании сероводорода.

С точки зрения влияния на окружающую среду, микротурбины необходимы там, где при небольшой мощности потребления требуется соблюдение экологических норм, низкий уровень вибрации и шума. Микротурбины прошли свой путь развития и соответствующие изменения. Предлагаем разобраться, что из себя представляет микротурбина сегодня и для чего она нужна.

Эксплуатация, сервис

104 Долгосрочное обслуживание ГТУ Казанской ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 выполняет компания «Турбосервис»

И.А. Волобуев – ООО «ТурбоСервис Рус»

Аннотация

Своевременный и качественный ремонт, а также обслуживание основного энергетического оборудования является залогом надежной работы ТЭЦ и обеспечения потребителей электрической и тепловой энергией.

Газопоршневые установки

106 АО «Интертехэлектро» создает в Кургане центр капитального ремонта газопоршневых двигателей Jichai

Д.Э. Ким, Д.А. Прохоров, Го Цзиньфа - АО «Интертехэлектро»

Аннотация

Профессиональное своевременное техническое обслуживание является важным условием безаварийной работы любого наукоемкого и высокотехнологичного оборудования. Производственно-инжиниринговая компания «Интертехэлектро» готова выполнять ремонт газопоршневых и дизельных установок, а также сопровождать в эксплуатации поставленное оборудование на всех этапах жизненного цикла.

Формула российской турбины

108

Плакаты

112