

май
июнь
2023

Турбины и Дизели

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№3 (108)

ЦРМЗ -
основа энергобезопасности
столичного региона



16+



Система управления «Сириус» -
новая разработка российской компании
«ИНГК-Промтех»

Газопоршневые установки Jichai
для российского рынка

Энергокомплексы от 1,0 до 10,0 МВт из российских комплектующих



ЭГТЭС КОРВЕТ-1,0

Выработка электроэнергии, горячей воды
и технологического пара



РЕКЛАМА

- ▶ Полный цикл изготовления и ремонта газотурбинного двигателя на территории РФ
- ▶ Минимально возможные эксплуатационные затраты
- ▶ Надёжный запуск в любых условиях без предварительного прогрева.
- ▶ Низкий расход масла - не более 0,09 кг/ч
- ▶ Оптимальные массогабаритные характеристики
- ▶ Высокая экологичность - уровень вредных выбросов менее 50 мг/м³



ООО «МПП «Энерготехника»
410040, г. Саратов,
Деловой проезд, д. 7

Тел. (8452) 55-56-33
Факс (8452) 63-15-15
Газсвязь
Тел./факс (750) 3-10-19, 3-10-59

e-mail: eng@en-tech.ru
www.en-tech.ru

Главный редактор

Култышев Алексей Юрьевич, к.т.н.,
заместитель генерального директора –
технический директор
ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»

Редакционная коллегия:

Блинов Виталий Леонидович, к.т.н.,
доцент, ведущий инженер, кафедра
«Турбины и двигатели»,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
им. Б. Н. Ельцина (УрФУ)

Буров Валерий Дмитриевич, к.т.н.,
профессор, кафедра ТЭС, заместитель заведующего кафедрой
ТЭС, чл.-корр. Академии промышленной экологии,
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт» (МЭИ)

Бычков Олег Витальевич,
генеральный директор ООО «ИНГК»

Гарибов Генрих Саркисович, д.т.н.,
профессор, академик Российской инженерной академии,
консультант, АО «Металлургический завод «Электросталь»

Комаров Олег Вячеславович, к.т.н.,
заведующий кафедрой «Турбины и двигатели»,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
им. Б. Н. Ельцина (УрФУ)

Лебедев Александр Серафимович, д.т.н.,
генеральный директор
ООО «Современные Технологии Газовых Турбин»

Михайлов Владимир Евгеньевич, д.т.н.,
профессор, генеральный директор ОАО «НПО ЦКТИ»

Плотников Леонид Валерьевич, д.т.н.,
профессор, доцент, кафедра «Турбины и двигатели»
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
им. Б. Н. Ельцина» (УрФУ)

Сигидов Ярослав Юрьевич, к.т.н.,
заместитель генерального директора АО «Интертехэлектро»

Сулимов Даниил Дмитриевич,
заместитель генерального конструктора, главный
конструктор приводных ГТУ и объектов их применения
АО «ОДК-Авиадвигатель»

Шайхутдинов Александр Зайнетдинович,
генеральный директор
ООО «Высокотехнологические разработки»

Шаповало Анатолий Антонович, к.т.н.,
начальник Управления энергетики Департамента
ПАО «Газпром»

Шибяев Тарас Леонидович, к.т.н.,
главный конструктор – технический директор
АО «Уральский турбинный завод» (УТЗ)

Электронные версии журнала (2006–2023 гг.) размещены на сайте
«Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) и включены
в Российский индекс научного цитирования.

Editor in Chief

Kultyshev Aleksey Yurievich, PhD in Engineering
Deputy General Director - Technical Director
Gazprom energoholding industrial assets LLC

Editorial board:

Blinov Vitaly Leonidovich, PhD in Engineering,
Associate Professor,
Leading Engineer of the Turbines and engines department
Ural Federal University named after B. N. Yeltsin (UrFU)

Burov Valery Dmitrievich, PhD in Engineering, Professor,
Department of Thermal Power Plants. Deputy Head of the TPP
Department, corresponding member of Academy
of Industrial Ecology – National Research University,
Moscow Power Engineering Institute" (MPEI)

Bychkov Oleg Vitalievich,
General Director of INGC LLC

Garibov Genrikh Sarkisovich,
Doctor of Engineering Science, Professor, Academician
of the Russian Engineering Academy – consultant,
Metallurgical Plant Electrostal JSC

Komarov Oleg Vyacheslavovich, PhD in Engineering,
Head of Department of Turbines & Engines –
Ural Federal University named after B. N. Yeltsin (UrFU)

Lebedev Alexander Serafimovich,
Doctor of Engineering Science,
General Director Modern Technologies of Gas Turbines LLC

Mikhailov Vladimir Evgenievich, Doctor of Engineering Science, Professor,
General Director
Central Boiler and Turbine Institute (CKTI) JSC

Plotnikov Leonid Valerievich, Doctor of Engineering Science, Professor,
Associate Professor of the Turbines and Engines Department
Ural Federal University named after B.N. Yeltsin (UrFU)

Sigidov Yaroslav Yuryevich, PhD in Engineering,
Deputy General Director, Intertechelectro JSC

Sulimov Daniil Dmitrievich,
Deputy General Designer,
Chief Designer of drive GTP and objects of their application
UEC-Aviadvigatel, JSC

Shaikhutdinov Alexander Zainetdinovich,
General Director
High-tech developments LLC

Shapovalov Anatoly Antonovich, PhD in Engineering,
Head of the Department of Energy,
Gazprom PJSC

Shibaev Taras Leonidovich, PhD in Engineering,
Chief Designer – Technical Director,
Ural Turbine Plant JSC

Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов публикации.
Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов.
Дата выхода номера в свет 30.06.2023 г.

Содержание

май-июнь 2023, № 3 (108)



- 4** От редактора
Журнал «Турбины и Дизели»: вчера, сегодня, завтра
А.Ю. Култышев, к.т.н. – журнал «Турбины и Дизели»
- 6** Представление компании
Центральный ремонтно-механический завод – основа энергобезопасности столичного региона
В.В. Гикал – ООО «Центральный ремонтно-механический завод»
- 10** Энергоэффективность
Повышение технико-экономических показателей ПТУ: совершенствование монтажа, пусконаладки и эксплуатации
А.Ю. Култышев, к.т.н. – ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»
- 16** Энергоэффективность
Анализ эффективности и оптимизация работы газовой турбины MGT-30 при различных условиях с применением систем предварительного охлаждения воздуха на входе
Х. Айкут, М. Басати Панах (к.т.н.), А.С. Алешина (к.т.н.), Ю.В. Матвеев (к.т.н.) – Институт энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ
- 24** Энергоэффективность
Онлайн-мониторинг турбинных масел: как это работает
Л.Е. Капралова – журнал «Турбины и Дизели»
- 26** Научные исследования
Прочностное исследование рабочей лопатки с диском ступени «В» осевого компрессора ГТН-16 методом конечных элементов в CAE-системе Fidesys
В.Л. Блинов (к.т.н.), О.В. Комаров (к.т.н.), Д.О. Заклепкин, С.В. Богданец – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
- 32** Научные исследования
Верификация программной методики расчета на прочность дисков осевых компрессоров
А.В. Махонин (к.т.н.), Е.Ю. Романчук – Высшая школа энергетического машиностроения, Институт энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ
- 38** Научные исследования
Цифровой подход к обнаружению дефектов лопаточного аппарата и оценке их влияния на характеристики турбомашин
В.Л. Блинов (к.т.н.), О.В. Беляев, В.И. Брезгин (д.т.н.), О.В. Комаров (к.т.н.) – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
- 44** Эксплуатация, сервис
Импортозамещение энергетического оборудования в рамках пожизненного сервиса
Т.Н. Хайрулин, А.Б. Рогов – АО «ОДК-Авиадвигатель»



Издатель ООО «Турбомашинь»

Главный редактор
Култышев А. Ю.

Литературный редактор
Зинченко Г. М.

Дизайн и верстка
Понакушина А. Е.

Учредитель ООО «Турбомашинь»

Генеральный директор
Капралов Д. А.

Коммерческий директор
Троицкий А. А.

Директор по маркетингу
Капралова Л. Е.

Менеджер по работе с клиентами
Торицина Т. А.

Генеральный партнер
ООО «Газпром энергохолдинг
индустриальные активы»

Адрес редакции и издателя
Россия, 152925, г. Рыбинск Ярославской обл.,
ул. Бабушкина, д. 21, оф. 47.
Тел./факс (4855) 285-997.
E-mail: info@turbine-diesel.ru

Адрес в сети Интернет
www.turbine-diesel.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
тираж 3 000 экземпляров

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-84053 от 28 октября 2022 г.

ISSN 2949-2971

Подписные индексы в объединенном каталоге
«Пресса России»:
– журнал «Турбины и Дизели» – **87906**
– каталог оборудования
«Турбины и Дизели» – **87907**

Журнал отпечатан – ИП Голубин А. М.
Адрес типографии:
г. Рыбинск Ярославской обл., ул. Блюхера, д. 7



Полное или частичное воспроизведение или
размножение каким бы то ни было способом
материалов, опубликованных в настоящем
издании, допускается только с письменного
разрешения издательства ООО «Турбомашинь»

48 Эксплуатация, сервис
Новые инженеринговые компетенции
Центрального ремонтно-механического завода
В. В. Гикал, В. Б. Смышляев, С. В. Шихунов – ООО «ЦРМЗ»
И. Ю. Кляйнрок, к. т. н. – ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»

52 Эксплуатация, сервис
Конференция по проблемам сохранения ресурса
и повышению надежности работы ГТУ
Д. А. Капралов – журнал «Турбины и Дизели»

56 Газопоршневые установки
Газопоршневые установки Jichai для российского рынка
Я. Ю. Сигидов, к. т. н. – АО «Интертехэлектро»

60 Газопоршневые установки
Модернизация газопоршневых установок производства АТР
А. И. Архипова – ООО «Мотортех»

62 Компрессоры
Стационарные осевые компрессоры
производства Невского завода (АО «НЗЛ»)
В. К. Юн (д. т. н.), Е. И. Давлетгареева, А. А. Лысякова (к. т. н.) – АО «НЗЛ»

70 Компрессоры
Развитие подходов и опыт оптимального проектирования центробежных
компрессоров газоперекачивающих и турбодетандерных агрегатов
Ю. Б. Галеркин (д. т. н.), А. А. Дроздов (д. т. н.), А. Ф. Рекстин (д. т. н.), В. Б. Семеновский,
О. А. Соловьёва (к. т. н.), Л. Н. Маренина (к. т. н.), А. В. Махонин (к. т. н.) –
Высшая школа энергетического машиностроения, Институт энергетики, ФГАОУ ВО СПБПУ

78 Системы управления
Система управления «Сириус» – новая разработка
русской компании «ИНГК-Промтех»
А. В. Лебедев, И. В. Травкина, В. Е. Щавлев (к. т. н.) – ООО «ИНГК-Промтех»

82 Системы управления
Развитие подходов и опыт оптимального проектирования центробежных
компрессоров газоперекачивающих и турбодетандерных агрегатов
П. Н. Коок – АО «НЗЛ»

88 Технологии
Перспективные диффузионные алюминиевые покрытия
для турбин III-IV поколения
А. Н. Аксенов (к. ф. - м. н.), К. П. Бурдина – ПАО «Тюменские моторостроители»

92 Выставки, конференции
Устойчивое развитие энергетики на основе достижений
и современных разработок российского энергомашиностроения
Д. А. Капралов – журнал «Турбины и Дизели»



Журнал «Турбины и Дизели»: вчера, сегодня, завтра

А. Ю. Култышев, к. т. н. – журнал «Турбины и Дизели»

Сегодня достижение технологического суверенитета России является ключевым направлением развития страны, а популяризация научных и технических достижений привлечет к ним больше внимания и ресурсов, что позволит российским ученым и инженерам, создателям современных технологий, образцов техники и целых направлений экономики выходить на всё новые уровни.

In brief

Turbines and Diesels magazine: yesterday, today, tomorrow.

Turbines and Diesels information and technical magazine has been published since 2005. During this time 108 issues of the magazine, 18 catalogues of power equipment - the world's most comprehensive technical reference book on equipment for energy production have been published. Initially, one of the main topics of the magazine was distributed power generation and everything related to it. These are generation equipment – engines of various types, gas and steam turbines, electric generators, power plants, fuel gas booster compressors, air treatment systems, drive and station control systems, oil supply and cooling systems and many others. The topic of the use of engines of various types as a mechanical drive as part of compressor and pumping stations, blowers was constantly covered. The issues of power generation are inextricably linked with the efficient operation of all main and auxiliary generating equipment, therefore, new approaches to the maintenance of complex equipment, the use of modern fuels and oils have always been presented on the pages of the magazine.

Вчера: немного истории

Информационно-технический журнал «Турбины и Дизели» издается с 2005 г. За это время выпущено 108 номеров журнала, 18 каталогов энергетического оборудования – самого полного в мире технического справочника по оборудованию для производства энергии.

Изначально одной из главных тем журнала было распределенное производство энергии и всё, что с этим связано. Это оборудование для генерации – двигатели различного типа, газовые и паровые турбины, электрогенераторы; системы обеспечения энергоагрегатов – дожимные компрессоры топливного газа, КВОУ, системы управления приводов и станционные, верхнего уровня; системы маслообеспечения и охлаждения и многие другие.

Постоянно освещалась тематика применения двигателей различного типа в качестве механического привода – в составе компрессорных и насосных станций, воздухоувок и т. д.

Производство энергии неразрывно связано с эффективной работой всего основного и вспомогательного генерирующего оборудования, поэтому новые подходы к техническому обслуживанию сложного оборудования, применение современных видов топлива и масел всегда присутствовали на страницах журнала.

В стране, располагающейся сразу в нескольких климатических зонах, в диапазоне температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, важно иметь разное исполнение оборудования, поэтому в журнале постоянно освещались вопросы, связанные с вариантами модульного исполнения и агрегатирования энергоблоков для различных задач – от контейнерного и ангарного до открытых индивидуальных компоновочных решений.

Постоянное участие издания в профильных выставках и конференциях всегда позволяло оперативно рассказывать о современных отечественных и зарубежных разработках в области турбино-, компрессоро- и двигателестроения, систем автоматизации, сервиса, применения новых видов топлива и др.

Вместе с тем, стремительно меняющийся научно-технический мир требовал перестройки формата журнала и его содержания, направленного на освещение развития научно-технического потенциала нашей страны, представление новых разработок и продуктов, научных исследований в энергетическом машиностроении, что, в свою очередь, является важнейшей стратегической задачей России.

Сегодня, в новой реальности

Сегодня Россия, да и весь мир, живет и работает в новой реальности. Наша страна, а с ней и отечественная промышленность, столкнулась с беспрецедентными санкциями со стороны так называемых «западных партнеров».

В новых условиях стали четко видны проблемы и задачи, связанные с развитием отечественной высокотехнологичной конкурентной продукции, ее сопровождением на всех этапах жизненного цикла – от создания до эксплуатации и обслуживания.

Решение задач по созданию новых продуктов и развитию науки в условиях внешнеполитического давления сопровождается возможностями на освободившихся рынках сбыта, позитивным настроением российского общества к преодолению вызовов и рядом эффективных мер поддержки развития отраслей промышленности, реализуемых Правительством по поручению Президента РФ.

В настоящий момент редакция и редакционный совет журнала приняли решение о перекаленификации издания в теоретический и научно-практический формат. С учетом этого перед журналом стоят такие ключевые задачи:

- публикация открытых результатов научно-исследовательской, научно-практической, экспериментальной и инновационной деятельности отечественных и зарубежных ученых, научных сотрудников и инженеров;
- выявление научного потенциала для внедрения передовых достижений науки и техники;
- создание открытой профессиональной площадки для коммуникации между научными,

учебно-образовательными, производственными организациями и сообществами в области энергомашиностроения, транспортного и авиационного двигателестроения, энергетики, нефтегаза. Это позволит сформировать научную и инженерную полемику, способствующую повышению качества результатов исследований и разработок;

- пропаганда опыта по внедрению достижений науки и передовых научных технологий;
- апробация и реализация результатов исследований аспирантов и соискателей по профильным научным специальностям;
- совершенствование инструментов и процессов проведения экспертизы и представление новых идей, научных трудов, тезисов диссертационных работ; публикация материалов научно-технических конференций, семинаров и симпозиумов;
- повышение престижа научной, научно-технической, инновационной и инженерной деятельности и заинтересованности общества в их развитии;

- разностороннее развитие различных форм и способов информирования общества о достижениях науки и техники;

- привлечение молодого поколения к активному участию в научно-исследовательской, проектной и производственной деятельности. Для решения поставленных задач журнал уже сейчас расширил круг тематики материалов, авторов и партнеров.

Так, увеличился объем материала по проектам, оборудованию и решениям, которые были реализованы в Российской Федерации в рамках Программы ДПМ, позволившей внести значительный вклад в обновление фондов электрогенерации. За период реализации Программы ДПМ с 2010 по 2016 г. реализовано более 130 проектов общей мощностью 30 ГВт, большая часть которых основывалась на современных образцах оборудования.

С 2022 по 2035 гг. в России будет реализовываться следующий этап программы (ДПМ-штрих), с суммарным ограничением на объем модернизируемой мощности 39 ГВт. До 2025 г. будет реализована инвестиционная программа по развитию электроэнергетики Дальневосточного федерального округа, параллельно реализуются проекты по строительству мусоросжигательных заводов. Таким образом, вектор расширения тематики направлен на большую энергетику – с описанием новых, современных образцов паротурбинного, газотурбинного, генераторного, теплообменного оборудования.

Принципиальные положения, рассматриваемые сегодня редакционным советом журнала при формировании его структуры и информа-



Главный редактор

ционной направленности, заключаются в приоритетном представлении материалов, освещающих современные принципы и подходы к созданию новых продуктов энергетического машиностроения. Их применение позволяет повысить эффективность выполнения конструкторско-технологической подготовки производства, монтажа, пусконаладочных работ, обслуживания. Улучшаются технико-экономические показатели при эксплуатации, при этом снижается стоимость всего жизненного цикла такого оборудования, повышается технологичность конструкций и т. д.

В настоящий момент готовится заявка на включение журнала «Турбины и Дизели» в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по профильным научным специальностям.

Завтра – в будущее

Новые задачи, которые ставит перед изданием редакционный совет, – максимально широкое освещение докладов и статей на их базе с научно-технических конференций, представление в журнале новых технических направлений энергетики, транспортного и авиационного двигателестроения и т. д.

Включение журнала в Перечень ВАК по выбранным профильным специальностям прогнозируется уже к концу этого года.

Публикации в журнале «Турбины и Дизели» будут входить в системы расчетов индексов цитирования авторов и журналов – значит, мы встроимся в систему.

Уважаемые партнеры, коллеги, друзья! Приглашаем вас к тесному сотрудничеству с журналом в новом формате в качестве авторов статей, рецензентов и подписчиков. **Д**

Алексей Юрьевич Култышев родился в 1982 году.

В 2004 г. окончил УГТУ-УПИ (ныне УрФУ) по специальностям «Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели» и «Экономика и управление предприятием».

С 2002 по 2006 гг. работал инженером-проектировщиком в институте «Уралгипроруда».

С 2006 по 2017 гг. трудился на Уральском турбинном заводе, где прошел путь от инженера-конструктора до главного конструктора.

С 2007 по 2017 – доцент УрФУ и КПК «ТЭК».

С 2016 по 2017 гг. – главный конструктор АО «РОТЕК».

С 2017 по 2020 гг. работал в ПАО «Силловые машины» – заместителем генерального директора-директора по сбыту, генеральным конструктором.

С 2020 года – заместитель генерального директора - технический директор ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы».

А. Ю. Култышев ведет активную научную работу, автор более 120 научных публикаций и патентов, преподает в Высшей школе энергетического машиностроения Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Центральный ремонтно-механический завод – основа энергобезопасности столичного региона

В. В. Гикал – ООО «Центральный ремонтно-механический завод»

Центральный ремонтно-механический завод (ЦРМЗ), который отмечает в этом году свое 75-летие, – крупнейшее в Московском регионе специализированное предприятие по диагностике, ремонту и послеремонтному обслуживанию оборудования электростанций.

In brief

The basis of energy security of the capital region.

The Central mechanical repair plant is the largest specialized enterprise in the Moscow region for diagnostics, repair and post-repair maintenance of power plant equipment. The plant was established on July 8, 1948 by Order No.

216a of the Ministry of power stations in connection with the increased volumes of standard repair work of power supply system and the shortage of wear-out spare parts for the equipment of power plants.

Already in the year of its foundation the company accepted six Moscow power stations for maintenance, the company's employees repair 24 boilers and 11 turbines.

Завод был основан 8 июля 1948 года приказом № 216а Министерства электростанций СССР в связи с возросшими объемами типовых ремонтных работ энергосистемы и дефицитом быстро изнашиваемых запасных частей для оборудования электростанций. Первыми принятыми в штат нового предприятия специалистами стали бывшие сотрудники треста «Мосэлектросетьстрой», на базе которого и был сформирован Центральный ремонтно-механический завод.

Уже в год основания ЦРМЗ принимает на обслуживание шесть московских электростанций, сотрудники предприятия выполняют ремонт 24 котлов и 11 турбин. В межремонтный период завод осуществляет восстановительный ремонт арматуры среднего и высокого давления, занимается изготовлением поверхностей нагрева и котельно-вспомогательного оборудования.

В 1949 году Приказом Мосэнерго № 320 организовывается Центральная лаборатория металлов для обеспечения надежной работы металла основного оборудования ТЭЦ и ГРЭС энергосистемы центрального региона нашей страны. Через год на площадке завода вводится в строй литейный цех со столярной мастер-

ской, организуется отдел главного механика с ремонтно-механическим цехом.

К середине 1950-х годов на заводе действуют уже два механических цеха, электрический, трансформаторный, литейный и строительный цеха, отдел главного механика и лаборатория металла, а также отдел внешних работ – для ремонта оборудования на электростанциях.

Завод проводит большую работу по механизации ремонтных работ, выполняет ремонты арматуры и вращающихся механизмов, ведет реконструкцию трубопроводов, замену барабанов котлов и сепарационных устройств в них, изготавливает и монтирует кислородно-ацетиленовые сети, монорельсы, шахтные подъемники и краны-укосины.

В 1959 году в Мосэнерго вводятся в эксплуатацию теплофикационные турбины ВПТ-50 мощностью 50 МВт, и перед коллективом ставится задача – в кратчайшие сроки освоить ремонт новых агрегатов.

Предприятие в кратчайшие сроки справились с этой задачей, и уже в декабре 1960 года, к моменту ввода в эксплуатацию ТЭЦ-22 с турбиной ВПТ-50, заводская ремонтная бригада осуществляла все виды обслуживания агрегата.

В 1962 году в павильоне «Электрификация» на ВДНХ открывается постоянно действующая экспозиция, где отражались достижения энергостроителей и эксплуатационников. Там же был представлен гибочный станок с индукционным нагревом собственной разработки, за который завод удостоен золотой медали ВДНХ.

В 1964 году на тематической выставке «Передовые методы ремонта» заводу вручается диплом I степени «За успехи в организации промышленного ремонта арматуры и изготовления специальной регулирующей и защитной арматуры». В 1968 году специалисты предприятия разработали и внедрили оптический метод центровки проточной части турбин в составе крупных энергоблоков.



В механическом цехе предприятия (историческое фото)

1973 год – 25-летний юбилей завода. Предприятие продолжает развиваться, достигая численности более 3 000 человек, в том числе ремонтного персонала – 1 600 человек.

Завод выполняет треть всех ремонтных работ в энергосистеме Московского региона. Результаты работы за юбилейный год: капитально отремонтировано 38 котлов, 23 турбины, 37 генераторов, 1 493 силовых трансформатора, 550 высоковольтных и 370 низковольтных электродвигателей, 72 насоса и 1 555 единиц арматуры. Произведено 3 204 тонны литья, в том числе 2 153 – стального, 906 – чугунного, 145 – цветного и 1 800 тонн наплавочных электродов Т-590 и Т-620.

К 1990 году на 20 действующих электростанциях системы работают 124 турбоустановки суммарной мощностью 13 900 МВт, которые произвели 84 млрд кВт·ч электроэнергии. Всё это оборудование обслуживается силами специалистов ЦРМЗ.

В двухтысячные годы ЦРМЗ начинает активно осваивать ремонты и обслуживание зарубежного оборудования, которое стало широко применяться на объектах Мосэнерго. Был освоен ремонт торцевых уплотнений фирмы John Crain, используемых в питательных насосах энергоблоков Т-250/300-240, а также техническое обслуживание и ремонт всего установленного насосного оборудования, модернизированного по проекту концерна Sulzer.

В 2020 году ООО «Центральный ремонтно-механический завод» вошло в состав промышленной группы «Газпром энергохолдинг индустриальные активы», что дало новый импульс развитию предприятия и скорректировало вектор стратегии его развития.

Сегодня на ЦРМЗ реализуется масштабная программа модернизации основных производственных мощностей. Наряду с развитием ремонтных и сервисных компетенций, перед предприятием стоят важные задачи по расширению производства котельного оборудования, в т. ч. собственной разработки, метизной продукции специального назначения и запасных частей для ряда насосов зарубежных производителей.

Освоение широкой номенклатуры метизной продукции проводится в рамках программы импортозамещения и внутригрупповой кооперации. Договоры на ее поставку уже заключены практически со всеми предприятиями «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»: с заводом «Тюменские моторостроители», «Невским заводом», «Уралтурбо», заводами «Газэнергосервис». Для повышения надежности выпускаемой продукции и расширения



номенклатуры запасных частей ГТД в настоящее время на предприятии осуществляется восстановление ковочного и штамповочного производства.

🕒 **Центральный ремонтно-механический завод, главный корпус**

К результатам деятельности по новому направлению уже можно отнести разработку конструкторской и технологической документации для изготовления метизов к газотурбинным установкам Siemens, отладку цикла производства и первые поставки метизной продукции в адрес заказчиков, а также реверс-инжиниринг и изготовление ряда деталей для дожимных газовых компрессоров Atlas Copco.

Кроме внутригрупповой кооперации, завод активно развивает и внешнюю кооперацию в машиностроении. Подписан контракт на производство деталей с ПАО «Силовые машины», ведется создание участка и освоение производства изделий для данного производителя турбинного оборудования в соответствии с его требованиями к качеству. Прорабатывается развитие данного направления деятельности с другими заводами – производителями турбин.

🕒 **Балансировка ротора**





↻ В цехе ремонта роторов паровых турбин

Немаловажной задачей остается развитие производства малогабаритных цилиндрических водогрейных котлов с применением турбокомпрессора (МЦПТК) собственной разработки. Эти котлоагрегаты не имеют аналогов по коэффициенту полезного действия, достигающему 96 %. На основании технических отчетов была выстроена производственная линейка котлоагрегатов МЦПТК мощностью от 1 до 40 МВт. Котлоагрегат с минимальной тепловой мощностью 1 МВт может отапливать площадь в 8 000 м², самый мощный представитель в номенклатуре используется для снабжения и отопления производственных объектов площадью в 30...32 тыс. м². Рабочий диапазон от номинальной мощности составляет 25...110 %, с температурным графиком 60...150 °С в зависимости от тепловой мощности, что закрывает потребности как в жилищном, так и производственном фонде.

↻ Участок изготовления трубной обвязки



На основе котлов МЦПТК в настоящее время проектируются котельные модульного типа, которые имеют очень хорошие рыночные перспективы. Комплексное решение позволит найти потенциальных заказчиков не только в промышленной сфере, но и в жилищном строительстве. На данный момент это одна из приоритетных задач конструкторского отдела ООО «ЦРМЗ».

В рамках задач по импортозамещению на заводе возрождается участок по производству запасных частей и ремонту насосного оборудования и гидромуфт различных зарубежных производителей, которые используются на энергетических объектах РФ. На данный момент идет процесс наполнения базы конструкторской и технологической документации на различные детали насосов. Согласно годовой потребности Мосэнерго, ОГК-2 и ТГК-1 была сформирована номенклатура изделий для первоочередного освоения.

В направлении ремонтного обслуживания насосов планируется постепенно увеличить количество одновременно обслуживаемых узлов – на данный момент их число уже достигает 20.

Развитие сервисных и инжиниринговых услуг также остается важнейшим бизнес-направлением для ЦРМЗ. Инженерно-технический центр предприятия успешно выполняет функции головной наладочной организации в рамках ввода в эксплуатацию нового или модернизированного газотурбинного оборудования на ряде энергетических объектов. На текущий момент география оказываемых специалистами центра услуг в части проектных, пусконаладочных работ, режимно-наладочных, химико-технологических испытаний достаточно обширна: от станций Дальнего Востока до западных территорий страны и далее – на энергообъекте Сербии.

ООО «ЦРМЗ» сегодня – это современное, активно развивающееся предприятие, располагающее большим станочным парком, проектно-конструкторской, ремонтной и научно-исследовательской базами, а также специальными лабораториями, оснащенными современным высокоточным оборудованием. Завод осваивает новую продукцию, решает важные проблемы импортозамещения, развивает сервисные и инжиниринговые компетенции.

В перспективных планах ЦРМЗ – сохранение позиции ключевой ремонтной базы, обеспечивающей высокий уровень технического эксплуатационного состояния энергетических активов группы «Газпром энергохолдинг», и развитие и наращивание производства в рамках общей стратегии машиностроительной группы «Газпром энергохолдинг индустриальные активы». **Д**



ООО «ИТЦ» запускает в производство новую продукцию для нужд энергетической отрасли.

В ООО «ИТЦ», входящем в группу «Газпром энергохолдинг индустриальные активы», начался выпуск базальтовых прошивных энергетических матов под торговой маркой «Вермитэк». Их производство освоено в рамках программы по расширению ассортимента производимых товаров и увеличению комплексных поставок на предприятия энергетического комплекса.

Энергетические маты изготавливаются по специальной технологии из базальтового волокна с применением вермикулитосодержащих материалов, без использования синтетического связующего, затем прошиваются в продольном направлении, как стеганое одеяло. Такая технология обеспечивает эффективную теплоизоляцию промышленного оборудования с температурой поверхности 180...700 °С.

Продукция может применяться для теплоизоляции и огнестойкой защиты подземных, наземных и эстакадных трубопроводов и воздухопроводов, перекрытий, котлов различного назначения, турбин, парогенераторов, теплообменников, строительных конструкций, зданий и сооружений с высокими противопожарными требованиями, а также для тепло- и звукоизоляции всех видов ограждающих конструкций в строительстве.

ITC LLC launches new products for the needs of the energy industry.

The company has started the production of basalt stitched energy mats under the trademark of Vermitek. Their production has been mastered within the framework of the program to expand the range of manufactured goods and increase complex supplies to the enterprises of the energy complex. Energy mats are made using a special technology from basalt fiber.

Для горнодобывающего предприятия введена мини-ТЭС мощностью 1,8 МВт.

Модульная электростанция обеспечивает электроэнергией и теплом горнодобывающее предприятие в Челябинской области. Электрическая мощность станции составила 1,8 МВт, тепловая – 1 МВт. В качестве генерирующего оборудования применяется установка TCG 3020V16 производства MWM, система управления – ТРЕМ.

Строительство ГПУ-ТЭС выполнено под ключ. Специалисты компании «МКС» выполнили проектные работы, изготовили оборудование, провели пусконаладочные работы. Проект реализован в рамках энергосервисного контракта. Мини-ТЭС обеспечит бесперебойную работу горнодобывающего предприятия и стабильное качество выпускаемой продукции.

Специалисты ООО «ИНГК» приняли участие в международной конференции и выставке в С.-Петербурге.

Ежегодная международная научно-техническая конференция «Компрессорные технологии – 2023» проходила 24–26 мая. Она проводится для обмена опытом, обсуждения проблемных вопросов и выстраивания деловых отношений между потребителями и производителями компрессорной техники. Основные направления работы конференции:

- замещение импортного оборудования в отрасли компрессоростроения;
- организация изготовления и поставок комплектующих для компрессорной техники иностранного производства;
- фактические эксплуатационные характеристики, обслуживание, модернизация, диагностика и ремонт компрессоров и компрессорного оборудования;
- агрегатирование и разработка технических заданий на компрессоры и компрессорное оборудование;
- проведение приемки компрессоров и компрессорного оборудования заказчиком и т.д.

Во время работы участникам было представлено более 40 докладов специалистов отрасли и научного сообщества по текущим вопросам эксплуатации компрессорного оборудования и перспективам дальнейшего развития компрессорных технологий. Обсуждались и другие актуальные темы, в том числе современные достижения в области проектирования и производства компрессорной техники. Специалисты компании «ИНГК» обменялись мнениями с участниками конференции по всем актуальным вопросам разработки и изготовления современных компрессорных установок на базе компрессоров и приводов всех типов.



Повышение технико-экономических показателей ПТУ:

совершенствование монтажа, пусконаладки и эксплуатации

А. Ю. Култышев, к. т. н. – заместитель генерального директора – технический директор, ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы», al.kultyshev@gehia.ru

Ключевые слова:

паровая турбина, паротурбинная установка, парогазовая установка, теплофикация, жизненный цикл, совершенствование пусконаладки и эксплуатации, модульная конструкция, алгоритмы работы, повышение эффективности

Аннотация

В статье показана важность анализа возможностей и повышения получаемого технико-экономического эффекта от внедрения и совершенствования конструкции и схем ПТУ на этапах жизненного цикла оборудования после конструкторско-технологической подготовки производства.

Автором разобраны вопросы совершенствования жизненного цикла основного и вспомогательного оборудования паротурбинных установок на его разных этапах путем внедрения технических решений режимной оптимизации. Приведен пример решения задачи по повышению экономичности системы снижения температуры выхлопных газов котла-утилизатора при повышении мощности и экономичности теплофикационной установки за счет снижения затрачиваемой мощности

на прокачку циркуляционной воды через охладитель конденсата.

Вопросы совершенствования конструкции основного и вспомогательного оборудования, повышения технико-экономических показателей на всех стадиях жизненного цикла важны. Значительный потенциал совершенствования и получение большого абсолютного экономического эффекта имеется в том числе на стадиях монтажа, пусконаладки и эксплуатации.

Необходимо расчетное и экспериментальное определение максимальных технико-экономических показателей ПТУ при возможной совместной и автономной работе на переменных режимах, с разработкой алгоритмов работы и автоматическим или полуавтоматическим поддержанием показателей на оптимальном уровне.

Improvement of technical and economic indicators of steam turbine plants:

improvement of installation, commissioning and operation

A. Yu. Kultyshev, Cand. of Tech. Science – Deputy Director General – Technical Director, Gazprom energy holding industrial assets LLC, al.kultyshev@gehia.ru

Key words:

steam turbine, steam turbine plant, combined cycle power plant, industrial heating, life cycle, updating commissioning and operation, modular design, algorithms for operation, improvement of efficiency

Abstract

The article shows the importance of analyzing the possibilities and increasing the recoverable technical and economic effect from the introduction and improvement of the design and schemes of steam turbine plants at the stages of the equipment life cycle after the design and technological preparation of production.

The author examines the issues of improving the life cycle of the main and auxiliary equipment of the Steam turbine plants at its different stages through the introduction of technical solutions for regime optimization. An example of solving the problem of increasing the efficiency of the exhaust gas temperature reduction system of a HRSG while increasing the power and efficiency of a heating plant by reducing the power consumed for

circulating water pumping through a condensate cooler is described.

The issues of improving the design of the main and auxiliary equipment, improving technical and economic indicators at all stages of the life cycle are important, including at the stages of installation, commissioning and operation, there is a significant potential for improvement and obtaining a large absolute economic effect.

Calculation and experimental determination of the maximum technical and economic indicators of steam turbine equipment with possible joint and autonomous operation in variable modes with the development of algorithms for operation with automatic or semi-automatic maintenance of indicators at the established optimal level are necessary.

Весь комплекс вопросов по сборке оборудования, монтажу и пусконаладке на объекте, безусловно, упрощается при развитии сопровождения ЖЦ, внедрении модульной конструкции и оптимизации конструкции и функциональности стандартных библиотечных модулей. А самое главное – концепция позволяет разрабатывать, использовать и совершенствовать типовые инструкции по монтажу, пусконаладке и эксплуатации оборудования.

Автором выявлено, что существует важное направление качественного развития эксплуатации турбинного оборудования, которое недостаточно глубоко изучено и не нашло широкого применения в ПТУ (в основном все работы направлены на мониторинг, прогностику и диагностику с целью повышения надежности эксплуатации). Поэтому именно в этой области содержится значительный потенциал совершенствования и получение большого абсолютного экономического эффекта – расчетное и экспериментальное определение максимальных технико-экономических показателей основного и вспомогательного оборудования при возможной совместной и автономной работе на переменных режимах с разработкой алгоритмов работы с автоматическим или полуавтоматическим поддержанием показателей на установленном оптимальном уровне. Ниже приведено несколько таких примеров, реализованных автором в документации и в работе оборудования.

Необходимо отметить, что задачи автоматической режимной оптимизации работы оборудования могут решаться на различных уровнях и с разной долей автономности:

- узел – например, контроль и ведение работы подшипника;
- системы – например, контроль и ведение работы системы маслоснабжения, смазки, системы парораспределения или тепловых расширений турбины;
- оборудование – например, работа конденсатора;
- комплекс – например, конденсаторной, бойлерной или регенеративной группы;
- турбоустановка (когда она рассматривается как система с возможностью работы на оптимальных режимах, в том числе влиянием на параметры и режимы работы смежного оборудования) – например, параметры работы котельного, генераторного или других комплексов оборудования.

Разработка таких решений выполняется на этапе КПП, внедрение – на этапе монтажа

и пусконаладки, уточнение по итогам опытно-промышленной эксплуатации, то есть «обратной связи». Одним из показательных таких примеров является решение задачи, которое позволит повысить экономичность системы снижения температуры выхлопных газов котла-утилизатора парогазовой теплофикационной установки.

Решение касается способа регулирования давления пара контура НД котла-утилизатора ПГУ, содержащей двухконтурный котел-утилизатор с контурами ВД и НД. Оно заключается в измерении давления пара в контуре НД котла-утилизатора и сравнении его с заданной величиной – при снижении давления пара в контуре НД до величины менее заданного значения прикрываются органы паровпуска НД и обеспечивается давление пара в контуре НД котла-утилизатора на уровне заданной величины.

Пар контура ВД через орган паровпуска ВД подводится в паровую турбину, пар контура НД подводится в паровую турбину через орган паровпуска контура НД, величина давления пара контура НД, замеренная, например, с помощью манометра, по импульсной линии передается в сумматор, куда поступает сигнал от датчика заданного давления. В сумматоре сигнал от манометра и датчика приводятся к одному виду (например, к токовому сигналу) и выполняется алгебраическое сложение преобразованных сигналов.

При неравенстве этих сигналов в результате того, что давление пара в контуре менее заданной величины датчика, алгебраическая сумма преобразованных сигналов в сумматоре не равна нулю, вследствие чего от сумматора по импульсной линии поступает сигнал на прикрытие органа паровпуска контура НД, что вызывает увеличение давления в контуре НД до заданной величины. При равенстве сигналов от манометра и датчика, что обусловлено равенством давления пара в контуре и заданного давления, алгебраическая сумма преобразованных сигналов в сумматоре равна нулю. В этом случае одновременно исчезает сигнал, передаваемый от сумматора по импульсной линии к органу паровпуска контура НД, в результате чего прекращается его дальнейшее прикрытие.

Таким образом, предложенное решение по регулированию давления пара в контуре НД котла-утилизатора позволяет поддерживать это давление на уровне заданной величины, что исключает вероятность отключения указанного контура и обеспечивает высокую экономичность ПГУ на переменных режимах.

При этом при определенной величине давления пара в контуре НД котла-утилизатора может произойти отключение этого контура, что снижает экономичность ПГУ в связи с переходом с двухконтурного на одноконтурный подвод пара, то есть только ВД.

Предлагаемое решение позволяет предотвратить отключение контура НД котла-утилизатора и обеспечить высокую экономичность ПГУ на переменных режимах, что достигается прикрытием органов паровпуска контура НД и обеспечением давления пара в контуре НД котла-утилизатора на заданном уровне. В турбинах производства УТЗ в качестве органов паровпуска контура НД применяется стопорно-регулирующий клапан НД.

В рамках пусконаладочных работ энергоблока также можно реализовать еще одно предложенное автором техническое решение: снизить увеличенные потери мощности в связи с прокачкой всего расхода циркуляционной охлаждающей воды на выходе из конденсатора через охладитель конденсата, что влияет на электрическую мощность и экономичность турбоустановки.

Техническая задача – повышение экономичности системы снижения температуры выхлопных газов котла-утилизатора парогазовой теплофикационной установки, содержащей последовательно установленные на трубопроводе сетевой воды подогреватели, каждый из которых выполнен с подводом пара из отборов турбины и сливом конденсата в объединенную линию конденсата; охладитель конденсата подогревателей, подсоединенный к объединенной линии конденсата и установленный на трубопроводе циркуляционной воды; газовый подогреватель конденсата, установленный по тракту выхлопных газов и подсоединенный к объединенной линии отвода конденсата из охладителя конденсата.

Через охладитель конденсата подводится максимальная величина расхода циркуляционной охлаждающей воды, равная удвоенной величине расхода конденсата подогревателей. При этом охладитель конденсата установлен на отдельном трубопроводе, отключаемом от основного трубопровода циркуляционной воды на выходе из конденсатора при отсутствии подвода пара к подогревателям.

Приведенная максимальная величина расхода циркуляционной охлаждающей воды через охладитель конденсата может быть обоснована на основе рассмотрения двух следующих уравнений:

$$Q_{цв} = W \cdot C_{цв} \cdot \Delta t_{цв}$$

$$Q_k = G_k \cdot C_k \cdot \Delta t_k,$$

где $Q_{цв}$ – количество тепла, подводимое к циркуляционной воде в охладителе конденсата; W – расход циркуляционной воды; $C_{цв}$ – теплоемкость циркуляционной воды; $\Delta t_{цв}$ – нагрев циркуляционной воды в охладителе конденсата; Q_k – количество тепла, отдаваемого конденсатом подогревателей циркуляционной воде в охладителе конденсата; G_k – расход конденсата подогревателей; C_k – теплоемкость конденсата; Δt_k – снижение температуры конденсата подогревателей в охладителе конденсата.

Поскольку $Q_{цв} = Q_k$, то

$$W \cdot C_{цв} \cdot \Delta t_{цв} = G_k \cdot C_k \cdot \Delta t_k.$$

Имея в виду, что $C_k = C_{цв}$, так как конденсат тоже вода, и что $\Delta t_k = \Delta t_{цв} + \delta t_{цв}$, где $\delta t_{цв}$ – недогрев циркуляционной охлаждающей воды в охладителе конденсата, становится очевидным, что

$$W \cdot \Delta t = G_k (\Delta t_{цв} + \delta t_{цв}).$$

С учетом преобразований получим

$$W = G_k \left(1 + \frac{\delta t_{цв}}{\Delta t_{цв}} \right).$$

Максимальная величина расхода циркуляционной воды через охладитель конденсата составит

$$W_{max} = \lim G_k \left(1 + \frac{\delta t_{цв}}{\Delta t_{цв}} \right) = G_k (1 + 1) = 2G_k.$$

Таким образом, теоретически обосновано, что максимальная величина расхода циркуляционной охлаждающей воды через охладитель конденсата равна удвоенной величине расхода конденсата подогревателей. В теплофикационных паровых турбинах для ПГУ при работе по тепловому графику наблюдается ограниченный расход пара для охлаждения ступеней ЧНД. В связи с этим величина G_k для определения W_{max} может быть принята равной расходу пара на турбину. При одноконтурной ПГУ – это расход пара на турбину, а при двухконтурной – суммарная величина расходов пара контуров ВД и НД, которые задаются при проектировании.

Величина расхода пара на турбину или суммарная величина расходов пара контуров ВД и НД при двухконтурной ПГУ и удвоенная величина этих расходов значительно меньше расхода циркуляционной охлаждающей воды на выходе из конденсатора [1–7]. В связи с этим максимальная величина расхода циркуляционной охлаждающей воды через охладитель конденсата также значительно меньше ее расхода на выходе из конденсатора.

Предложенное решение позволяет повысить мощность теплофикационной турбоустановки, так как при этом снижается мощность, затрачиваемая на прокачку циркуляционной охлаждающей воды через охладитель конденсата.

На *рис.* представлена принципиальная схема системы снижения температуры выхлопных газов котла-утилизатора ПГУ с теплофикационной турбоустановкой, позволяющая реализовать такое решение.

В предложенную систему входит:

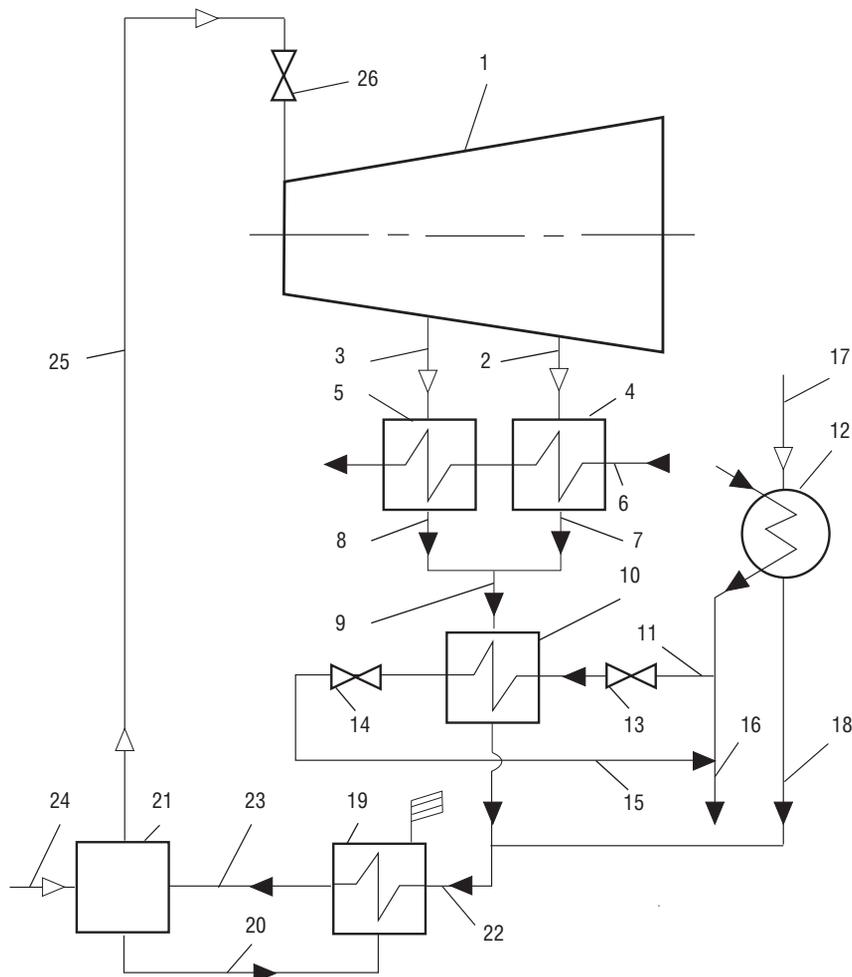
- паровая теплофикационная турбина 1 с трубопроводами 2 и 3 подвода пара к подогревателям 4 и 5, установленным последовательно на трубопроводе сетевой воды 6, с линиями 7 и 8 слива конденсата от подогревателей 4 и 5 в объединенную линию 9 конденсата;
- охладитель конденсата 10, подсоединенный к объединенной линии 9 подвода конденсата и установленный на трубопроводе 11 циркуляционной воды на выходе из конденсатора 12 с отключающими задвижками 13 и 14;
- трубопровод 15 отвода нагретой циркуляционной охлаждающей воды из охладителя конденсата 10 в основной трубопровод 16 циркуляционной охлаждающей воды;
- выхлопной патрубок 17, сбрасывающий отработавший в турбине 1 пар в конденсатор 12, и линия отвода 18 конденсата из него;
- газовый подогреватель конденсата 19, установленный по тракту 20 выхлопных газов котла-утилизатора 21 и подсоединенный к трубопроводу 22 подвода конденсата из охладителя конденсата 10 и трубопровода 23 отвода конденсата в котел-утилизатор 21;
- трубопровод 24 подвода отработавших в газовой турбине газов к котлу утилизатору 21 и трубопровод 25 подвода пара от котла утилизатора 21 с установленными на нем органами паровпуска 26 к турбине 1.

При эксплуатации турбины 1 на теплофикационных режимах пар по трубопроводам 2 и 3 подводится к подогревателям 4 и 5, установленным последовательно на трубопроводе 6 сетевой воды, а конденсат по линиям 7 и 8 сливается в объединенную линию 9 и по ней в охладитель конденсата 10, установленный на трубопроводе 11 циркуляционной охлаждающей воды на выходе из конденсатора 12. Задвижки 13 и 14 при этом открыты, что обеспечивает пропуск части циркуляционной охлаждающей воды через охладитель конденсата 10. Охлажденный конденсат по трубо-

проводу 22 поступает в газовый подогреватель конденсата 19. В трубопровод 22 поступает также по трубопроводу 18 конденсат из конденсатора 12. По трубопроводу 23 нагретый в газовом подогревателе 19 конденсат поступает в котел-утилизатор 21. Выхлопные газы из котла-утилизатора 21 по тракту 20 отводятся в газовый подогреватель конденсата 19, отдают часть своего тепла конденсату, снижая тем самым свою температуру, и далее выбрасываются в атмосферу. Отработавшие в газовой турбине выхлопные газы по трубопроводу 24 поступают в котел-утилизатор 21, отдают большую часть своего тепла для образования пара, который по трубопроводу 25 через органы паровпуска 26 поступает в турбину 1.

При отсутствии подвода пара к подогревателям 4 и 5 турбина 1 переводится в конденсационный режим, в результате которого практически весь пар отводится в конденсатор 12. Задвижки 13 и 14 на трубопроводе 11 циркуляционной охлаждающей воды закрываются, в результате чего циркуляционная вода в охладитель конденсата не поступает.

Рис.
Принципиальная схема системы снижения температуры выхлопных газов котла-утилизатора ПГУ с теплофикационной турбоустановкой



При этом конденсат из конденсатора 12 по трубопроводу 18 поступает в трубопровод 22 и далее в газовый подогреватель конденсата 19 и по трубопроводу 23 в котел-утилизатор 21. Поскольку температура конденсата в конденсаторе 12 невысока, то и температура подогрева его в газовом подогревателе конденсата 19 также будет ограничена, в результате чего температура выхлопных газов не достигнет допустимой по экологическим условиям величины.

Данное предложенное решение – пропуск через охладитель конденсата максимальной величины расхода циркуляционной охлаждающей воды, которая значительно меньше ее расхода на выходе из конденсатора, с установкой системы на отдельном трубопроводе – позволяет повысить мощность и экономичность теплофикационной установки, так как при этом снижается затрачиваемая мощность на прокачку циркуляционной воды через охладитель конденсата. **Д**

Список литературы

1. Г. Д. Баринберг, А. Е. Валамин, А. Ю. Култышев. Паровые турбины ЗАО «УТЗ» для перспективных проектов ПГУ // Теплоэнергетика. 2009, № 9. С. 6-11.
 2. Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода: монография / Г. Д. Баринберг, Ю. М. Бродов, А. А. Гольдберг, Л. С. Иоффе, В. В. Кортенко, А. Ю. Култышев, В. Б. Новоселов, Ю. А. Сахнин, М. В. Шехтер, М. Ю. Степанов, Т. Л. Шибяев, А. А. Ямалтдинов. –

Екатеринбург: под редакцией проф., д.т.н. Ю. М. Бродова и к.т.н. А. Ю. Култышева; 3-е изд., переработанное и дополненное. Априо, 2017, 488 с.

3. Г. Д. Гольдберг, Л. С. Иоффе, П. В. Коган, А. Ю. Култышев, Ю. А. Сахнин, М. В. Шехтер, М. Ю. Степанов, Т. Л. Шибяев. – Екатеринбург: 2-е изд., переработанное и дополненное. ООО «Издательство УМЦ УПИ». – 2015. – 168 с.

4. Култышев А. Ю. Парогазовые установки и особенности паровых турбин для ПГУ: учебное пособие / А. Ю. Култышев, В. Н. Голошумова, А. С. Алешина. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. – 2022. – 163 с., ил.

5. Култышев А. Ю. Проектирование паровых турбин ЗАО «УТЗ» с учетом определения оптимальных параметров пара для повышения эффективности парогазовых энергоблоков / А. Ю. Култышев, М. Ю. Степанов, Е. Н. Поляева // Материалы научно-технической конференции «Перспективы развития новых технологий в энергетике России», ОАО «ВТИ», Москва. С. 77-83.

6. Паротурбинные установки: учебное пособие / А. Ю. Култышев, Е. Н. Поляева, М. Ю. Степанов А. М. Табаков. – Екатеринбург: ЗАО «УТЗ», 2011, 230 с.

7. Валамин А. Е. Новые проекты Уральского турбинного завода для парогазовых установок / А. Е. Валамин, А. Ю. Култышев, Ю. А. Сахнин, М. Ю. Степанов // Турбины и дизели. 2012. № 1. С. 52-56.

Новости

Компания «ПСМ» ввела газопоршневую электростанцию для ПАО «ЛУКОЙЛ».

Энергоблок мощностью 400 кВт контейнерного исполнения создан на базе двигателя SGE-24SL (Siemens Energy). ГПЭС оснащена системами контроля загазованности и газового пожаротушения, автоматической охранно-пожарной сигнализацией. В ее состав также входит распределительное устройство на базе автоматики АВВ, аппарат воздушного охлаждения Alfa Laval.

Энергоблок производства ООО «ПСМ» размещен в специализированном 7-метровом контейнере КСПМ, оснащенный системой приточной вентиляции. Контейнер имеет утепление толщиной 100 мм для работы при экстремально низких температурах – до минус 60 °С.

Топливом для электростанции является попутный нефтяной газ с низким метановым числом, добываемый на нефтегазовом месторождении ЯНАО.

PSM LLC has commissioned gas engine power plant under the order of LUKOIL PJSC.

The 400 kW container-type power plant is based on the SGE24 SL (Siemens Energy) gas engine. The plant is equipped with gas pollution control and gas fire extinguishing systems, automatic fire alarm systems.



NTPC и GE Gas Power будут совместно изучать возможности работы ГТУ на смеси природного газа и водорода.

В рамках программы по снижению уровней эмиссии CO₂ при производстве электроэнергии в Индии компании NTPC Ltd. и GE Gas Power подписали меморандум об изучении возможности работы газовых турбин серии 9E на топливной смеси природного газа и водорода. Турбины установлены на электростанции комбинированного цикла Kawas в провинции Гуджарат.

В составе электростанции Kawas общей мощностью 645 МВт работают четыре парогазовых энергоблока. В настоящее время газовые турбины серии E, по заявлению компании GE, способны работать на топливной смеси с содержанием водорода до 100 %. Доля водорода в топливной смеси зависит от типа применяемой камеры сгорания. При содержании водорода более 5 % необходима модификация системы подачи топлива и стандартной камеры сгорания.



Для бесперебойного электропитания логистического центра в Ростовской области построят мини-ТЭС.

ООО «ТехноЭнергоКомплекс» построит мини-ТЭС для электроснабжения логистического центра, расположенного на хуторе Ленина в Аксайском районе.

В состав когенерационной станции войдут три газопоршневые установки TCG 3016V16 S электрической мощностью по 1000 кВт, тепловой – по 1123 кВт производства компании MWM.

ГПУ-ТЭС будет использоваться для собственных нужд складского комплекса и полностью обеспечит его электро- и теплоснабжение. Внешняя электрическая сеть будет выступать в качестве резерва.

Ввод оборудования в промышленную эксплуатацию запланирован на текущий год.

Турбины и Дизели

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

**Подписной индекс
в Объединенном каталоге
«Пресса России»:**

Журнал «Турбины и Дизели»

87906

**Каталог
энергетического оборудования
«Турбины и Дизели»**

87907

РЕКЛАМА

Подписка через редакцию с любого номера журнала

Тел./факс: (4855) 285-997

info@turbine-diesel.ru

www.turbine-diesel.ru

Анализ эффективности и оптимизация работы газовой турбины MGT-30

при различных условиях с применением систем предварительного охлаждения воздуха на входе

Х. Айкут – магистрант, Высшая школа атомной и тепловой энергетики, h.aykut102@gmail.com

М. Басати Панах*, к.т.н. – ассистент, basati_pm@spbstu.ru

А. С. Алешина,* к.т.н. – доцент, директор, Alena.Aleshina@spbstu.ru

Ю. В. Матвеев,* к.т.н. – доцент, Matveev_yuv@spbstu.ru

*Высшая школа энергетического машиностроения, Институт энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ

Ключевые слова:

эффективность, эксплуатационные характеристики, газовая турбина MGT-30, предварительное охлаждение воздуха, оптимизация

Аннотация

В работе представлен анализ влияния различных систем охлаждения воздуха, поступающего в компрессор газотурбинной установки MGT-30 на её эффективность и мощность. ГТУ производится иранской компанией Mapna Group Company. Данные машины применяются в качестве приводов нагнетателей газоперекачивающих агрегатов, насосов, эжекторов, стационарных или мобильных электростанций Ирана.

В октябре 2022 г. состоялось подписание экспортного соглашения между Ираном и РФ о поставке 40 единиц ГТУ. Оно стало крупнейшим в истории технологического экспорта для страны.

Целью исследования работы является определение оптимальных параметров поступающего в компрессор воздуха и систем его охлаждения. Расчет и оптимизация рабочих параметров MGT-30 производились в программном пакете MATLAB, программе GT PRO и специализированной программе для расчета технических характеристик A2GTP.

Полученные результаты показали, насколько внедрение системы предварительного охлаждения воздуха оказывает положительное влияние на термический КПД ГТУ и выявили возможный потенциал его повышения.

Efficiency analysis and optimization of MGT-30 gas turbine operation under various conditions using inlet air precooling systems

H. Aykut – Master Degree Student, of Higher School of Nuclear and Thermal Engineering, h.aykut102@gmail.com

M. Basati Panah,* PhD (in Tech.) – Assistant, basati_pm@spbstu.ru

A. S. Aleshina,* PhD (in Tech.) – Ass.Professor, Director, Alena.Aleshina@spbstu.ru

Yu. V. Matveev,* PhD (in Tech.) – Ass.Professor, Matveev_yuv@spbstu.ru

*Higher School of Power Engineering, Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Key words:

efficiency, operational characteristics, gas turbine MGT-30, precooling, optimization

Abstract

The study presents an analysis of the impact of different air-cooling systems on the efficiency and power of the compressor in the MGT-30 gas turbine unit (GTU). The MGT-30, manufactured by the Iranian company Mapna Group Company, serves as a driver for various applications, including gas booster units, pumps, ejectors, and stationary or mobile power plants in Iran.

A significant milestone was reached in October 2022 with the signing of an export agreement between Iran and the Russian Federation for the supply of 40 units of GTU, marking a historic moment in the country's technological export endeavors.

The objective of this research is to determine the optimal parameters of the incoming air to the compressor and its associated cooling systems. The calculations and optimization of the operating parameters of the MGT-30 were conducted using MATLAB, GT PRO software, and the specialized A2GTP program for the assessment of technical characteristics.

The results obtained from the study demonstrate the favorable influence of incorporating a pre-cooling system for the air, showcasing improvements in the thermal efficiency of the GTU and uncovering potential avenues for further enhancement.

Введение

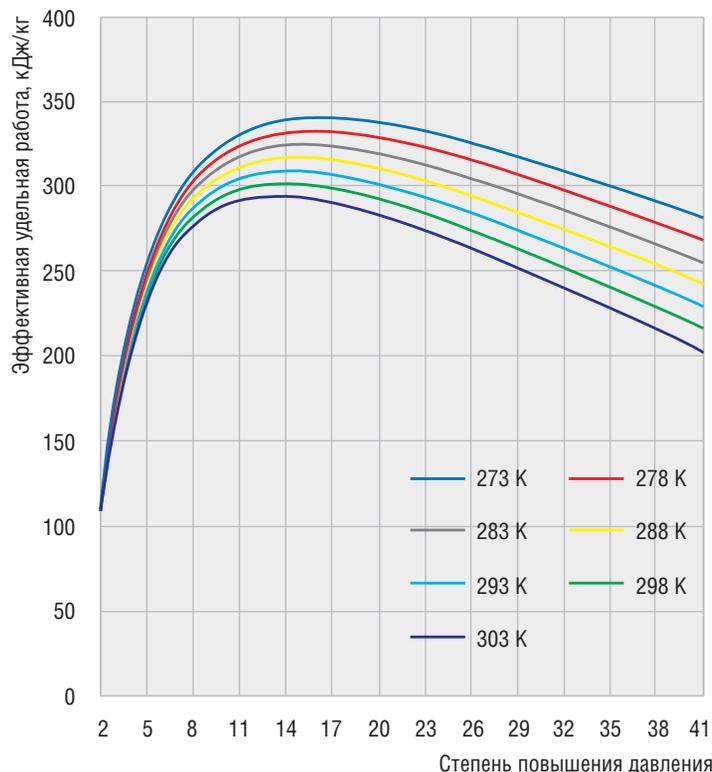
Насосы и компрессоры выполняют схожую функцию, которая заключается в повышении давления и перекачке рабочей среды к последующим элементам процесса с теплообменом. Современные компрессоры обладают возможностью достигать степени повышения давления до 35 и обеспечивать высокий рабочий КПД, который может достигать 90 %. В настоящее время широко применяются радиальные и осевые компрессоры [1].

Основная функция компрессора ГТУ – сжатие атмосферного воздуха и его подача в камеру сгорания. При повышении температуры атмосферного воздуха T_n в ГТУ происходит снижение ее мощности и экономичности. Как отмечено в [14], это объясняется тем, что полезная работа ГТУ L_e равна разности между работой турбины L_T и компрессора L_K , т. е. $L_e = L_T - L_K$, при этом L_e в несколько раз меньше, чем L_T и L_K . Следовательно, даже небольшое увеличение L_K приводит к сильному снижению L_e . Работа компрессора пропорциональна температуре атмосферного воздуха.

Стандартным для проектирования российских ГТУ считается атмосферное давление $P_n=0,1013$ МПа и температура атмосферного воздуха $T_n = 273,15$ К [13]. Ее повышение на 10 % увеличивает работу компрессора на 10 %, а так как L_T остается неизменной, то L_e снижается на 20...25 %. При этом уменьшается расход воздуха G_b (из-за снижения степени повышения давления в компрессоре π_k). В результате мощность $N_b = G_b \cdot L_b$ уменьшается на 25...30 %.

Для рассматриваемой в работе ГТУ MGT-30 повышение T_n на 1 градус приводит к снижению мощности на 0,9...1 % [14]. В статье [2] исследуется эффективность газотурбинных электростанций с системами предварительного охлаждения воздуха. В работе [15] отмечается, что для большинства ГТУ характерен постоянный объемный расход воздуха. Таким образом, с повышением плотности воздуха, поступающего в систему, увеличивается его масса, при этом повышается мощность установки.

В странах с жарким климатом, а также в южных регионах России наблюдаются значительные потери мощности ГТУ, особенно в летний период. Даже с учетом затрат энергии на охлаждение поступающего к компрессору воздуха можно существенно увеличить электрическую мощность, используя различные системы охлаждения воздуха или их комбинацию. Как правило, для охлаждения атмосферного воздуха применяются:



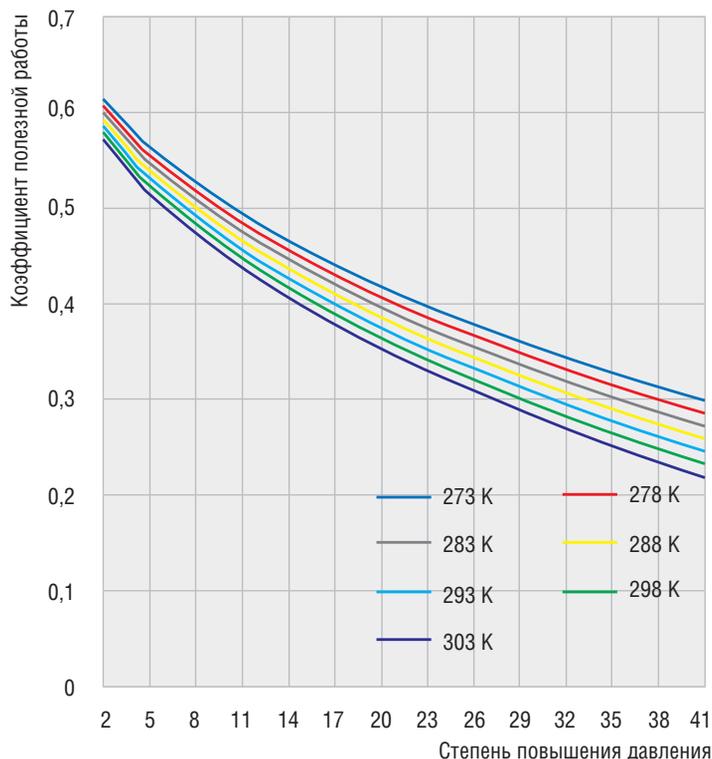
- системы испарительного охлаждения (Direct Evaporative Cooling System);
- системы непосредственного охлаждения с охлаждающей жидкостью (Spraying finely atomized water and fog production);
- абсорбционные холодильные установки (Cooling system using mechanical chillers or Absorption chillers).

Рис. 1.

График зависимости эффективной удельной работы от π_k при различных T_n

Рис. 2.

График зависимости коэффициента полезной работы от π_k при различных T_n



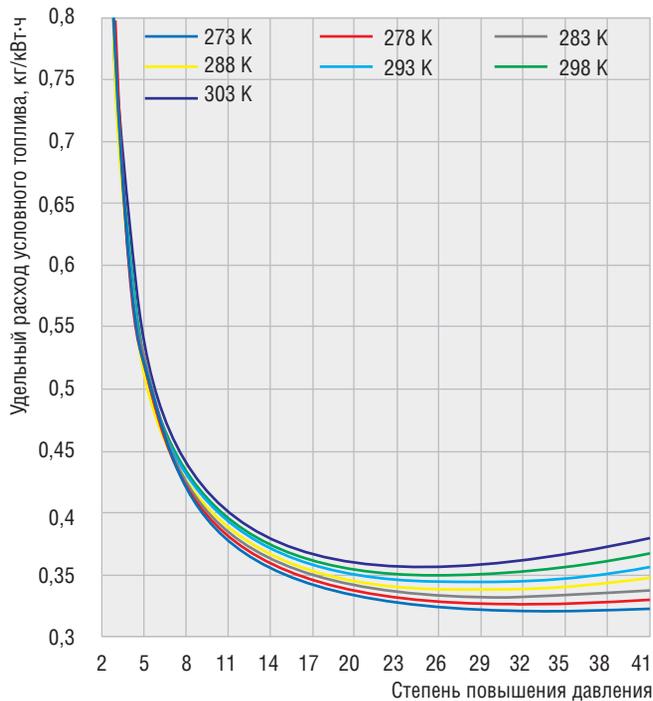
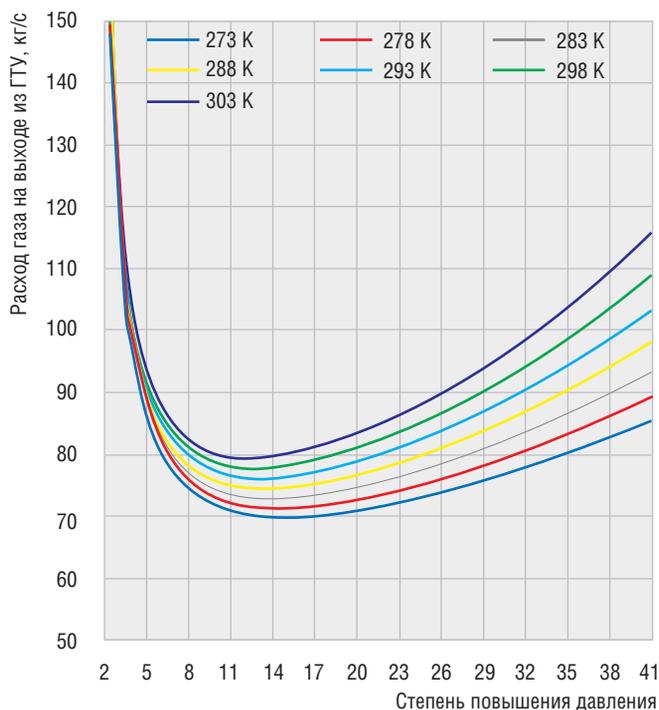


Рис. 3. График зависимости удельного расхода условного топлива от T_n при различных T_n

В статье [2] исследуется эффективность газотурбинных электростанций (ГТЭС) с системами предварительного охлаждения поступающего воздуха. Исследование выполнено для гибридной системы охлаждения, объединяющей системы испарительного охлаждения и абсорбционные холодильные установки. Работа ГТЭС в Иране осложнена в связи с высокой температурой окружающей среды. Одним из самых жарких месяцев является июль. На этом основании был проведен анализ

Рис. 4. График зависимости расхода газа на выходе из ГТУ от T_n при различных T_n



производимой мощности и КПД с учетом работы системы охлаждения поступающего воздуха для данного месяца – он показал прирост мощности и повышение термического КПД. Результатом исследования было доказано, что гибридная система охлаждения обеспечивает наибольшее увеличение выходной мощности и повышение теплового КПД газовой турбины.

Полученные результаты подчеркивают важность применения систем предварительного охлаждения для оптимизации работы ГТЭС [2] – в статьях [2–6] представлен обширный материал о преимуществах их внедрения в ГТУ. Основываясь на данных научных исследованиях, было установлено, что предварительное охлаждение способно существенно улучшить работу ГТУ, обеспечивая повышение ее эффективности и снижение расхода топлива. Это достигается за счет оптимизации работы компрессора и улучшения параметров входного воздуха. Исследования подтверждают значительный потенциал от применения предварительного охлаждения и представляют научно обоснованные данные для использования этих методов применительно к ГТУ [2–6].

Методология

Газовая турбина MGT-30 – это высокоэффективный (КПД 36 %) и надежный агрегат, специально разработанный для применения в промышленности. ГТУ является многовальной, с силовой турбиной [7], в основе ее конструкции – газовая турбина SGT-600, приобретенная по лицензии у компании Siemens. MGT-30 оснащена высокоэффективной, малоэмиссионной камерой сгорания. Для обеспечения минимальных значений вредных выбросов ГТУ оборудована системой сухого подавления выбросов NO_x и CO, являющихся основным источником загрязнения атмосферы газотурбинными двигателями. Помимо этого, передовая система управления ГТУ обеспечивает оптимальный контроль эксплуатации, снижая износ оборудования [7].

Для турбины, применяемой в составе ГТЭС, рассмотрена гибридная система охлаждения атмосферного воздуха, включающая испарительное охлаждение и абсорбционную холодильную установку. Такая система оказывает положительное влияние на рабочие характеристики при неблагоприятных атмосферных условиях, таких как влажность и высокая температура окружающей среды.

В ходе проведения исследования применялся пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений: MATLAB, GTPRO и программа A2GTP. Эти программные инструменты предоставляют широкий спектр функ-

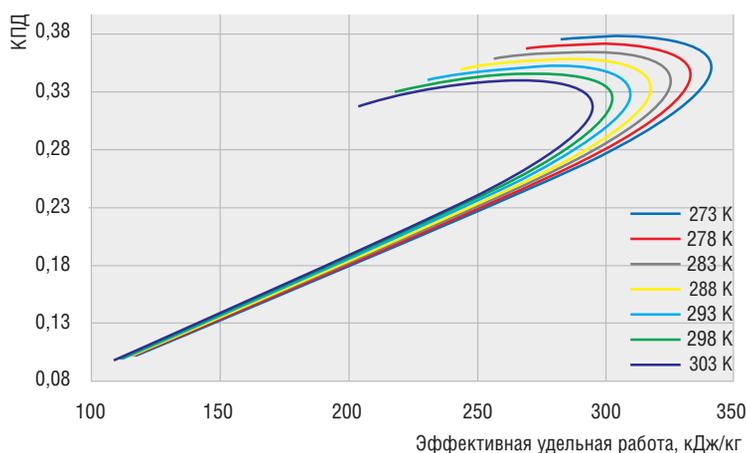
циональных возможностей, позволяющих анализировать и моделировать различные характеристики и параметры газовых турбин, а также находить оптимальные рабочие характеристики посредством задания целевых функций с наложенными ограничениями. Применение данного программного обеспечения позволило смоделировать и исследовать рабочие процессы ГТУ с учетом изменения условий эксплуатации и систем предварительного охлаждения воздуха. Это способствовало получению достоверных результатов [8–12].

Эффективность понижения температуры поступающего в ГТУ воздуха зависит от многих факторов, таких как конструкция и способы охлаждения (испарительное, прямое охлаждение хладагентом, охлаждение вторичным хладоносителем), условия окружающей среды, режим работы ГТЭС. Абсорбционные холодильные установки обычно способны снизить температуру входного воздуха на 10...20 градусов, системы испарительного охлаждения – на 5...15 градусов, а системы распыливания жидкости – на 2...5 градусов. Каждая из перечисленных систем предварительного охлаждения воздуха имеет свои конструктивные особенности и функционирует по-разному. Их можно комбинировать с целью достижения большей эффективности энергоустановки за счет существенного снижения температуры поступающего воздуха.

Однако одновременное совместное использование всех трех систем охлаждения может быть невыгодным по причине усложнения конструкции или связано с определенными режимными характеристиками работы электростанций [2–6].

Как показано на рис. 1, при увеличении степени повышения давления компрессора, эффективная удельная работа газовой турбины возрастает и после достижения максимума начинает снижаться. Однако имеется ограничение для увеличения степени повышения давления компрессора. Как известно [16], существует оптимальное значение π_k , так как рост потребляемой компрессором мощности приводит к снижению эффективности ГТУ.

ГТУ очень чувствительны к изменению температуры и давления наружного воздуха на входе в компрессор. Колебание этих параметров сказывается на коэффициенте полезной работы ГТУ – ϕ . Из-за изменения T_n происходит изменение соотношения внутренних мощностей компрессора и турбины, в результате чего изменяется электрическая мощность и коэффициент полезной работы. На рис. 2 представлены зависимости коэффициента полезной



работы ГТУ от π_k при различных температурах воздуха T_n на входе в компрессор. Повышение температуры окружающей среды приводит к снижению термического КПД ГТУ.

Кроме того, изменение π_k влияет на изменение удельного расхода топлива. На рис. 3 показана эта зависимость с учетом различных температур T_n , расход газа G_T также связан с изменением π_k . На рис. 4 даны расходные характеристики для различных T_n .

Рис. 5. График зависимости эффективного КПД от эффективной удельной работы при различных T_n

Табл. 1. Выходные данные для различных систем охлаждения на входе в ГТУ

Система охлаждения на входе		Мощность, кВт	Нижний теплотворный расход (LHV), кДж/кВт·ч	КПД, %	
Абсорбционная холодильная установка	Воздушный охлаждаемый электрический чиллер, ΔT	5	25042	9745	36,94
		10	25876	9732	36,99
		11	26027	9736	36,97
		12	26162	9747	36,93
		12,22	26190	9750	36,92
	Водо-охлаждаемый электрический чиллер, ΔT	5	25065	9736	36,98
		10	25940	9709	37,08
		11	26099	9710	37,08
		12	26250	9714	37,06
		12,22	26284	9715	37,06
	Водо-охлаждаемый абсорбционный чиллер, ΔT	5	25115	9717	37,05
		10	26104	9648	37,32
11		26305	9633	37,37	
12		26508	9620	37,42	
12,22		26548	9618	37,43	
Испарительный охладитель	Эффективность, %	80	24791	9754	36,91
		85	24841	9748	36,93
		90	24890	9743	36,95
Форсунка	Нижнее распыление – эффективность, %	85	24839	9749	36,93
	Верхнее распыление (в процентах насыщенного потока воздуха), %	0,1	25392	9673	37,22
		0,2	25761	9624	37,41
		0,3	26095	9585	37,56
		0,4	36420	9549	37,70
		0,5	26735	9517	37,83

Результаты

С увеличением π_k эффективность ГТУ обычно возрастает до определенной точки, после которой происходит снижение этого параметра [16]. Это обусловлено тем, что дальнейшее повышение π_k уже не может положительно влиять на эффективность процесса сгорания топлива и повышение температуры на входе в турбину, но требует всё большей затраты мощности на работу компрессора. Однако при дальнейшем повышении π_k температура и скорость газов, попадающих в турбину, могут достигнуть значения, превышающего максимально допустимые значения для лопаток турбины, что приводит к снижению ее эффективности.

Влияние окружающей температуры на эффективность турбины может зависеть и от других факторов, таких как влажность и высота над уровнем моря.

Как показано на *рис. 5*, при повышенных температурах T_n эффективность цикла газовой турбины снижается. Однако увеличение π_k может повысить эффективность цикла и поддерживать или даже увеличивать эффективность работы турбины.

На *рис. 1–4* представлены графики для ГТУ без системы предварительного охлаждения входного воздуха. В рамках исследования были применены различные системы охлаждения входного воздуха для газовой турбины, указанные ранее (данные представлены в *табл. 1*). Для всех типов чиллеров окружающая температура была снижена, испарительные охладители имели различную эффективность. Для системы распыления были проанализированы два метода – «нижнее» и «верхнее». Учитывая полученные значения, сравнивались мощность, теплотворная способность топлива и электрический КПД.

Табл. 2.

Данные по комбинированным системам охлаждения воздуха

Система охлаждения воздуха на входе в компрессор	Мощность, кВт	Нижний теплотворный расход (LHV), кДж/кВт·ч	КПД, %
Распыление (Верхнее распыление)	26735	9517	37,83
Абсорбционная холодильная установка + Испарительный охладитель	26499	9627	37,39
Абсорбционная холодильная установка + Нижнее распыление	26498	9627	37,39
Абсорбционная холодильная установка + Верхнее распыление	28334	9424	38,20
Испарительный охладитель + Нижнее распыление	24926	9741	36,96
Испарительный охладитель + Верхнее распыление	26700	9520	37,81
Абсорбционная холодильная установка + Испарительный охладитель + Верхнее распыление	28294	9429	38,18

Выводы

Согласно данным, представленным в *табл. 1* и *2*, было приведено сравнение двух систем охлаждения – абсорбционной холодильной установки, обеспечивающей снижение температуры, и системы распыления с верхним расположением.

При сравнении двух систем охлаждения видно, что ГТУ с системой распыления с верхним расположением имеет более высокую выходную мощность на валу (26735 против 26548 кВт) в отличие от ГТУ с абсорбционной холодильной установкой. Кроме того, система с верхним распылением имеет более низкий теплотворный расход LHV (9517 против 9618 кДж/кВт·ч), что указывает на ее большую эффективность. В частности, электрический КПД ГТУ с системой верхнего распыления составляет 37,83 %, в то время как у ГТУ с абсорбционной холодильной установкой он составляет 37,43 %.

Таким образом, на основании этих результатов ГТУ с системой верхнего распыления представляется более эффективной, поскольку она обладает более высокой выходной мощностью и эффективностью по сравнению с аналогичной ГТУ с абсорбционной холодильной установкой. В результате, когда системы охлаждения входного воздуха применяются в газовой турбине последовательно, видно, что система верхнего распыления дает более эффективные результаты по сравнению с другими системами. На следующем этапе системы охлаждения атмосферного воздуха были объединены друг с другом и проанализированы.

Абсорбционная холодильная установка и системы с верхним распылением, а также комбинация трех типов систем охлаждения (абсорбционная холодильная установка + испарительное охлаждение + верхнее распыление) показывают лучшие результаты по показателям выходной мощности и эффективности.

Система, включающая абсорбционную холодильную установку, испарительное охлаждение и верхнее распыление, имеет немного меньшую выходную мощность по сравнению с системой, включающей только абсорбционную холодильную установку и верхнее распыление. Однако разница в выходной мощности незначительна. Что касается термического КПД, обе системы имеют схожие показатели теплотворности LHV. Также наблюдается сопоставимый уровень электрической эффективности для обеих систем. **Д**

Список литературы

1. Moradi, Amir & Masoomi, Mina & Salehi, Gholam & Khoshgoftar Manesh, Mohammad Hasan. (2021). Performance Analysis of Gas Turbine Inlet Air Cooling Plant with Hybrid Indirect Evaporative Cooling and Absorption Chiller System. *International Journal of Thermodynamics*. 24. 248-259. 10.5541/.840496.

2. Y. S. H. Najjar, A. M. Abubaker. «Indirect evaporative combined inlet air cooling with gas turbines for greenpower technology», *International Journal of Refrigeration*., 59, 235-250, 2015.

3. M. Farzaneh-Gord, M. Deymi-Dashtebayaz, «Effect of various inlet air cooling methods on gas turbine performance», *Jornal of Energy*., 36, 1196-1205, 2011.

4. Marzouk, A. Hanafi. «Thermo-Economic Analysis of Inlet Air Cooling In Gas Turbine Plants», *Journal of Power Technologies*., 93 (2), 90-99, 2013.

5. A. Paula P. D. Santos, C. R. Andrade, Edson L. Zaparoli. «Comparison of Different Gas Turbine Inlet Air Cooling Methods», *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*., Vol:6, No:1. 2012.

6. «Mapna Group» [Online]. Available: <https://mapnagroup.com/mgt-30-gas-turbine/> [Accessed 10 April 2023].

7. Расчет тепловой схемы газотурбинной установки: учебное пособие / В. В. Барсков, С. Н. Беседин, Н. А. Забелин и др.; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.— Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2018.

8. Повышение экономичности и надежности газотурбинных установок за счет применения аддитивных технологий / М. Басати Панах, В. А. Рассохин, В. В. Барсков [и др.] // *Надежность и безопасность энергетики*. – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 102-110. – DOI 10.24223/1999-5555-2022-15-2-102-110. – EDNCSOENP.

9. Влияние охлаждения высокотемпературных лопаточных аппаратов на эффективность газотурбинных установок, с уче-

том зависимости удельной теплоемкости рабочего тела от температуры / М. Басати Панах, В. А. Рассохин, В. В. Барсков [и др.] // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2022. – Т. 16. – №2. DOI: 10.17816/2074-0530-106231.

10. *Машиностроение : Энциклопедия в 40 томах / К. Э. Аронсон, В. И. Брезгин, Ю. М. Бродов [и др.]*. – Москва: Издательство «Инновационное машиностроение», 2016. – 472 с. – (Расчет и конструирование машин; Теплообменные аппараты технологических подсистем турбоустановок). – ISBN 978-5-9907638-5-2.

11. Рассохин В. А., Барсков В. В., Ядыкин В. К. [и др.] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663503 Российская Федерация. Программа расчёта малорасходных одноступенчатых турбин конструкции ЛПИ осевого и радиального типа (ONE1): № 2019662301: заявл. 08.10.2019: опубл. 17.10.2019 / ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

12. ГОСТ Р 52782-2007.

13. Улучшение характеристик газотурбинных установок при повышенных температурах воздуха / Антипов Ю. А., Барский И. А., Шаталов И. К., Терехов Д. В. [и др.] // *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2009. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uluc-hshenie-harakteristik-gazoturbinnuh-ustanovok-pri-rovuyshennyh-temperatura-vozduha> (дата обращения: 26.06.2023).

14. Системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинные установки / Наши Ш., Акул Х. // *Турбины и дизели / март-апрель 2011*, www.turbine-diesel.ru.

15. Влияние степени повышения давления на эффективность ГТУ и ПГУ / А. И. Смирнов, Богатова Т. Ф. // *Конференция молодых ученых – 2017. УралЭНИН, ФГАОУ ВО «УрФУ»*. С. 51-54.

Новости



Bergen Engines поставит энергоблоки в Пуэрто-Рико.

Группа SAMPLE строит две ГПУ-ТЭС для энергоснабжения своих предприятий. На каждой станции будет установлено 4 энергоблока В36:45L мощностью по 3,3 МВт. Кроме них, в состав ТЭС войдут солнечные батареи и системы сохранения энергии. Таким образом, на каждом предприятии будет создана собственная энергосеть.

Утилизируемая тепловая энергия двигателей будет использоваться для получения горячей воды или пара на технологические нужды промышленных предприятий, а также для кондиционирования производственных и офисных помещений.



Выполнена главная инспекция газотурбинной установки на ТЭЦ-27 Мосэнерго.

Специалисты «ГЭХ Сервис газовых турбин» провели инспекцию оборудования газотурбинной установки ГТЭ-160, работающей в составе энергоблока № 4 ПГУ-450 на ТЭЦ-27 ПАО «Мосэнерго».

В рамках главной инспекции для обеспечения продления ресурса были выполнены плановые работы по осмотру, дефектации, устранению выявленных недостатков, а также по замене компонентов основного и вспомогательного оборудования газотурбинной установки.

После завершения мероприятий была осуществлена виброналадка, проверка и настройка работы оборудования на топливном газе и дизельном топливе. По результатам выполненных работ ГТУ допущена к эксплуатации во всем диапазоне электрических нагрузок, а ресурс эксплуатации компонентов установки продлен на 123 000 эквивалентных часов эксплуатации.

Невский завод изготовит компрессоры для газопровода «Сила Сибири».

АО «РЭПХ» подписало договор с ООО «Газпром комплектация» на поставку четырех центробежных компрессоров для магистрального газопровода «Сила Сибири». Предприятие изготовит четыре ЦБК405-1,35/101-5300/16С производительностью по 20000 м³/ч, которые будут эксплуатироваться в составе газоперекачивающих агрегатов мощностью 25 МВт.

Приводом для компрессоров будут газотурбинные установки ПС-90ГП-2 производства АО «ОДК-Пермские моторы» (разработка АО «ОДК-Авиадвигатель»).

Особенностью конструкции СПЧ данных компрессоров является наличие системы сухих газодинамических уплотнений. Благодаря этому техническому решению исключается попадание масла из подшипников в сжимаемый газ, что в свою очередь позволяет повысить надежность и эффективность работы агрегатов, а также снизить эксплуатационные расходы. Компрессорное оборудование будет изготовлено на Невском заводе и отгружено в адрес заказчика в конце текущего года.

По магистральному газопроводу «Сила Сибири» («восточный» маршрут) транспортируется газ с Ковыктинского месторождения в Иркутской области и Чаяндинского в Якутии потребителям на Дальнем Востоке и в Китай.

Для оренбургского предприятия «Пластик» поставлена ГПЭС.

Компания «ЭнергоТехСервис» ввела в промышленную эксплуатацию ПГУ-ТЭС контейнерного исполнения для завода «Пластик» – производителя полимерных труб и фитингов под торговой маркой РВК. Станция ЭТС-11330 электрической мощностью 1063 кВт, тепловой – 641 кВт на 70 % обеспечивает энергией производственные мощности предприятия.

Энергоблок снабжен системой утилизации тепла рубашки охлаждения двигателя. Тепловая энергия, снимаемая с высокотемпературного контура охлаждения двигателя, используется для теплоснабжения административно-бытовых помещений завода.

ГПЭС работает в параллель с сетью. Управление импортом/экспортом мощности осуществляет шкаф автоматики производства ООО «ЭнергоТехСервис», созданный на базе российских компонентов. Это новая разработка компании, которая должна заменить штатные электронные компоненты системы управления двигателем иностранных производителей. Шкаф автоматики собственного производства впервые применен в данном проекте.

Комплексное опробование электростанции завершено в апреле. В ходе пусконаладочных работ компания «ЭнергоТехСервис» провела обучение технического персонала заказчика по основам эксплуатации и техническому обслуживанию оборудования. В настоящий момент эксплуатацию ГПЭС осуществляет служба главного энергетика завода «Пластик».

Gas engine power plant was supplied to Plastic enterprise in Orenburg.

EnergoTechService company has put into commercial operation container power plant for the Plastic enterprise, manufacturer of polymer pipes and fittings. ETS-11330 power plant with an electric capacity of 1063 kW and thermal output of 641 kW provides 70 % of the energy demands of the enterprise.





Повышение эффективности работы КВООУ газовых турбин

- Проектирование
- Инжиниринг
- Сервис



РЕКЛАМА



ООО «EMW фильтртехник рус»
Россия, 117105, Москва,
Новоданиловская набережная, д. 6, стр. 1, оф. 6
info@emw.su; info@emw-filter.ru
тел./факс (495) 783-87-98

Онлайн-мониторинг турбинных масел: как это работает

Л. Е. Капралова – журнал «Турбины и Дизели»

На фоне усложнения цепочек поставок комплектующих и ухода с российского рынка ведущих зарубежных сервисных компаний вопросы качественного обслуживания оборудования и увеличения ресурса его эксплуатации приобретают новую степень важности. В числе крупных отечественных игроков, способных предложить промышленным потребителям качественную экспертизу в этой области, – ЛУКОЙЛ. Дебют одной из перспективных сервисных разработок компании состоялся на стратегически важном предприятии энергетики.

In brief

Online monitoring of turbine oils: how it works.

LUKOIL is not only the largest producer of lubes and greases in Russia, but also a key player in forming the market for service solutions in this area. Having deep expertise, the company offers enterprises comprehensive technical solutions that increase the reliability of the operating equipment.

Among such solutions is an online monitoring system for the condition of lubricants. It can be used for a wide variety of equipment.

В режиме реального времени

Компания «ЛУКОЙЛ» – не только крупнейший производитель масел и смазочных материалов в России, но и ключевой игрок, формирующий рынок сервисных решений в данной области. Обладая глубокой экспертизой, компания предлагает предприятиям комплексные технические решения, которые повышают надежность работы эксплуатируемого оборудования.

В числе таких решений – система онлайн-мониторинга состояния смазочных материалов. Она может применяться для самой разнообразной техники. Актуальна данная система и для сферы энергетики. Первым предприятием, где в тестовом режиме уже внедрен цифровой мониторинг масла, стала Конаковская ГРЭС* (ПАО «ЭЛ5-Энерго») – один из крупнейших производителей электроэнергии и тепла в Центральной России. В мае этого года к системе онлайн-диагностики

подключен один из турбоагрегатов ГРЭС. В течение нескольких месяцев партнеры рассчитывают расширить действие сервиса на всё генерирующее оборудование станции.

Ранее мы уже знакомили читателей журнала с аналогичными цифровыми сервисами контроля состояния топлива. Диагностика смазочных материалов – это новая перспективная тема. В сравнении с классическими методами контроля качества масел в ходе эксплуатации она имеет ряд весомых преимуществ.

Традиционно на предприятиях берут пробы смазочных материалов через определенные интервалы и анализируют их в собственных или сторонних специализированных лабораториях. Вместе с тем, машины или оборудование могут работать на значительном удалении от таких лабораторий, и своевременное получение ценной аналитики в таких случаях проблематично. Речь идет о данных, которые помогают определить остаточный ресурс масла: наличие загрязнений, критические изменения вязкости и другие важные параметры. И чем быстрее происходит правильная обработка такой информации, тем меньше риски внеплановых ремонтов, тем надежнее будет работать дорогостоящее оборудование.

Современные технологии на базе Интернета вещей (IoT) делают мониторинг работы технических жидкостей более эффективным. Принцип работы системы онлайн-мониторинга заключается в постоянном контроле основных физико-химических показателей масла с помощью датчиков, встроенных в масляную магистраль. Информация, считываемая датчиками, через GSM-модем передается на серверы компании «ЛУКОЙЛ» и круглосуточно доступна в личном кабинете предприятия на специальном портале для клиентов.



На экране мобильного устройства или компьютера пользователя, подключенного к системе, наглядно отображаются текущие и архивные данные о состоянии масла и оборудования. Система своевременно дает инженерным службам «подсказки» для точного понимания процессов, происходящих со смазочными материалами. Например, значительное изменение вязкости, резкое падение щелочного числа, высокое содержание продуктов окисления, воды и механических примесей может указывать на необходимость скорейшей замены, доливки или дополнительной фильтрации масла.

В зависимости от вида машин и типа масел, а также задач, которые решает заказчик, мониторинг можно проводить с помощью различных комбинаций датчиков. Так, на Конаковской ГРЭС используются датчики свойств жидкости – они определяют плотность, вязкость, температуру, содержание влаги и диэлектрическую проницаемость, и детекторы частиц, анализирующие класс чистоты и уровень механических примесей.

Всё для клиента

Около 60 % предприятий, как показывают опросы, объективно нуждаются в экспертизе поставщиков смазочных материалов для улучшения процессов обслуживания оборудования.

Разработка компанией «ЛУКОЙЛ» комплексных решений, способных учесть все возможности для повышения эффективности парка техники партнерских предприятий, – ответ на этот тренд. Отметим, что российский производитель масел – отнюдь не новичок в этой области. Компания вышла на рынок сервисных решений более 10 лет назад и с тех пор поступательно расширяет сервисные опции.

В основе концепции всех сервисных проектов компании – нацеленность на решение проблем предприятий-партнеров, снижение их затрат на управление запасами смазочных материалов, бесперебойность поставок и удобный доступ к информации.

Российский производитель масел внедряет на промышленных предприятиях широкий спектр сервисных решений: от применения специализированного оборудования (например, мобильных и стационарных систем маслораздачи, систем фильтрации, водоотделения или подогрева масла) до комплексного сопровождения, включающего полную организацию логистики смазочных материалов и техобслуживание оборудования. В сочетании с качеством современных масел и смазок компании «ЛУКОЙЛ» эти решения позволяют поднять эффективность работы техники и оборудования на принципиально новый уровень. **Т**

**Конаковская ГРЭС, расположенная на берегу Иваньковского водохранилища в городе Конаково Тверской области, – один из крупнейших производителей электроэнергии и тепла в Центральной России.*

Установленная электрическая мощность ГРЭС – 2520 МВт, тепловая – 120 Гкал/ч.

На станции работают 8 энергоблоков мощностью от 300 до 325 МВт.

ГРЭС входит в состав энергогенерирующей компании «ЭЛ5-Энерго», чьим мажоритарным акционером является ПАО «ЛУКОЙЛ».



Прочностное исследование рабочей лопатки с диском ступени «В» осевого компрессора ГТН-16

методом конечных элементов
в САЕ-системе Fidesys

В. Л. Блинов*, к.т.н. – *v.l.blinov@urfu.ru*

О. В. Комаров*, к.т.н. – заведующий кафедрой «Турбины и двигатели», *o.v.komarov@urfu.ru*

Д. О. Заклепкин* – бакалавр, *d.zaklepin@mail.ru*

С. В. Богданец* – аспирант, *bogdanec1996@rambler.ru*

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ключевые слова:

диск,
Ansys,
статический расчет,
модальный анализ,
диаграмма
Кэмпбелла,
частота собственных
колебаний

Аннотация

В работе описаны нагрузки, действующие на рабочие лопатки двигателя, а также приведены методы, используемые для оценки прочности рабочего колеса. Представлен анализ результатов статического и модального расчетов рабочей лопатки с диском осевого компрессора газотурбинной установки ГТН-16 в отечественной САЕ-системе Fidesys методом конечных элементов.

Также выполнена проверка данных расчетов с помощью программного комплекса Ansys, как наиболее распространенной в мире системы для численного моделирования физических процессов.

Получены картины напряженно-деформированного состояния лопатки с диском. Выявлены зоны концентрации напряжений в модели и определены коэффициенты запаса прочности лопатки и диска. Найдены шесть первых частот собственных колебаний конструкции и построена диаграмма Кэмпбелла.

Изложены варианты повышения виброндежности конструкции рассматриваемого осевого компрессора. Проведен сравнительный анализ результатов конечно-элементного моделирования в программных комплексах Fidesys и Ansys.

Strength investigation of stage B rotor blade of GTN-16 axial compressor

by Finite Element Method in Fidesys CAE system

V. L. Blinov*, Cand. of Tech. Sciences – associate professor, *v.l.blinov@urfu.ru*

O. V. Komarov*, Cand. of Tech. Sciences – Head of the Department of Turbines and Engines, *o.v.komarov@urfu.ru*

D. O. Zaklepin* – Bachelor, *d.zaklepin@mail.ru*

S. V. Bogdanec* – Postgraduate, *bogdanec1996@rambler.ru*

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Key words:

disk,
Ansys,
static calculation,
modal analysis,
Campbell diagram,
natural frequency

Abstract

The paper describes the loads acting on the rotor blades during engine operation, as well as the methods used to assess the strength of the impeller. An analysis of the results of static and modal calculations of a working blade with a disk of an axial compressor of a GTN-16 gas turbine plant in the domestic Fidesys CAE system by the finite element method is presented.

Also, the calculation data were verified using the Ansys software package, as the most common system in the world for the numerical simulation of physical processes. Pictures of the stress-strain

state of the blade with the disk are obtained. The zones of stress concentration in the model are identified and the safety factors of the blade and disk are determined. The six first frequencies of natural oscillations of the structure are found and the Campbell diagram is constructed.

Possible options for improving the vibration reliability of the design of the considered axial compressor are outlined. A comparative analysis of the results of finite element modeling in the Fidesys and Ansys software systems was carried out.

Введение

Актуальность исследования обусловлена наличием проблем с рабочей лопаткой ступени «В» осевого компрессора газотурбинной установки типа ГТН-16. В эксплуатации неоднократно возникали аварийные ситуации, заключающиеся в разрушении лопатки и последующем ее отрыве. Подобные случаи возникают вследствие превышения напряжений в опасных сечениях предела прочности или недостаточной вибронадежности конструкции [10].

Рабочие лопатки являются весьма ответственными деталями газотурбинного двигателя, от надежной работы которых зависит надежность работы двигателя в целом [1]. Одним из ключевых параметров, который учитывается при проектировании и изготовлении лопаток, является их прочность. Рабочая лопатка должна выдерживать большие нагрузки, возникающие в процессе работы и не разрушаться под их воздействием. По источникам силовых воздействий на лопатки различают газодинамические силы (ГДС) и инерционные (ЦБС). И ГДС, и ЦБС считаются статическими силами. Напряжения растяжения, изгиба и кручения от ЦБС определяют статическую прочность лопаток, составляя до 80 % суммарной нагрузки [2].

Также при работе ГТУ рабочие лопатки испытывают вибрации, т. е. совершают механические колебания, которые считают одной из главных причин их поломок. Таким образом, в процессе работы на лопатки действуют статические и динамические нагрузки, вызывающие сложную картину напряжений.

Для оценки прочности лопаток используются два типа анализов – статический и динамический. Статический анализ предназначен для определения перемещений и напряжений, возникающих в лопатке при воздействии приложенных нагрузок. Динамический анализ прочности включает в себя изучение поведения объекта в условиях динамических нагрузок, таких как удары, вибрации, колебания и т. д. По результатам анализа определяются динамические характеристики лопатки, такие как собственные частоты и формы колебаний, а также строится вибрационная диаграмма Кэмпбелла. Она представляет собой график, на котором отображается зависимость собственных частот колебаний лопаток и частот возбуждающих гармоник от частоты вращения ротора [1]. Диаграмма используется для оценки динамической прочности объекта и определения опасных режимов работы двигателя, на которых возникают резонансные колебания [3]. Для моделирования поведения лопаток при

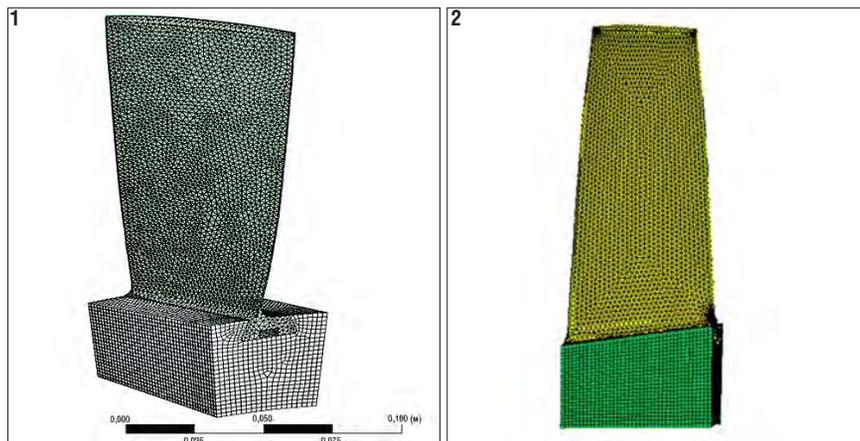


Рис. 1.
Разбиение модели на конечно-элементную сетку в ПО Ansys

Рис. 2.
Разбиение модели на конечно-элементную сетку в ПО Fidesys

различных условиях нагрузки используется метод конечных элементов (Finite Element Method) в САЕ-системах [11].

В настоящее время имеется потребность в отечественном инженерном программном обеспечении (ПО), что обусловлено уходом с российского рынка зарубежных компаний. Один из примеров подобного ПО – пакет САЕ Fidesys [4], который был разработан специалистами МГУ им. М.В. Ломоносова.

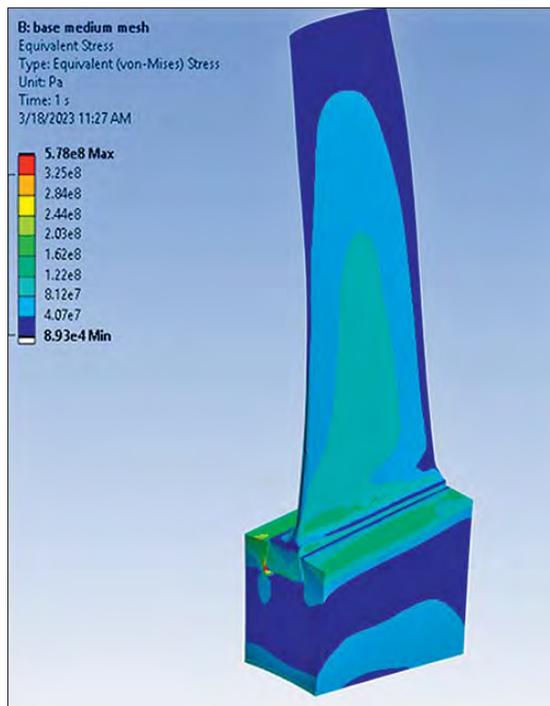
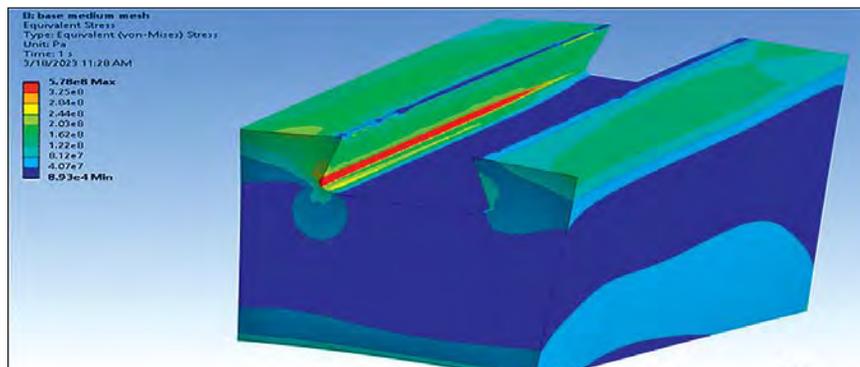


Рис. 3.
НДС лопатки с диском в Ansys, Па

Рис. 4.
НДС диска в Ansys, Па



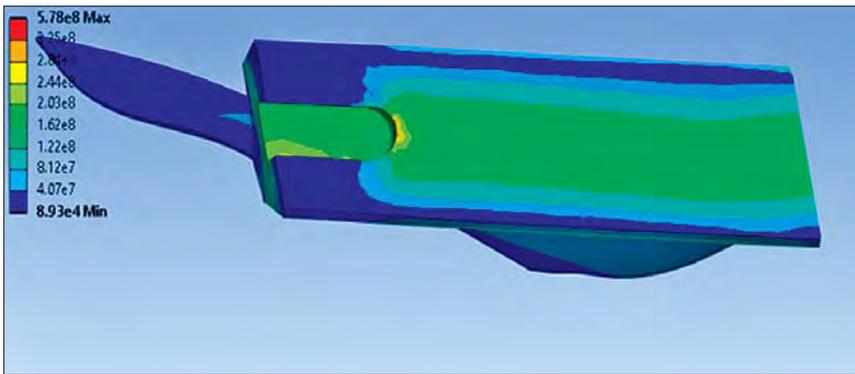


Рис. 5.
НДС лопатки в Ansys, Па

Продукт предназначен для решения задач в области инженерных расчетов и моделирования. Система позволяет проектировать и анализировать различные конструкции, определять их прочность, устойчивость, деформации и другие характеристики. Среди конкурентов Fidesys можно выделить такие продукты, как Ansys, Abaqus, Solid Works Simulation, COMSOL Multiphysics и другие.

Цель настоящего исследования заключается в сравнении результатов статического и динамического расчетов рабочей лопатки с диском

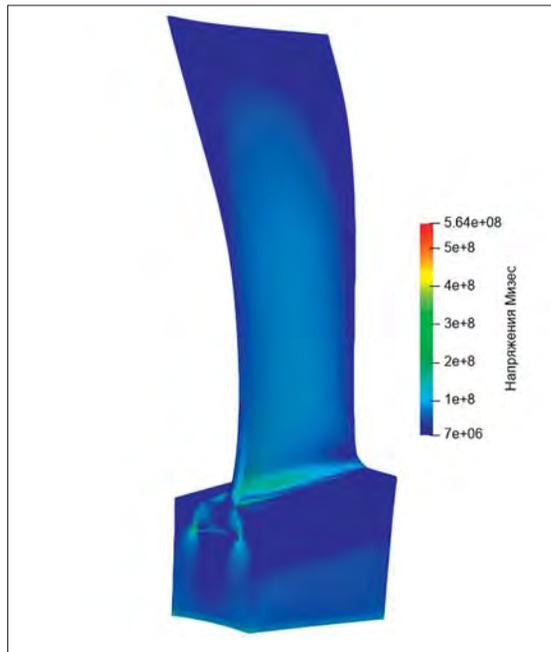
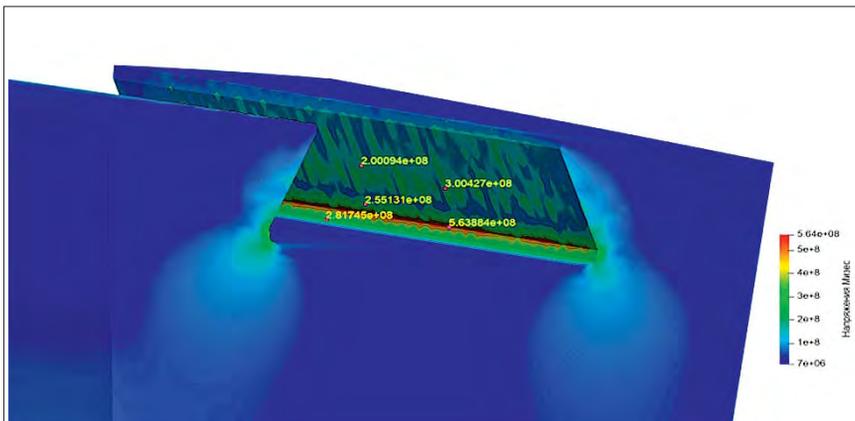


Рис. 6.
НДС лопатки с диском
в Fidesys, Па

Рис. 7.
НДС диска в Fidesys, Па



ступени «В» осевого компрессора ГТН-16, полученных в системах для прочностного анализа Ansys Mechanical и Fidesys.

Материалы и методы

3D-модель, построенная в приложении Ansys Space Claim, импортировалась в формате .stp поочередно в Ansys Workbench и Fidesys. Далее геометрия подверглась разбиению на конечно-элементную сетку. Сетка сформирована с учетом обеспечения необходимой точности как статического, так и модального анализа [5]. На поверхностях контакта реализовано сгущение сетки для получения более качественной картины напряжений в данных областях. Результаты построения сетки в Ansys представлены на *рис. 1*, в Fidesys – на *рис. 2*.

Сетка имеет следующие характеристики:

- тип: тетраэдральная на лопатке и гексаэдральная на диске;
- элементы второго порядка – по одному узлу на каждом ребре;
- 183 000 и 198 000 узлов в Ansys и Fidesys соответственно;
- базовый размер $2 \dots 10^{-3}$ м, размер на контактах $1,25 \dots 10^{-3}$ м;

Для расчета были заданы следующие граничные условия:

- угловая скорость 722,566 рад/с (6900 об/мин);
- ограничение перемещений вдоль оси вращения в пазе под упорный штифт;
- жесткая заделка по внутренней поверхности сектора диска;
- контакт между поверхностями хвостовика и пазом диска.

Механические характеристики материалов лопатки и диска, использовавшиеся в расчете, сведены в *табл. 1*.

Результаты

На первом этапе расчета решалась задача статического деформирования лопатки с диском в поле действия центробежных сил инерции. Получены картины напряженно-деформированного состояния (НДС) в Ansys (*рис. 3–5*) и Fidesys (*рис. 6–8*).

По результатам анализа картин НДС модели можно выделить несколько зон концентрации напряжений.

Максимальные суммарные напряжения по Мизесу (578 и 564 МПа для Ansys и Fidesys соответственно) зафиксированы в галтелях между горизонтальной поверхностью паза диска и боковыми стенками (*рис. 4 и 7*). Галтели являются конструктивным концентратором напряжений, так как имеют скругления малого радиуса, в которых возникают повы-

шенные напряжения [6]. Контактные поверхности паза диска также испытывают значительные напряжения – 250...300 МПа из-за граничных условий в виде контакта между лопаткой и диском.

Переход от пера лопатки к хвостовику осуществлен в виде галтели, напряжения по Мизесу в этой области составляют 150...320 МПа. Максимум достигается в зоне возле контактной поверхности хвостовика.

В углах паза, предназначенного для фиксации штифтом лопатки от осевых перемещений в диске (рис. 5 и 8), ввиду наличия скруглений малого радиуса также фиксируются напряжения в диапазоне 200...220 МПа.

По результатам статического расчета определены коэффициенты запаса прочности по пределам текучести [7]. Для лопатки запас прочности составил 2,46 (Ansys) и 2,19 (Fidesys), для диска – 1,38 (Ansys) и 1,42 (Fidesys). Полученные коэффициенты запаса прочности превышают минимально допустимые. Следовательно, материалы лопатки и диска удовлетворяют условию прочности и надежности.

Вторым этапом расчета стал модальный анализ, в ходе которого были определены шесть первых динамических частот собственных колебаний (ЧСК) лопатки с диском (табл. 2).

Максимальные относительные погрешности составили 19,4 % по четвертой форме колебаний и 13,3 % по первой. Причина расхождения заключается в вынужденном несоответствии граничных условий, а именно, в виде контакта. При выборе контакта необходимо учитывать способ посадки хвостовика лопатки в паз диска: с натягом или с зазором.

Согласно чертежам завода-изготовителя, при облопачивании ступени «В» реализуется посадка с зазором, что было учтено при постановке задачи в Ansys. На момент написания работы функция «Общий контакт с трением» была не реализована в Fidesys, в связи с чем задан «Связанный контакт», при котором не допускаются взаимные перемещения контактных поверхностей лопатки и диска, то есть имитируется посадка с натягом.

На рис. 9 изображена совместная диаграмма Кэмпбелла по результатам, полученным в Ansys и Fidesys. Вибрационная диаграмма демонстрирует условия возникновения резонанса. Рабочий диапазон, в пределах которого исследуется проблема появления резонансных колебаний, составляет 80...120 Гц.

На диаграмме нанесены лучи, исходящие из начала координат, обозначенные номерами гармоник возмущающих усилий или кратностями колебаний. Возбуждающей силой в дан-

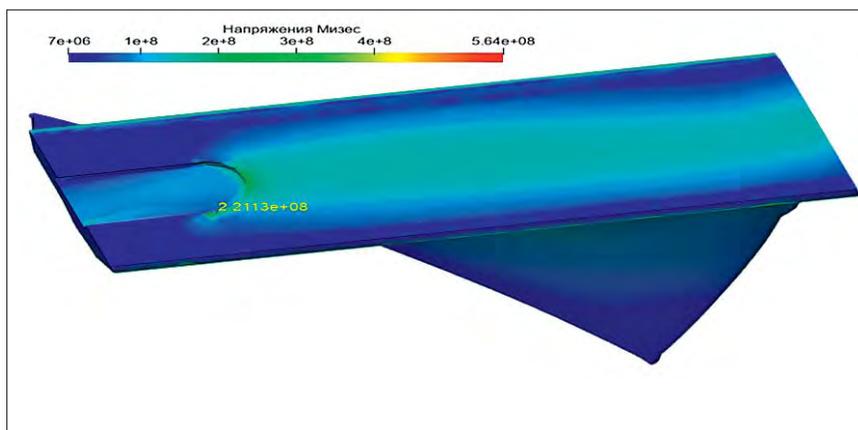


Рис. 8.
НДС лопатки в Fidesys, Па

ном случае являются крошечные следы за направляющим аппаратом (НА) ступени «Б», которые существенно влияют на равномерность потока на входе в рабочее колесо, а также стойки переднего упорно-опорного подшипника ГТУ. Число НА во входном направляющем аппарате и в ступенях «Б» и «В» – 34, а число стоек – 4 [8].

Точки, в которых $f_{di}=kp$ (точки пересечения лучей с линиями f_{di}), соответствуют резонансным частотам вращения ротора [1]. Из диаграммы следует, что 34-я гармоника пересекается с 5-й и 6-й формой собственных колебаний, а 4-я гармоника с 1-й формой.

Амплитуды возмущающих сил имеют тем меньшие значения, чем выше их кратность [9]. Следовательно, наиболее опасными являются пересечения частот возбуждающих сил с ЧСК первых форм.

На диаграмму дополнительно нанесен возбуждающий фактор в виде шести стоек переднего опорно-упорного подшипника. При таком количестве стоек можно избежать резонансных колебаний по первой форме.

Рис. 9.
Совместная диаграмма Кэмпбелла

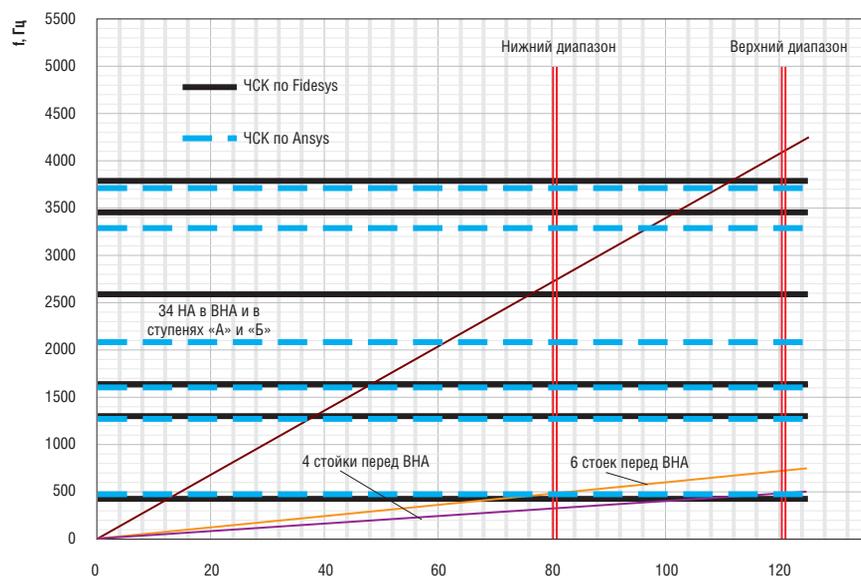


Табл. 1.
Материалы и их
механические характеристики

Деталь, материал	Механические характеристики		
	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль упругости E, 10 ¹¹ Па	Коэффициент Пуассона μ
Лопатка, титановый сплав BT-5	4400	1,05	0,3
Диск, сталь 30ХНЗМ2ФА	7800	2,10	

Табл. 2.
ЧСК по результатам
модального анализа

№ формы	Ansys	Fidesys	Относительная погрешность, %
fд1	469,3	413,9	13,3
fд2	1276,9	1304,5	2,1
fд3	1609,1	1622,9	0,8
fд4	2083,8	2587,4	19,4
fд5	3287,7	3451,5	4,8
fд6	3721,0	3791,8	1,9

Выводы

Получены картины НДС в Ansys и Fidesys – схожи места концентрации напряжений, а также их величины. Наиболее нагруженными местами оказались контактные поверхности лопатки и диска, паз под упорный штифт в хвостовике, галтель между пером лопатки и замком.

По результатам модального анализа как в Ansys, так и в Fidesys на диаграмме Кэмпбелла имеются пересечения 4-й гармоники с первой формой колебаний, 34-й гармоники с 5-й и 6-й формами. Наиболее опасными являются пересечения частот возбуждающих сил с ЧСК первых форм. Для снижения динамических напряжений применяется ряд мер: изменение конструктивно-силовой схемы конструкции; соблюдение технологии изготовления; применение материалов с другими жесткостными характеристиками; изменение геометрических размеров детали.

Из вышеприведенного следует заключение: САЕ-система Fidesys является современным и конкурентоспособным продуктом, который может сделать отечественный рынок прочностных расчетов независимым от западных производителей. **Д**

Список литературы

1. Ревзин Б. С., Ларионов И. Д. Газотурбинные установки с нагнетателями для транспорта газа: справочное пособие. Москва: Недра, 1991. – 303 с.
2. Ревзин Б. С., Комаров О. В. Энергетические газотурбинные установки стационарного типа: учеб. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 284 с.

3. Галимханов Б. К. ANSYS. Основы расчета на колебания элементов АД и ЭУ: Методические указания к дипломному проектированию, практическим занятиям и курсовому проектированию по дисциплине «Конструкция и прочность АД и ЭУ». Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2008. – 29 с.

4. САЕ-система Fidesys [сайт]. URL: <https://cae-fidesys.com/>.

5. Пузанова А. В., Богданец С. В. Разработка рекомендаций по проведению численного газодинамического расчета центробежного компрессора / Актуальные проблемы развития технических наук: сборник статей участников XXII Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». Екатеринбург: УрФУ, 2020. С. 40-45.

6. Нусс А. С., Седунин В. А. Анализ прочностных и вибрационных характеристик первой рабочей лопатки осевого компрессора с пазом ротора // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 137-140. URL: <http://hdl.handle.net/10995/40563>. Заголовок страницы из Интернета [Электронный ресурс]. URL: <http://es.bstu.ru>.

7. Зубченко А. С., Колосков М. М., Каширский Ю. В. и др. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

8. Комаров О. В., Седунин В. А., Блинов В. Л., Ращепкин А. А. Расчетное исследование влияния аэроупругости на прочностные характеристики рабочей лопатки осевого компрессора приводной ГТУ // Тяжелое машиностроение. 2013, № 10. С. 24-27.

9. Недошивина Т. А., Кистойчев А. В. Вибрационная надежность энергетических установок: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2021. – 204 с.

10. Khawaja H. A., Khan A. M. Modal and Harmonic analysis of L.P. Turbine of a small Turbo-Fan Engine using Finite Element Method. College of Aeronautical Engineering. University of Engineering and Technology, Taxila, Pakistan. 2007.

11. Fluid-Structure Interaction of a Radial Turbine / Zied Driss, Sarhan Karray, Hedi Kchaou et al. University of Sfax (US) // Applied Computational Fluid Dynamics. 2012. Vol. 344. P. 201–222.

Компания INNIO модернизирует двигатели модельного ряда mobileFLEX.

INNIO Waukesha объявила, что двигатели модельного ряда mobileFLEX теперь оснащаются усовершенствованными системами управления ESM2 и модернизированными поршнями для снижения выбросов. Это позволяет также сократить эксплуатационные расходы при использовании в составе нефтепромыслового оборудования и буровых установок.

Газопоршневые двигатели и генераторные установки mobileFLEX, сертифицированные EPA-mobile, являются альтернативой дизельным установкам и могут работать на различных видах газообразного топлива без снижения эксплуатационных параметров.

Двигатели серии mobileFLEX работают в различных условиях эксплуатации, на различной высоте над уровнем моря и при различных температурах окружающего воздуха. Они выдерживают наброс нагрузки до 65 % и 100 %-й сброс нагрузки.

Система управления ESM2 на базе контроллеров AFR2 обеспечивает визуальный контроль всех основных параметров двигателя и динамику их изменения, а также просмотр руководства по эксплуатации и техническому обслуживанию. Возможность анализа данных расширяет для персонала станции функции управления и контроля, оптимизирует работу двигателей.

На шести двигателях были проведены длительные двухэтапные испытания в полевых условиях продолжительностью 8 000 часов. Проведены исследования для выявления уровня расхода масла и износа компонентов для подтверждения заявленных характеристик поршней и головок цилиндров.

По оценкам специалистов, переход эксплуатирующих организаций с дизельных двигателей на mobileFLEX позволит сократить уровень выбросов оксидов азота и твердых частиц более чем на 99 %, монооксида углерода – на 34 %, а диоксида углерода – на 7 %.



В ООО «ЦРМЗ» освоено изготовление метизной продукции по новой технологии.

Центральный ремонтно-механический завод поставил первую партию метизной продукции по заказу компании «ГЭХ Сервис газовых турбин» в рамках программы импортозамещения. Событию предшествовала масштабная работа, в ходе которой специалисты опытно-конструкторского бюро, котельно-механического цеха и других подразделений предприятия разработали и внедрили новую технологию изготовления метизной продукции, требования к которой были определены в соответствии с мировыми стандартами. Продукция будет применяться в составе оборудования, при ремонте и обслуживании газовых турбин.

Цикл механической обработки заготовки на новых станках, приобретенных в рамках программы обновления станочного парка ООО «ЦРМЗ», составляет от 2 до 9 минут, в зависимости от типоразмера. После окончания цикла деталь обрабатывается слесарем механосборочных работ, маркируется и проходит консервацию согласно технологическим требованиям конструкторской документации.

Результатами внедрения новых технологий стала успешная отработка технологических процессов и локализация производства метизной продукции, ранее поставляемой из-за рубежа. По итогам входного контроля она получила высокую оценку и подтвердила соответствие мировым стандартам качества.



**ИННОВАЦИИ В БЕЗУПРЕЧНОМ
ИНЖИНИРИНГЕ**

www.apuc.ru
+7 (342) 214-00-00
office@apuc.ru

АДРЕСНЫЕ ИЗВЕЩАТЕЛИ ПЛАМЕНИ "TAURUS"

Адресные извещатели пламени предназначены для обнаружения возгораний внутри помещений и на открытом пространстве, передачи сигнала извещения о пожаре в системы пожарной автоматики.

Область применения адресных извещателей "TAURUS"

- Объекты нефтегазовой отрасли и их инфраструктуры
- Шельфовые морские платформы нефте- и газодобычи
- Взрыво- и пожароопасные объекты

Свойства адресных извещателей "TAURUS"

- Функция контроля запыленности оптики
- Функция самодиагностики
- Устойчивость к воздействию электромагнитных и радиочастотных помех
- Высокая механическая прочность и устойчивость к агрессивным средам
- Широкий температурный диапазон эксплуатации от -60...+125 °C
- Встроенное устройство обогрева оптики
- Защита от воздействий окружающей среды
- Блокировка выходного сигнала тревоги при проведении проверки
- Встроенный изолятор короткого замыкания с исполнением ТА
- Встроенный HART протокол для возможности удаленной настройки

г. Пермь, ул. А. Гайдара, д. 8 "Б", оф. 505

Верификация программной методики расчета на прочность дисков осевых компрессоров

А. В. Махонин – инженер, Высшая школа энергетического машиностроения, Институт энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ, sir.mahonin@gmail.com

Е. Ю. Романчук – лаборант, Высшая школа энергетического машиностроения, Институт энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ, elizabetharomanchuk@yandex.ru

Ключевые слова:

осевой компрессор, диск, расчет на прочность программная методика

Аннотация

Цель данной работы – создание программы, основанной на методах классической теории прочности, и сравнение полученных результатов с результатами численного расчета в программном пакете Ansys. В ходе исследования выполнены цифровые испытания на прочность диска осевого компрессора на разных оборотах и получены графики распределения напряжений по радиусу расчетной области.

Основные методики расчета основаны на эмпирических методах. Они включают в себя долгий анализ исследуемой системы, подготовку расчетных схем, ведение последовательного расчета по формулам и последующую обработку полученных результатов. Для автоматизации

данного процесса, упрощения получения входных и выходных параметров активно применялись языки программирования. С их помощью можно полностью автоматизировать процесс проведения расчета, от исследователя требуется только задание необходимых начальных условий.

В ходе работы был выполнен расчет напряжений в специальном программном обеспечении, написанном на языке программирования Python. Путем наложения значений точек в контрольных сечениях, рассчитанных по программе, на график распределения напряжений по радиусу была произведена верификация модели.

Verification of the software methodology for calculating the strength of axial compressor discs

A. V. Makhonin – Engineer, Higher School of Power Engineering, Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, sir.mahonin@gmail.com

E. Yu. Romanchuk – Laboratory Assistant, Higher School of Power Engineering, Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University elizabetharomanchuk@yandex.ru

Key words:

axial compressor, disk, strength calculation, software methodology

Abstract

The purpose of this work was to create a program based on the methods of classical strength theory and compare the results obtained with the results of numerical calculation in the Ansys software package. In the course of the study, digital tests were performed on the strength of the axial compressor disk at different revolutions and stress distribution graphs were obtained along the radius of the design area.

The main calculation methods are based on empirical methods. They include a long analysis of the system under study, preparation of calculation schemes, conducting sequential calculations according to formulas and subsequent pro-

cessing of the results obtained. To automate this process, simplify obtaining input and output parameters, the use of programming languages has become widely used. With the help of programming languages, it is possible to fully automate the calculation process, the researcher is only required to set the necessary initial conditions.

In the course of the work, the stress calculation was performed in a special software written in the Python programming language. By superimposing the values of the points in the control sections calculated according to the program on the stress distribution graph along the radius, the model was verified.

Введение

Современные тенденции развития осевых компрессоров ведут к увеличению отношения давлений в ступенях и повышению окружных скоростей. В компрессоре действуют две силы – центробежная и газодинамическая. При увеличении давления и частоты вращения вала увеличиваются и эти силы. Постоянно увеличивающиеся объемные и поверхностные силы создают напряжения в дисках и лопатках осевых компрессоров.

При вращении ротора осевых компрессоров в дисках образуются радиальные и окружные напряжения, сильно изменяющиеся по высоте. Массы лопаток создают растягивающие напряжения на периферийной поверхности диска. В расчетной модели диска воздействие лопаток заменяется равномерно распределенной нагрузкой (интенсивность радиальной нагрузки). Такое предположение соответствует принципу Сен-Венана, когда действительная нагрузка заменяется главным вектором внешних сил [1].

Также на диск осевого компрессора действует напряжение в месте посадки его на вал, так называемое напряжение натяга. Часто оно варьируется от 5 до 15 МПа [2]. Выбор величины натяга при посадке диска на вал зависит от результатов расчета освобождающего числа оборотов при заданной частоте вращения, при которых контактное давление равно нулю.

Ротор турбокомпрессора состоит из вала с закрепленными на нем дисковыми элементами, которые могут иметь форму пластин или оболочек. Это рабочие колеса, дистанционные втулки, думмис и другие конструктивные элементы. Дисковые элементы ротора турбомашин представляют собой пластины разнообразной формы.

При моделировании сложный диск предварительно разбивается на участки простейших форм (рис. 1). При переходе от одного участка к другому толщина диска может внезапно меняться, а окружное и радиальное напряжения претерпевают разрыв.

Расчет производится для каждого участка поочередно. Вычисляются коэффициенты, характерные для 1-, 2- и 3-го участков (или большего количества, в зависимости от формы диска). На границах участков необходимо произвести пересчет окружных и радиальных напряжений по формулам (1) и (2).

$$\sigma_r^{\text{II}} = \sigma_r^{\text{I}} \cdot \frac{b_1}{b_2} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta^{\text{II}} = \sigma_\theta^{\text{I}} - \nu \cdot \sigma_r^{\text{I}} \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right), \quad (2)$$

где ν – коэффициент Пуассона (коэффициент поперечного сокращения), для стали $\nu=0,3$.

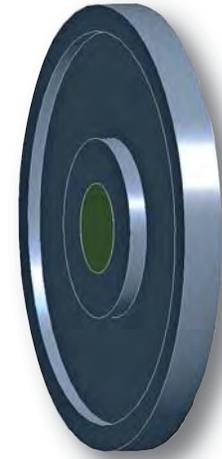
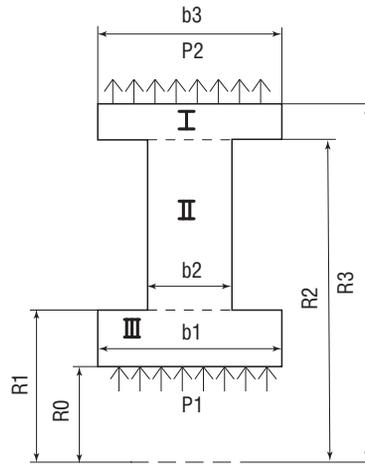


Рис. 1. Схематизация расчетной области диска осевого компрессора

Рис. 2. Модель диска осевого компрессора

На сегодня существует множество методов расчета на прочность с помощью CAE программ, таких как Ansys Mechanical, APM Struct, Solid Works, позволяющих в полной мере оценить распределение напряжений в контрольных сечениях. Однако, несмотря на появление численных методов расчета, на многих промышленных предприятиях и в высших учебных заведениях продолжают использовать эмпирические методы расчета.

Рис. 3.

График сеточной сходимости:

- ▲ – максимальные радиальные напряжения σ_r ;
- – максимальные окружные напряжения σ_θ

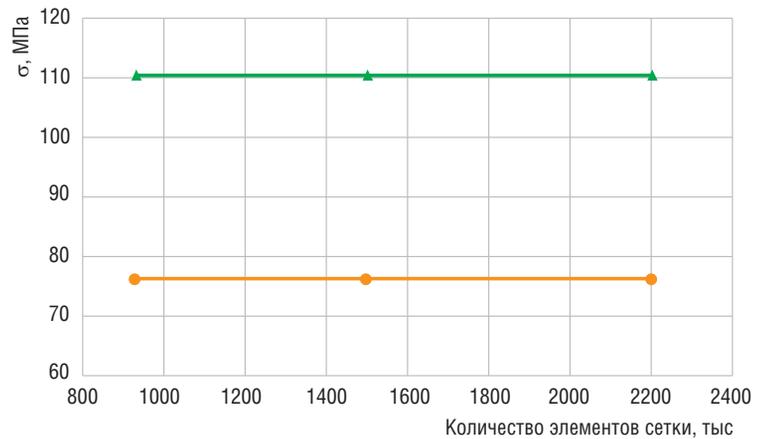


Рис. 4.

Распределение радиальных напряжений σ_r по высоте диска

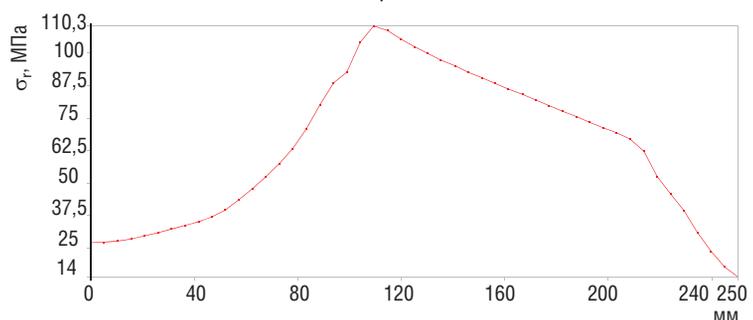


Рис. 5.

Распределение радиальных напряжений σ_θ по высоте диска

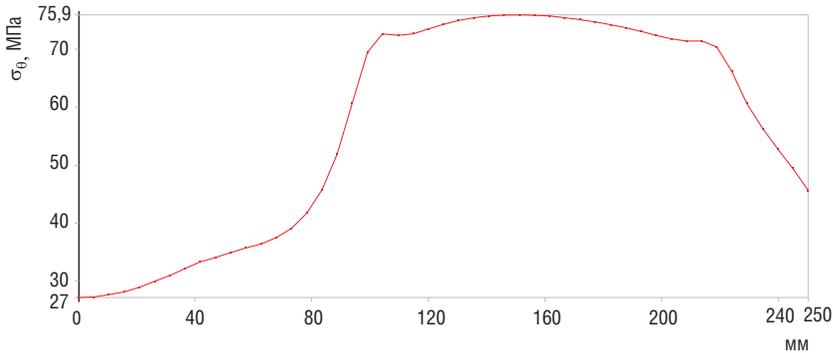


Рис. 6.

Распределение радиальных напряжений σ_r по высоте диска при 5000 об/мин:

- ▲ - значения радиального напряжения σ_r , рассчитанного по методике;
- - значения радиального напряжения σ_r , рассчитанного в Ansys

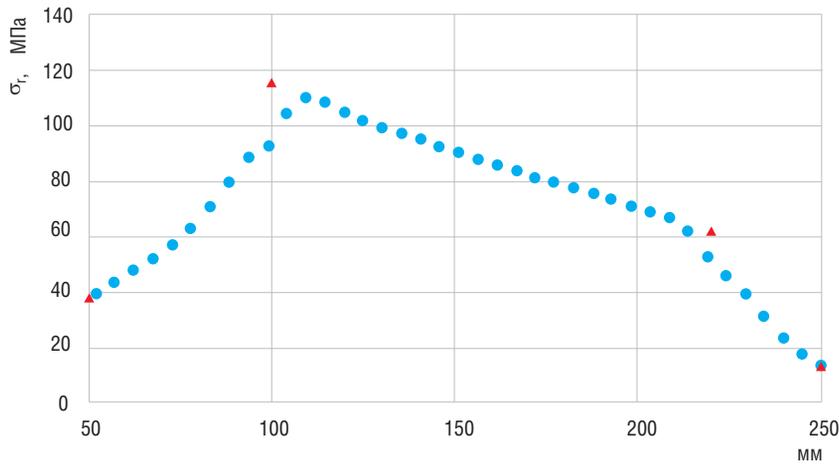
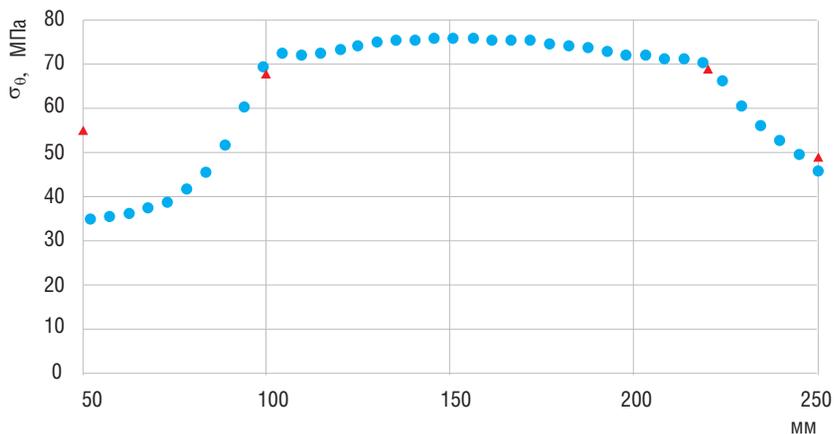


Рис. 7.

Распределение радиальных напряжений σ_θ по высоте диска при 5000 об/мин:

- ▲ - значения радиального напряжения σ_θ , рассчитанного по методике;
- - значения радиального напряжения σ_θ , рассчитанного в Ansys



Например, расчет радиальных и окружных напряжений, образующихся в дисках осевых компрессоров и турбин, принято считать по методу двух расчетов или трех (с учетом температурных напряжений) [3]. Данный метод позволяет рассчитать опасные напряжения в дисках разной ширины в контрольных сечениях.

Порядок определения напряжений методом двух расчетов состоит в следующем. Первый расчет проводится при условии $\omega = \omega_{зад}$ и ведется либо с внутреннего диаметра или от центра, либо с наружного диаметра. На начальной границе первого участка необходимо иметь значения радиальных и окружных напряжений. Радиальные напряжения задаются из граничных условий равным напряжением на периферии или втулке диска, окружные – задаются произвольными. Далее напряжения на всех участках рассчитываются поочередно.

Второй расчет ведется аналогично, только $\omega = 0$ с и без радиальных нагрузок на границе начального участка. Чтобы найти действительные напряжения в диске, необходимо воспользоваться коэффициентом, связывающим два значения радиальных напряжений на противоположной границе участка, на котором начинался расчет.

Использование эмпирических методов расчета требует большой подготовки, которая включает долгий анализ исследуемой системы, подготовку расчетных схем, ведение последовательного расчета по формулам и последующую обработку полученных результатов. Для автоматизации данного процесса, упрощения получения входных и выходных параметров широко используются языки программирования. С их помощью можно полностью автоматизировать процесс проведения расчета, от исследователя требуется только задать необходимые начальные условия [4].

Методология

Для реализации поставленной цели использовался язык программирования Python. Это скриптовый язык программирования – он является достаточно универсальным и подходит для решения самого разного рода задач.

В программе заложен алгоритм метода двух расчетов. При вводе входных параметров: радиус вала, ступицы и обода диска, его ширина в контрольных сечениях, распределенная нагрузка на периферии и втулке, а также константы материала – можно получить на выходе рассчитанные радиальные и окружные напряжения в сечениях.

Прочностной анализ напряженного состояния производился в программе Ansys в модуле статической прочности – Static Structural.

При статическом структурном анализе в Ansys предполагается, что нагрузки, напряжения, деформация и другие подобные физические нагрузки не сильно меняются со временем изменения.

Объект исследования приведен на рис. 2 – это диск осевого компрессора в упрощенном виде. При переходе от полотна диска к ступице и ободу не моделировались галтели.

В программе Ansys необходимо было задать свойства материала. Исследуемый материал – сталь, плотность 7850 кг/м^3 , коэффициент Пуассона (ν) – 0,3.

Результаты

По результатам расчета был проведен анализ на сеточную независимость, который позволил оценить корректность построенной сеточной модели. Критерием сеточной сходимости будут максимальные возникающие в модели окружные и радиальные напряжения (рис. 3).

Как видно из графика, изменение радиальных и окружных напряжений не столь значительно. Поэтому для экономии вычислительных затрат было принято решение производить расчет на сетке с 900 тыс. элементов. На рис. 4, 5 приведены радиальные и окружные напряжения по высоте диска при данном расчете.

В результате испытаний на разных оборотах диска в модуле Static Structural были получены графики распределения радиальных и окружных напряжений. Для верификации данных, полученных из программы для расчета, на графики были нанесены точки, рассчитанные на границах участков (рис. 6–11). Испытания проводились с частотами вращения 5 000, 9 000 и 15 000 об/мин.

Выводы

В результате проделанной работы была получена первичная верификация программного метода расчета с помощью программного пакета Ansys. На рис. 6, 7 приведены радиальные и окружные напряжения при скорости вращения вала 5000 об/мин, напряжения в исследуемом диске в пределах рабочих для стали. Максимальные расхождения по радиальным напряжениям составляют 10 % в сечении на радиусе 100 мм. По окружным напряжениям на втулочном радиусе 50 мм расхождение значительное – 36 %.

При исследовании на частоте вращения 9000 об/мин наблюдается хорошая сходимость на графике распределения радиальных напряжений: расхождение менее 2 % (рис. 8).

Рис. 8.

Распределение радиальных напряжений σ_r по высоте диска при 9000 об/мин:

- ▲ - значения радиального напряжения σ_r , рассчитанного по методике;
- - значения радиального напряжения σ_r , рассчитанного в Ansys

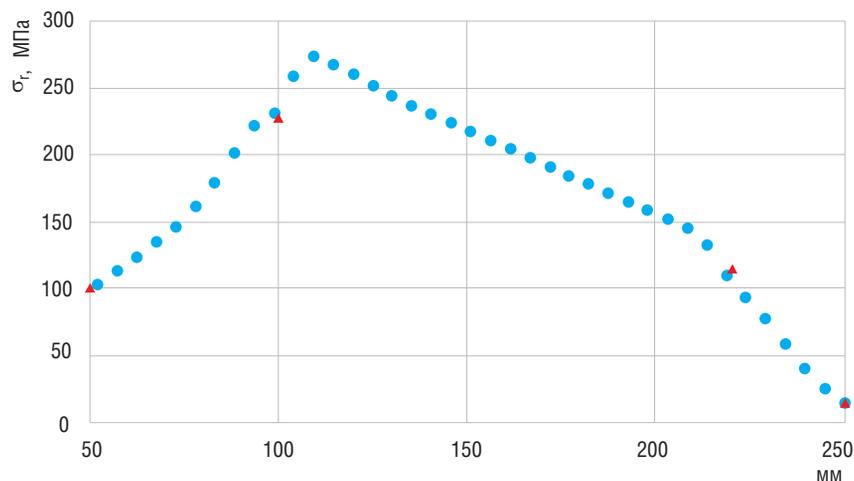


Рис. 9.

Распределение радиальных напряжений σ_θ по высоте диска при 9000 об/мин:

- ▲ - значения радиального напряжения σ_θ , рассчитанного по методике;
- - значения радиального напряжения σ_θ , рассчитанного в Ansys

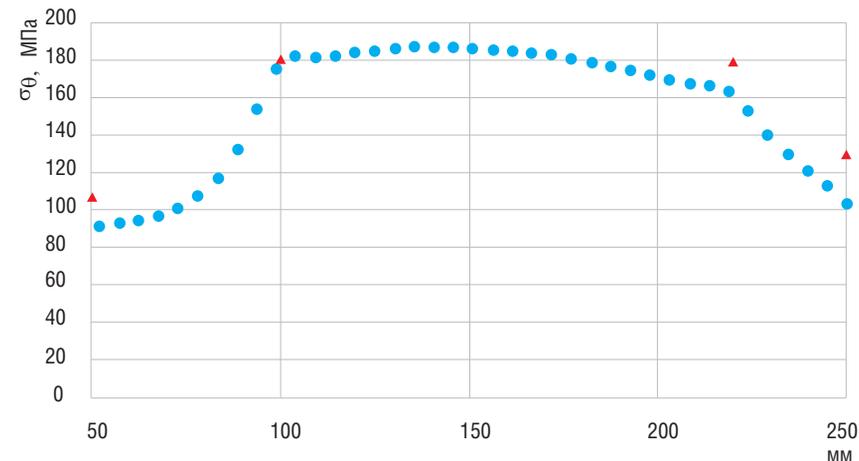


Рис. 10.

Распределение радиальных напряжений по высоте диска при 15000 об/мин:

- ▲ - значения радиального напряжения σ_r , рассчитанного по методике;
- - значения радиального напряжения σ_r , рассчитанного в Ansys

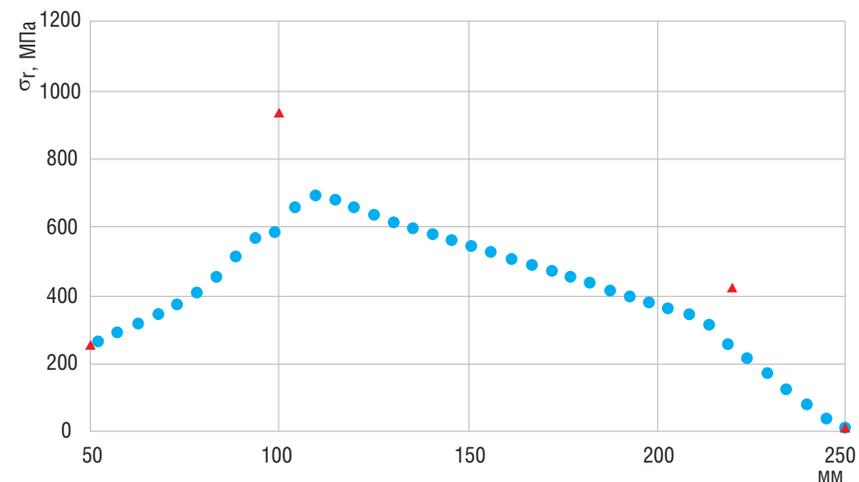
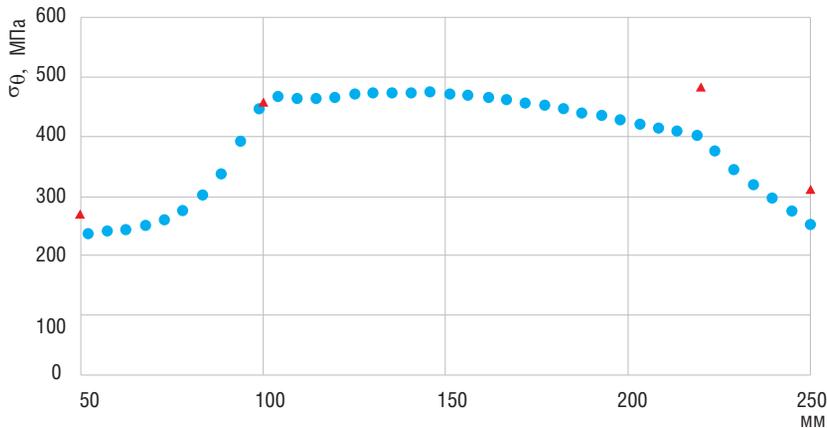


Рис. 11.

Распределение радиальных напряжений σ_{θ} по высоте диска при 15000 об/мин:

▲ - значения радиального напряжения σ_{θ} , рассчитанного по методике;

● - значения радиального напряжения σ_{θ} , рассчитанного в Ansys



Исследование проводилось на частоте вращения 15000 об/мин в качестве ознакомления с возможностями программы считать напряжения выше допустимых практически для всех материалов [5]. На графике радиальных напряжений видно соответствие на торцах диска, т.е. соответствие тем заданным граничным условиям в начале расчета, но абсолютно завышенные значения на полотно диска. В сечении на радиусе 100 мм значение, рассчитанное по программе, на 36% выше полученных значений при эксперименте в Ansys (рис. 10).

Список литературы

1. Зверьев Е.М. Современная трактовка принципа и полуобратного метода Сен-Венана. Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, 2020. – 24 с. DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-5-390-413.

2. Конструкция узлов авиационных двигателей: компрессор: Учеб. пособие / Н.И. Старцев, С.В. Фалалеев. – Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. университета, 2006. – 112 с.

3. Зуев А.В. Динамика и прочность энергетических машин. 1. Теоретические основы статической прочности турбокомпрессоров и турбин: Учеб. пособие / А.В. Зуев, Л.Я. Стрижак. – СПб.: Изд-во Политехн. университета, 2008. – 216 с. (Экономика в Политехническом университете).

4. Егудуров Г.С. Исследование напряженного состояния вращающегося диска переменной толщины / Г.С. Егудуров, А.Б. Баладанов // Вестник ВСГУТУ. 2015, №6. С. 7.

5. Дёмин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.

Новые решения для промышленной теплоизоляции предложило ООО «ИТЦ» (г. Ступино).

По заказу Невского завода компания «Инженерно-технический центр» изготовила комплект теплоизоляционных чехлов марки «Вермитэк» для воздушного трубопровода ГПА-32 «Ладога». Проект реализован предприятием в кратчайшие сроки – с момента разработки до получения первой партии изделий прошло четыре месяца.

Продукция применяется для теплоизоляции турбин, стенок котлов, теплообменников, выпускных коллекторов выхлопных труб и запорной арматуры при температурах изолируемых поверхностей 190...1100 °С. Чехлы оснащены специальными крепежными элементами, обеспечивающими их свободную установку и демонтаж. Каждая партия изготавливается в соответствии с техническим заданием. Заказчикам предоставляется комплексное обслуживание в эксплуатации.

Применение чехлов «Вермитэк» для теплоизоляции воздушных трубопроводов ГПА-32 «Ладога» позволяет сократить время проведения пусконаладочных и ремонтных работ, выполнять обслуживание вспомогательного оборудования с уменьшением затрат, обеспечивая легкий доступ к элементам агрегатов при аварийных ситуациях, с возможностью восстановления теплоизоляции на локальном участке.



Предприятие «ДВС Ресурс» построило электростанцию в С.-Петербурге.

ООО «ДВС Ресурс» реализовало контракт по строительству ГПУ-ТЭС на базе двух энергоблоков MAN 3262 E302 мощностью по 250 кВт. Электростанция размещается в существующем здании котельной С.-Петербурга. В комплектацию станции вошла система утилизации тепла. Газопоршневая ТЭС обеспечивает энергоснабжение оптового склада и офисов общей площадью до 30 тыс. м².



Введена в эксплуатацию первая газовая турбина F-класса, произведенная в Китае.

Первая в Китае газовая турбина собственной разработки F-класса мощностью 50 МВт была введена в промышленную эксплуатацию в городском округе Цинъюань южно-китайской провинции Гуандун. Разработчиком и производителем газовой турбины является компания Dongfang Electric Co., Ltd. Газотурбинная установка работает в составе электростанции комбинированного цикла, обеспечивая электроэнергией городской округ.

Работы по созданию собственной газовой турбины были начаты в 2010 году. В проекте приняли участие специалисты 300 организаций, включая университеты, научно-исследовательские институты, производственные, инжиниринговые и энергетические компании. В процессе разработки была сформирована цепочка по проектированию, производству, поставке, строительству и вводу в эксплуатацию ГТУ без использования технологий иностранных компаний.

MAN Energy Solutions продает газотурбинный бизнес.

Соответствующее соглашение о продаже бизнеса по производству газовых турбин китайской компании CSIC Longjiang GH Gas Turbine Co., Ltd. (GHGT) подписано в июне текущего года.

На сегодня MAN Energy Solutions производит и обслуживает газовые турбины MGT мощностью от 6 до 8 МВт, газовые турбины серии THM 1304 мощностью 10 и 12 МВт на заводах в Оберхаузене и Цюрихе для энергетического и механического привода.

Условия договора включают использование производственных мощностей компании MAN Energy Solutions в течение пяти лет с сохранением рабочих мест. Сделку планируется завершить до конца года после получения всех разрешительных документов.

Самый полный Каталог оборудования для генерации электрической и тепловой энергии.

Подробно представлены:

- газотурбинные двигатели для ГТЭС и ПГУ;
- газопоршневые и дизельные приводы;
- паровые турбины;
- теплообменное оборудование для ГТЭС, ПГУ и ГПЭС;
- электростанции различного типа;
- электрогенераторы;
- абсорбционные холодильные установки (чиллеры);
- ветрогенераторы.

КАТАЛОГ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ



Тел/факс.: (4855) 285-997
info@turbine-diesel.ru

РЕКЛАМА

2023

www.turbine-diesel.ru
ПОДРОБНОСТИ НА САЙТЕ

Цифровой подход к обнаружению дефектов лопаточного аппарата и оценке их влияния на характеристики турбомашин

В. Л. Блинов*, к.т.н. – доцент, v.l.blinov@urfu.ru

О. В. Беляев* – магистр, belyaev_oleg09@mail.ru

В. И. Брезгин*, д.т.н. – главный научный сотрудник, v.i.brezgin@urfu.ru

О. В. Комаров*, к.т.н. – заведующий кафедрой, o.v.komarov@urfu.ru

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ключевые слова:

дефект, лопаточный аппарат, осевые турбомшины, машинное обучение, нейронная сеть, YOLOv8s, численный эксперимент

Аннотация

Настоящее исследование направлено на разработку подходов к обнаружению и классификации дефектов лопаточного аппарата турбомашин и оценку проявления дефектов на характеристики установки. Актуальность работы связана с использованием цифровых технологий при дефектоскопии лопаточного аппарата.

В ходе исследования подготовлена и обучена модель сверточной нейронной сети YOLOv8s на двух наборах данных: с искусственно визуализированными изображениями дефектов и фотографиями лопаток после эксплуатации. На основе анализа результатов обучения и тестирования модели YOLOv8s на базе данных с искусствен-

ными изображениями дефектов лопаточного аппарата достигнута точность 97,8 %. На подготовленном наборе реальных данных YOLOv8s имеет среднюю точность $mAP_{0,5} = 0,84$.

Описан подход к оценке влияния дефектов лопаточного аппарата на характеристики турбомашин по результатам численных экспериментов и применение методов машинного обучения для прогнозирования развития дефектов или оценки изменения характеристик турбомашин с дефектами. Исследование показывает перспективность применения цифрового подхода к обнаружению и оценке влияния дефектов лопаточного аппарата на эксплуатационные характеристики турбомашин.

A digital approach to the detection and evaluation of the impact of blade row defects on the characteristics of turbomachines

V. L. Blinov*, Cand. of Tech. Sciences – Associate Professor, v.l.blinov@urfu.ru

O. V. Belyaev* – Magister, belyaev_oleg09@mail.ru

V. I. Brezgin*, Doctor of Engineering Science – senior staff scientist, v.i.brezgin@urfu.ru

O. V. Komarov*, Cand. of Tech. Sciences – Head of the Department of Turbines and Engines, o.v.komarov@urfu.ru

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Key words:

defect, blade row, axial turbomachines, machine learning, neural network, YOLOv8s, numerical experiment

Abstract

The present study is aimed at developing approaches to detecting and classifying defects in the blade apparatus of turbomachines and assessing the manifestation of defects on the characteristics of the installation. The relevance of the work is connected with the use of digital technologies in the problem of defectoscopy of the blade row apparatus.

In the course of the study, a YOLOv8s convolutional neural network model was prepared and trained on two data sets: with artificially visualized images of defects and photographs of blades after operation. Based on the analysis of the results of training and testing of the YOLOv8s model on a data

base with artificial images of defects in the blade row, an accuracy of 97.8 % was achieved. On the prepared real data set, YOLOv8s has an average accuracy of $mAP_{0.5} = 0.84$.

The paper also describes an approach to assessing the effect of blade defects on the characteristics of turbomachines based on the results of numerical experiments and the use of machine learning methods to predict the development of defects or evaluate changes in the characteristics of turbomachines with defects. The study shows the promise of using a digital approach to detecting and evaluating the impact of blade defects on the performance of turbomachines.

Введение

В процессе работы турбомашин под воздействием различных факторов происходит повреждение и износ поверхности лопаточного аппарата, что приводит к снижению их эффективности и надежности в эксплуатации [1–3]. Появление и развитие дефектов сопровождается изменением газодинамических характеристик лопаточных машин [4–6], параметров статической и динамической прочности [7–9].

Последнее десятилетие активно развиваются подходы к применению цифровых технологий, в том числе технологии цифровых двойников [10].

Достаточно условно можно выделить три направления исследований в рассматриваемой области (рис. 1): а) применение нейронных сетей для обнаружения дефектов; б) выполнение численных экспериментов для их глубокого и быстрого (относительно натуральных экспериментов) изучения; в) внедрение аналитики больших данных с применением методов машинного обучения для оценки технического состояния турбомашин и прогнозирования развития дефектов.

На этапе планового обслуживания и ремонта важно проводить качественный визуальный осмотр деталей и лопаточного аппарата турбомашин, тем не менее, в процессе дефектоскопии лопаток специалист подвержен различным факторам, которые могут снижать его объективность и способность к обнаружению дефектов [11]. После обнаружения дефекта традиционным считается применение различных стандартов, инструкций по эксплуатации и ремонту, а в некоторых случаях экспертных правил для принятия решения о работе турбомашин с дефектами лопаточного аппарата. Оценка влияния дефекта на характеристики турбомашин с последующей оптимизацией

режимов работы, прогнозирование развития дефекта с реализацией технического обслуживание по текущему состоянию еще только рассматриваются к внедрению на отдельных предприятиях.

В дополнение к традиционным подходам развиваются современные цифровые технологии: компьютерное зрение при дефектоскопии лопаточного аппарата [12–16], численное моделирование при исследовании прочностных свойств лопаток и условий течения потока в их межлопаточном канале при наличии дефектов различных типов и размеров [4, 6], а также машинное обучение для оценки и прогнозирования дефектов [17]. В настоящей работе приводится описание данных подходов.

Метод исследования

Исследование состоит из нескольких этапов и подэтапов, часть из них могут быть полностью самостоятельными и проводиться одновременно. Обобщенная схема исследования дефектов показана на рис. 2.

Первый этап исследования направлен на классификацию дефектов лопаточного аппарата рассматриваемого типа турбомашин. Она может проводиться как для отдельных типов турбомашин или для одной машины в условиях ее эксплуатации, так и для групп турбомашин. В рамках настоящего этапа осуществляется анализ различных стандартов и открытых источников информации о дефектах, а также эксплуатационных данных.

Результатом является разработанная структура базы данных дефектов, в которой присутствует информация о типе дефекта и его проявлениях [18]. Например, каждому дефекту может присваиваться определенный класс согласно степени его влияния на характеристики турбомашин: условно сильная, средняя и слабая степени влияния.



Рис. 1. Направления исследований дефектов лопаток с применением цифровых технологий

В основном приоритет в части наполнения базы данных и исследований дефектов отдается первому классу, для которых можно найти большое количество данных в открытых источниках, поскольку их влияние на надежность и эффективность работы оборудования оказывается наибольшим.

При наличии экспериментальных данных появляется возможность проводить верификацию численных моделей с таким типом дефектов, что значительно повышает качество получаемых данных в последующих численных экспериментах. Дефекты второго класса реже встречаются в открытых источниках, их влияние изучено неполно. Основным источником информации о влиянии этих дефектов на характеристики турбомашин могут стать численные эксперименты. После верификации численных моделей без учета дефектов лопаток можно заняться исследованием данной группы дефектов.

К третьему классу относятся дефекты, несущественно влияющие на интегральные характеристики работы оборудования. Их исследование имеет наименьший приоритет и при этом требует построения более сложных и точных численных моделей, что приведет к росту затрат вычислительных и временных ресурсов. С точки зрения обнаружения, все три класса дефектов могут учитываться при исследовании различных моделей

компьютерного зрения. Вероятно, что относительно крупные повреждения и дефекты, наиболее часто встречающиеся в эксплуатации, будут иметь высокую точность обнаружения и, наоборот, относительно мелкие и редкие дефекты – низкую. Все полученные на других этапах исследования данные о дефектах и разработанные рекомендации также должны содержаться в этой базе. В общем случае база данных нужна для аккумулирования информации по имеющимся дефектам конкретной турбомашин, причинам и вероятности их возникновения, а также по влиянию повреждений на газодинамические и прочностные характеристики турбомашин.

Второй этап исследования посвящен применению нейросетевых технологий для обнаружения дефектов лопаток турбомашин. Основная задача – автоматическое обнаружение, классификация и локализация дефектов лопаток турбомашин. Впоследствии также необходимо реализовать автоматическую количественную оценку морфологии дефекта, включая размер дефекта, измеренный по высоте, глубине и площади недостающего материала. После обнаружения дефекта должна быть организована связь с разработанной базой данных, что в совокупности является инструментом, формирующим действия по техническому обслуживанию и ремонту, основанном на сравнении обнаруженных дефектов и их

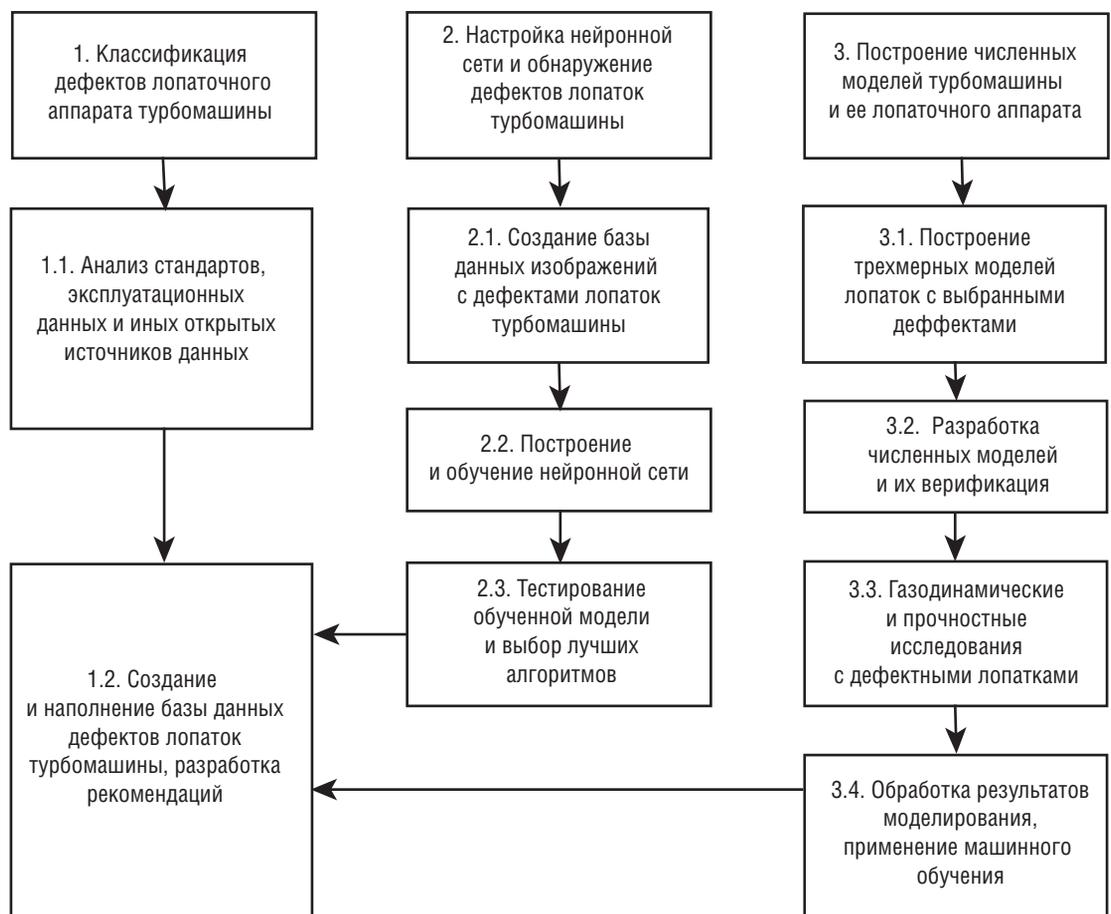


Рис. 2.
Этапы проведенного исследования

допустимых пределов, полученных, например, из руководства по техническому обслуживанию турбомашин. В рамках данного этапа создается база изображений поврежденных лопаток и проводится разметка дефектов.

В настоящем исследовании рассматриваются два источника данных: искусственно созданные изображения по трехмерным моделям лопаток с различными дефектами (рис. 3) и изображения, полученные при съемке зеркальным фотоаппаратом дефектных лопаток, или фото и видео из открытых источников (рис. 4). Каждая выборка данных делится на тренировочную (обучающую) и валидационную. В отдельных случаях валидационная выборка может также делиться на две части: без шума (для настройки гиперпараметров модели) и с шумом, например, с измененным фоном или наличием повреждений, отсутствующих в обучающей выборке (тестовая). Тестовая выборка предназначена для контрольной проверки работоспособности модели. На основании результатов проведенных исследований выбирается лучшая модель, позволяющая достичь высокой точности при обнаружении и классификации дефектов лопаточного аппарата турбомашин.

Третий этап исследования связан с наполнением базы данных дефектов информацией об их влиянии на газодинамические и прочностные характеристики турбомашин, полученные с помощью численных экспериментов. Применение численных моделей ускоряет процесс изучения дефектов лопаток, однако при этом следует уделять внимание точности получаемых данных. В рамках данного этапа осуществляется построение трехмерных моделей лопаток с дефектами различного типа и формы, верификация численных моделей, выполнение серии численных расчетов и анализ их результатов. Отдельно выделяется обработка полученных характеристик турбомашин с различными повреждениями лопаточного аппарата методами машинного обучения, что позволяет впоследствии также решать обратную задачу – оценку и прогнозирование развития дефектов по меняющимся эксплуатационным параметрам турбомашин.

Далее представлены некоторые результаты выполненных работ на примере лопаточного аппарата осевого турбокомпрессора. Попадание посторонних предметов в его проточную часть и недостаточная очистка воздуха на всасывании приводит к возникновению различных дефектов лопаток. На первом этапе (рис. 2) рассмотрены следующие дефекты (рис. 3а-е):

Вмятина – угловое изменение от первоначальной формы или контура лопатки, обычно вызванное ударом поперечной силы по перу. Часто находится на входной или выходной кромке. Дефект можно отнести к третьему классу

по данной классификации. Такие повреждения больше влияют на прочностные характеристики лопатки, чем на аэродинамические.

Надрез – небольшой порез на поверхности лопатки, вызванный ударом малого острого предмета. Повреждение имеет характерную V-образную форму, является концентратором напряжения, может вызвать развитие трещин, приводящих к снижению срока службы турбомашин. Повреждение часто происходит на входной кромке лопатки или вблизи нее.

Разрыв – разделение материала растягивающими напряжениями, создаваемыми острым предметом. Дефект можно рассматривать как результат развития повреждения надрез (например, исходная зазубрина была увеличена сильным ударом посторонним предметом). Он может указывать на рваные или неровные края. Надрез и разрыв чаще всего относятся к дефектам второго класса. Наиболее интересно исследование их влияния на прочностные свойства лопаток.

Скол – механическое отделение небольших кусочков материала лопатки или покрытия, часто встречается на входных/выходных кромках и оставляет заостренную область неправильной формы на пере лопатки. Дефект в зависимости от глубины и местоположения можно отнести 1-, 2- или 3-му классу. Интерес могут представлять не только прочностной, но и газодинамический анализ.

Эрозия – износ поверхности материала посредством ударов твердых частиц, которые движутся в жидкой или газообразной среде. Интерес представляет газодинамические и прочностные исследования влияния износа. Эрозионный износ лопаточного аппарата компрессора приводит к падению напорности и эффективности, снижению запаса газодинамической устойчивости. Динамические свойства лопаток с данным дефектом могут меняться как в сторону отстройки от резонансных явлений, так и в сторону сближения собственных частот колебаний лопаток к частотам возмущающих воздействий. Дефект можно отнести к первому классу.

Обрыв пера – полное разделение пера лопатки на две или более крупногабаритные части под действием внешней силы или внутренних напряжений.

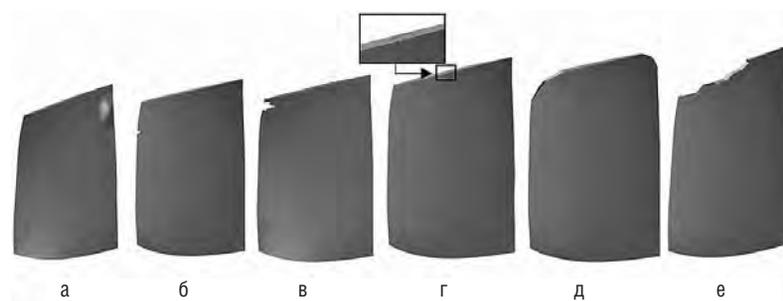


Рис. 3. Дефекты лопаточного аппарата, внесенные в трехмерные модели: а – вмятина, б – надрез, в – разрыв, г – скол, д – эрозия, е – обрыв

Различные дефекты (вмятины и зазубрины, трещины и т. д.) часто предшествуют обрыву пера лопатки. Эксплуатация компрессора с данным дефектом недопустима.

Отдельная лопатка может иметь ряд дефектов различных типов и классов. Деление их на классы достаточно условное – оно позволяет выделить направления исследований отдельных видов дефектов. В практике эксплуатации больший интерес может представлять не класс, а размер дефекта.

На втором этапе проведено обучение и тестирование сверточных нейронных сетей (CNN) семейства YOLO [19]. В работе акцент сделан на CNN YOLOv8s [20]. Для обучения модели подготовлено два набора данных (Dataset). Первый, наполненный искусственными изображениями дефектов лопаток (рис. 3), состоял более чем из 19 000 изображений, второй – более чем из 400 фотографий лопаток с дефектами (рис. 4).

В качестве метрики для оценки эффективности работы модели выбрана средняя точность модели (mAP_{0,5}). Третий этап в представленном подходе направлен на исследование влияния дефектов лопаток на характеристики турбомашин и применение методов машинного обучения для обработки результатов численных экспериментов [6, 17, 21].

Итоговая цель всей работы связана с разработкой общего подхода к обнаружению и оценке влияния дефектов лопаточного аппарата на характеристики турбомашин, включающего описанные этапы, и рекомендаций по проведению аналогичных исследований.

Результаты и их анализ

На основании анализа результатов обучения и тестирования модели YOLOv8s на базе данных с искусственными изображениями дефектов лопаточного аппарата достигнута точность 97,8 %. Полученное высокое значение средней точности модели (mAP) объясняется большим набором изображений, отсутствием в них каких-либо посторонних элементов (шумов) и применением одной модели лопатки, в которую были внесены все дефекты. Полученные результаты показали

принципиальную возможность реализации описанного подхода, когда за счет верно идентифицированного типа дефекта лопаточного аппарата можно связать информацию эндоскопирования с базой данных, заранее наполненной информацией о влиянии данного дефекта на характеристики рассматриваемого типа турбомашин, для выдачи рекомендаций по техническому обслуживанию и дальнейшей эксплуатации оборудования.

Дальнейшее исследование было связано с применением фотографий лопаток с накопленными после эксплуатации повреждениями (рис. 4). Ожидается, что точность классификации дефектов при этом снижается ввиду наличия «шумов» на изображениях и меньшего объема данных для обучения. Значение средней точности модели YOLOv8s на данных реальных лопаток достигало 84,5 %.

На рис. 4 представлены результаты обнаружения и классификации дефектов типа надрез (nick), вмятина (dent) и обрыв пера (break_of_blade). Обученная модель нейронной сети описывает повреждение в ограничивающую рамку и выводит его класс (тип) с указанием степени уверенности обнаружения данного типа дефекта. Таким образом, к задачам исследования относится обеспечение наивысшей точности в обнаружении дефекта и максимальной степени уверенности нейронной сети в идентифицированных повреждениях лопаточного аппарата.

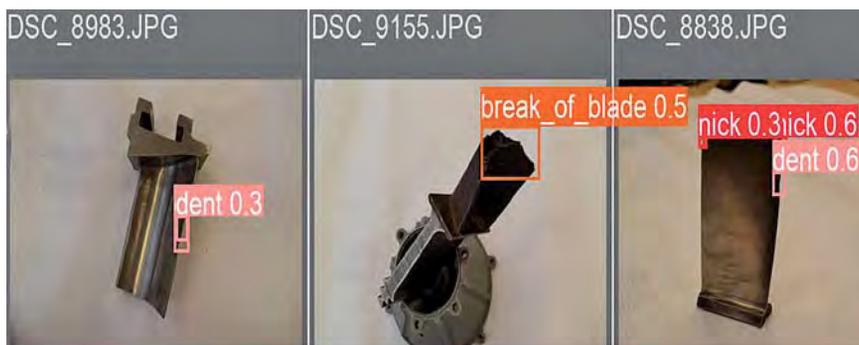
Заключение

Проведенное исследование показывает перспективность применения описанного подхода к обнаружению и оценке влияния дефектов лопаточного аппарата на эксплуатационные характеристики турбомашин. После интеграции всех моделей и данных в одну систему потребуются решить ряд проблем, тем не менее, приведенные результаты решения задач отдельных этапов подхода демонстрируют возможность его реализации. ▮

Список литературы

1. Блинов В.Л. Исследования эрозионного износа лопаточного аппарата осевых турбокомпрессоров (обзор) / В.Л. Блинов, И.С. Зубков, С.В. Богданец, О.В. Комаров, Г.А. Дерябин // Теплоэнергетика. – 2023. – 6. – с. 41-55. DOI: 10.56304/S0040363623060024.
2. Белоусов М.Г. Исследование факторов, влияющих на повреждаемость и разрушение лопаток компрессоров авиационных двигателей / М.Г. Белоусов, А.А. Цуркаль // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2013г. – № 65 – 14 с.
3. Шулехин В.Т. Оценка влияния поврежденных рабочих и направляющих лопаток компрессора на эффективность функционирования

Рис. 4. Обнаружение и классификация дефектов из валидационной выборки по результатам обучения сверточной нейронной сети YOLOv8s на данных реальных лопаток



ния авиадвигателей / В. Т. Шулехин, Е. А. Лазарев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2005. – № 85 – с. 51-56.

4. Гумеров А. В. Моделирование износа лопатки компрессора / А. В. Гумеров, Р. Г. Акмалетдинов // Вестник Самарского государственного университета им. Академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). – 2011. – с. 233-240.

5. Исламов Р. Р. Моделирование износа лопаток компрессора и пылезащитного устройства ГТД / Р. Р. Исламов, В. С. Лепанья, А. Х. Рахимов, А. С. Гишваров // Молодежный вестник УГАТУ – 2020. – № 2 (23) – с. 56-59.

6. Блинов В. Л. Особенности численного моделирования двухступенчатого осевого компрессора с дефектными лопатками / В. Л. Блинов, И. С. Зубков, О. В. Беляев, Е. Ю. Искорцев, П. И. Плишкин // Вестник Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20. № 4. С. 7–19. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2021-20-4-7-19>.

7. Чичков Б. А. Рабочие лопатки авиационных ГТД. Часть 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток / Б. А. Чичков – Москва: МГТУ ГА, – 2011. – с. 74.

8. Rama Rao. Vibration analysis for detecting failure of compressor blade / A. Rama Rao, V. K. Dutta // Engineering Failure Analysis. – 2012. – № 25 – Pages 211-218.

9. Нихамкин М. А. Комплексный расчетный анализ прочности лопаток компрессора при их повреждении посторонними предметами / М. А. Нихамкин, М. В. Семенова, О. Л. Любимчик. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2010 г. – с. 19-30.

10. Блинов В. Л. Вопросы реализации и применения цифровых двойников газотурбинных установок / В. Л. Блинов, С. В. Богданец, И. А. Калинин, Ю. Г. Марченко // Газовая промышленность. – 2021. – № 11(824). – С. 56-66.

11. See, Judi E. Visual inspection: a review of the literature., report, October 1, 2012. (<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc835891/>: accessed December 2, 2022), University of North Texas Libraries, UNT Digital Library; crediting UNT Libraries Government Documents Department.

12. Shen Z. Deep Learning based Framework for Automatic Damage Detection in Aircraft Engine Borescope Inspection / Z. Shen, X. Wan, F. Ye, X. Guan, S. Liu // International Conference on Computing, Networking and Communications. – 2019. pp. 1005–1010.

13. Kim Y-H. Videoscope-based inspection of turbofan engine blades using convolutional neural networks and image processing / Y-H. Kim, J-R. Lee // Structural Health Monitoring. – 2019. – №18 (5-6). pp. 2020-2039.

14. Wong C. Automatic Borescope Damage Assessments for Gas Turbine Blades via Deep Learning / C. Wong, S. Pranay, G. Parks // AIAA Scitech 2021 Forum. – 2021. – pp. 11-15.

15. Neuhauser F. M., Bachmann G. & Hora P. (2019). Surface defect classification and detection on extruded aluminum profiles using convolutional neural networks. International Journal of Material Forming. doi:10.1007/s12289-019-01496-1.

16. Aust J. Automated Defect Detection and Decision-Support in Gas Turbine Blade Inspection / J. Aust, S. Shankland, D. Pons, R. Mukundan, A. Mitrovic // Aerospace. – 2021. – № 8(30). – 27 pp.

17. Блинов В. Л. Классификация уровня эрозии проточной части изолированной ступени осевого компрессора / В. Л. Блинов, Г. А. Дерябин, И. С. Зубков // Энергетические системы. – 2022. – № 1. – С. 8-18. – DOI 10.34031/es.2022.1.001.

18. Беляев О. В. Разработка базы данных дефектов лопаточного аппарата для повышения надежности газотурбинных установок с применением технологии компьютерного зрения / О. В. Беляев, В. Л. Блинов. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы развития технических наук: сборник статей участников XXIV Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». – Екатеринбург: /Уральский федеральный университет, 2021. – С. 36-41.

19. YOLOv6: A Single-Stage Object Detection Framework for Industrial Applications. Chuyi Li, Lulu Li, Hongliang Jiang, Kaiheng Weng, Yifei Geng, Liang Li, Zaidan Ke, Qingyuan Li, Meng Cheng, Weiqiang Nie, Yiduo Li, Bo Zhang, Yufei Liang, Linyuan Zhou, Xiaoming Xu, Xiangxiang Chu, Xiaoming Wei, Xiaolin Wei [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.02976> (Дата обращения: 22.05.2023)

20. Документы по YOLOv8 [Электронный ресурс] URL: <https://docs.ultralytics.com/> (Дата обращения: 22.05.2023).

21. Блинов В. Л. Верификация расчётной модели транзвуковой ступени для решения задач учёта влияния эрозионного износа на работу осевого компрессора / В. Л. Блинов, И. С. Зубков // Вестник Самарского государственного университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 51-62. – DOI 10.18287/2541-7533-2023-22-1-51-62.

Импортозамещение энергетического оборудования в рамках пожизненного сервиса



Т.Н. Хайрулин, А.Б. Рогов – АО «ОДК–Авиадвигатель»

In brief
**Import substitution of power
equipment as part of a life-
time service.**

UEC–Aviadvigatel JSC was the first in Russia to introduce a program of branded repair and maintenance of gas turbine power plants during the life cycle with payment for the actual machine-hour worked and the provision of a full guarantee for the equipment during the designated resource. This approach allows customers to plan engine operating costs, reduce equipment insurance costs, and optimize the composition of spare parts.

At the same time, fixed deadlines for troubleshooting and malfunctions are taken into account and the time for performing repair and maintenance is reduced, deep diagnostics, continuous monitoring of equipment parameters and its systems are used.

АО «ОДК–Авиадвигатель» первым в России ввело программу фирменного ремонтно-технического обслуживания (ПФРТО) энергетического газотурбинного оборудования в течение жизненного цикла с оплатой за фактически отработанный машино-час и предоставлением полной гарантии на оборудование в течение назначенного ресурса. Такой подход позволяет заказчикам планировать затраты на эксплуатацию двигателя, снижать расходы на страхование оборудования, оптимизировать состав запасных частей. При этом учитываются фиксированные сроки устранения неполадок и неисправностей и сокращается время на выполнение ремонтно-технического обслуживания, используются глубокая диагностика, непрерывный контроль параметров оборудования и его систем.

В сложных условиях последних лет программа фирменного ремонтно-технического обслуживания позволила не только обеспечить бесперебойную работу оборудования на объектах заказчиков, но и успешно решать актуальные проблемы, связанные с импортозамещением.

Период карантинных мер в связи с пандемией коронавируса в 2020–2022 гг. позволил в полной мере оценить возможности ПФРТО при возникновении серьезных вызовов. В это время деятельность многих предприятий была фактически парализована, что привело к проблемам с проведением ремонтов на площад-

ках поставщиков, приобретением материальной части, выездом представителей специализированных предприятий, а также с логистикой.

Последовавшая далее санкционная политика зарубежных стран вызвала изменения в макроэкономической ситуации в мире и взаимоотношениях с западными поставщиками оборудования. Это привело к ограничению поставок, ремонта и обслуживания импортной техники.

В такой ситуации специалисты пермского КБ выполняли ПФРТО благодаря заранее сформированному полноценному техническому «аптечкам» на объектах эксплуатации оборудования. АО «ОДК–Авиадвигатель» заранее заключило долгосрочные договоры с поставщиками покупных комплектующих изделий (ПИК), а также скомплектовало и разместило непосредственно на территории энергообъектов расходные материалы для проведения различных форм технического обслуживания и ремонтов, запасные части к оборудованию из состава энергоагрегатов (ЭГЭС) и газотурбинных установок, резервные агрегаты и газотурбинные двигатели. При формировании технической «аптечки» специалисты пермского КБ используют опыт эксплуатации не только конкретного объекта, но всего парка ЭГЭС и ГТУ собственной разработки.

Конечно, решающую роль в проведении ПФРТО в сложный период сыграли сотрудники предприятия – высококвалифицированные специалисты АО «ОДК–Авиадвигатель»

круглосуточно сопровождают эксплуатацию оборудования на объектах, при необходимости оперативно вызывают подрядчиков и обеспечивают работоспособность ЭГЭС. В период карантина была организована удаленная работа специалистов КБ, что в полном объеме обеспечило конструкторское сопровождение с консультациями и выдачей рекомендаций шеф-инженеру, находящемуся на объекте эксплуатации оборудования.

Несмотря на то что пермские ЭГЭС – собственная, полностью отечественная разработка, при их производстве используются импортные комплектующие. Достаточно оснащенная техническая «аптечка», а также квалификация и опыт специалистов АО «ОДК–Авиадвигатель» позволяют эксплуатировать оборудование зарубежного производства без ограничений даже в условиях санкций. Более того, без риска простоя оборудования пермское КБ перешло к формированию программы по замене необходимых импортных комплектующих.

Основой пермских ЭГЭС и ГТУ являются газотурбинные двигатели, созданные на базе газогенераторов надежных авиационных двигателей Д-30 и ПС-90А. Они предназначены для самолетов Ту-134, Ил-96-300, Ту-204, Ту-214. Двигатели – полностью отечественный продукт, практически без импортных деталей, что делает их сегодня очень привлекательными для заказчиков, работающих в России и дружественных ей странах.

Система автоматического управления (САУ), которая применяется в ЭГЭС и ГТУ, создается на базе импортных комплектующих. Для подбора системы управления на базе отечественных информационно-управляющих систем и низковольтного оборудования организована комиссия из представителей АО «ОДК–Авиадвигатель» и ключевого партнера в сфере разработки и производства САУ. Комиссия всесторонне изучила возможности российских компаний и выбрала систему, не уступающую по основным характеристикам и возможностям зарубежным аналогам.

Сегодня вновь вводимые ЭГЭС и ГТУ уже комплектуются отечественной системой управления. На действующих объектах внедрение и адаптация САУ будет происходить позже. Кроме того, еще один ключевой партнер в части разработки и изготовления САУ также успешно перешел на контроллерное оборудование и комплектующие к нему российского производства.

Подавляющее большинство электростанций разработки АО «ОДК–Авиадвигатель» укомплектовано генераторами российского производства. В Пермском крае также есть

надежные производители силового электрооборудования, которые могут обеспечивать ротацию генераторов оперативно и без внесения значительных изменений в конструкцию.

ЭГЭС и ГТУ, как технически сложные объекты, оснащены большим количеством средств измерения и контроля. Часть датчиков и сигнализаторов, к сожалению, импортного производства. Специалисты пермского КБ подобрали альтернативные варианты датчиков от нескольких отечественных поставщиков, тщательно проанализировали технические вопросы о возможности их применения, статистику использования и т. д. В результате был выбран определенный тип датчиков российского производства, который наиболее удовлетворяет необходимым требованиям, в числе которых:

- взаимозаменяемость по установочно-присоединительным размерам;
- параметры сигналов;
- взрывозащита;
- межповерочный интервал;
- рабочий диапазон;
- погрешность измерения;
- условия их эксплуатации и др.

Также были тщательно проанализированы все покупные комплектующие изделия в составе ЭГЭС и ГТУ по следующим показателям:

- поставщик и страна-изготовитель;
- наличие/отсутствие импортных комплектующих в изделиях;
- наличие и возможность применения аналогов, произведенных в России или дружественных странах;
- объем доработки при внедрении аналогов;
- наличие запасных частей и возможность их поставки;
- безотказность работы импортного оборудования.

 **Центральный щит
управления газотурбинной
электростанции**



На основании проведенного анализа и переговоров с изготовителями оборудования разработаны и внедряются программы по импортозамещению со стороны как АО «ОДК–Авиадвигатель», так и поставщиков отечественных изделий, использующих комплектующие зарубежного производства.

Сегодня для всего импортного оборудования в составе ЭГЭС и ГТУ подобраны аналоги, производимые в РФ. При этом продолжается поиск поставщиков мощных редукторов для установки между газотурбинным двигателем и генератором. Это обусловлено тем, что потенциальные партнеры в России загружены госзаказами и не могут изготовить необходимое оборудование в нужные сроки.

Параллельно, чтобы исключить риски с поставкой редукторов, АО «ОДК–Авиадвигатель» изучает потенциал отечественных производителей данного оборудования, а также рассматривает возможность разработки и изготовления редуктора своими силами. И хотя импортное оборудование обладает высокими показателями надежности и безотказности и в некоторых случаях имеются резервные каналы, т.е. не требуется превентивной замены в ближайшее время, АО «ОДК–Авиадвигатель» ведет переговоры с владельцами оборудования о его поэтапной замене.

Внедрение отечественных аналогов, к производству которых только приступили российские предприятия, влечет финансовые и технические риски, что в итоге может сказаться на показателях надежности и безот-

казности ЭГЭС и ГТУ. Чтобы минимизировать эти риски, АО «ОДК–Авиадвигатель» намерено выполнить доработку одного из действующих объектов эксплуатации с заменой импортного оборудования отечественным в рамках договора ПФРТО, адаптировать его к существующим системам, провести подконтрольную эксплуатацию, на основе чего принять решение о внедрении данного оборудования для всего парка действующих ЭГЭС и ГТУ. Перечисленные мероприятия планируются реализовать в 2023–2024 годах.

Замена импортных комплектующих отечественными изделиями происходит также при реконструкции энергокомплексов, выработавших ресурс, для продления назначенного срока эксплуатации на 100 тыс. часов, с продлением действующих договоров по ПФРТО.

Следует отметить немаловажный фактор: подбор аналогов импортного оборудования, разработка конструкторской документации, заключение договоров с российскими предприятиями-изготовителями, решение комплекса вопросов для подготовки и реализации данной программы – все мероприятия выполняются в рамках ПФРТО специалистами АО «ОДК–Авиадвигатель» и за счет пермского КБ без дополнительных затрат со стороны владельца оборудования.

Несмотря на трудности последних лет, с которыми столкнулось пермское КБ, предприятие стабильно выполняет все взятые на себя в рамках ПФРТО обязательства перед владельцами энергооборудования, гарантируя основные положительные результаты фирменного ремонтно-технического обслуживания:

- прогнозируемые расходы с равномерными выплатами по договору;
- максимальное время работы оборудования;
- непрерывность производственного процесса и возможность увеличить назначенный ресурс оборудования, эксплуатируемого в рамках ПФРТО по техническому состоянию, с сохранением высоких показателей надежности и готовности.

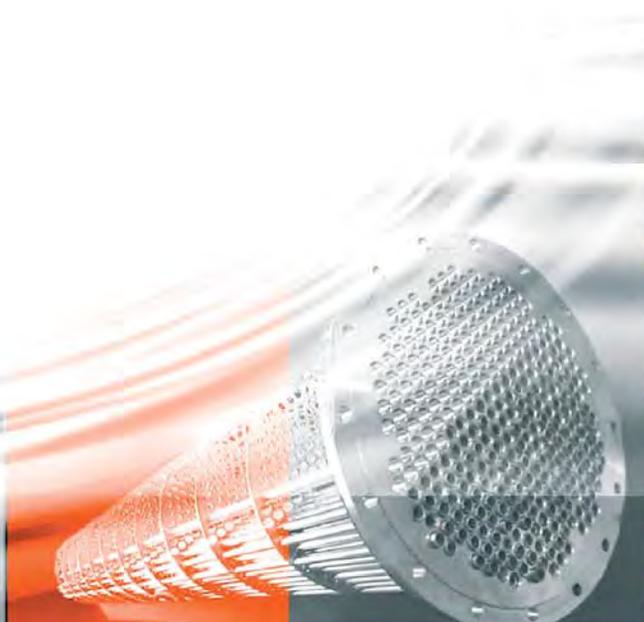
Сегодня, благодаря качественной реализации программы по замене импортной техники, специалисты АО «ОДК–Авиадвигатель» разрабатывают и поставляют заказчикам новые энергоблоки и газотурбинные установки, укомплектованные оборудованием российской разработки и изготовления. Таким образом, полностью исключаются какие-либо риски, связанные с влиянием импортного оборудования на работу стратегических и ключевых объектов в нашей стране. **Д**

Техническое обслуживание энергоблока в эксплуатации



24-26 ОКТЯБРЯ 2023
МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»

HEAT&POWER



**8-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ПРОМЫШЛЕННОГО КОТЕЛЬНОГО, ТЕПЛООБМЕННОГО
И ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ**



РЕКЛАМА

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
heatpower@mvk.ru



ЗАБРОНИРУЙТЕ СТЕНД
heatpower-expo.ru

Новые инженеринговые компетенции Центрального ремонтно-механического завода

В. В. Гикал, В. Б. Смышляев, С. В. Шикунов – ООО «ЦРМЗ»

И. Ю. Кляйночек, к.т.н. – ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»

ЦРМЗ – крупнейшее в Московском регионе специализированное предприятие по диагностике, ремонту и обслуживанию оборудования объектов энергетики. Для поддержания конкурентоспособности завод расширяет перечень выпускаемой продукции и оказываемых услуг, осваивает новые технологии производства.

In brief

New engineering competencies of Central Mechanical Repair Plant.

Since its foundation in 1948, the main task of the Central Mechanical Repair Plant has been to ensure reliable and uninterrupted operation of the energy system of Moscow and the Moscow region.

With this in mind, the company performs scheduled preventive and emergency repairs of all transportable equipment of PJSC Mosenergo. In 2019, an Engineering and Technical Center was opened on the basis of the CMRP as part of the implementation of the Mosenergo initiative for the solution of engineering tasks and the development of engineering activities.

С момента своего основания в 1948 году основной задачей Центрального ремонтно-механического завода является обеспечение надежной и бесперебойной работы энергетической системы Москвы и Московской области. С учетом этого предприятие выполняет плано-предупредительные и аварийно-восстановительные ремонты всего транспортабельного оборудования ПАО «Мосэнерго», включая:

- ремонты роторов и корпусов паровых турбин всех типов с изготовлением запасных частей;
- восстановительную термообработку крупногабаритных деталей (длиной до 6 000 мм и массой до 8 тонн);
- ремонты и перезаливку подшипников скольжения;
- ремонты роторов генераторов всех типов;
- ремонты тягодутьевых механизмов котлов и валов электродвигателей с полной заменой обмотки статора мощностью до 4 000 кВт;
- ремонты конденсатных и питательных насосов, а также гидромуфт с изготовлением запасных частей;

- изготовление поверхностей нагрева для ремонта котельного оборудования.

В 2019 году на базе ЦРМЗ был открыт Инженерно-технический центр – он создан в рамках реализации инициативы Мосэнерго по комплексному решению инженеринговых задач и развитию инженерно-технической и научной деятельности на предприятии. В настоящее время ЦРМЗ активно развивает свои инженеринговые компетенции. Одним из важных направлений является предпроектная проработка основных решений в объеме технологической схемы пускового комплекса, в которую входит:

- обоснование выбора основных элементов тепловой пусковой схемы;
- расчет основных технико-экономических показателей оборудования;
- снижение затрат на топливо;
- разработка и обоснование технологии переменных режимов, включая пуски из всех основных тепловых состояний и остановы, в т. ч. остановы с расхолаживанием, режимы работы под нагрузкой в пределах регулировочного диапазона (включая обоснование ограничений этого диапазона);
- обоснование критериев надежности, построение графиков-заданий;
- разработка заданий на автоматизацию энергоблока;
- разработка нормативно-технической документации по использованию топлива.

Другим направлением инженеринговой деятельности ЦРМЗ является проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ. В частности, для газовой турбины SGT5-2000E выполнена научно-исследовательская работа по увеличению межсервисного интервала с 33 тыс. эквива-

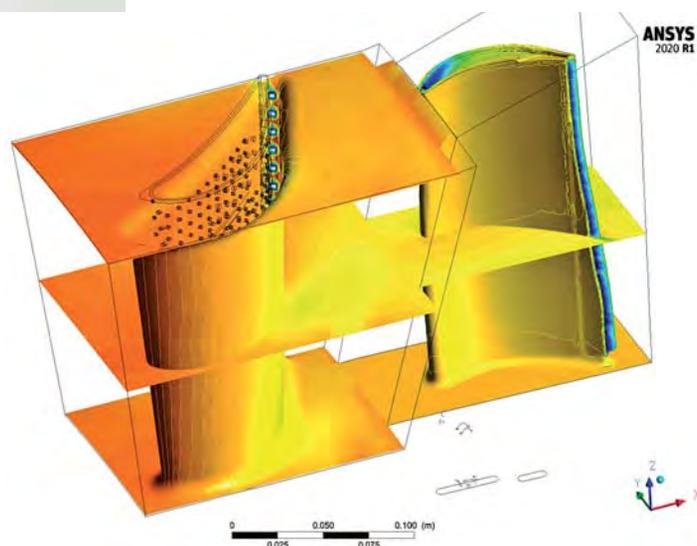


Рис. 1.

Результаты моделирования работы рабочей лопатки газовой турбины SGT5-2000E

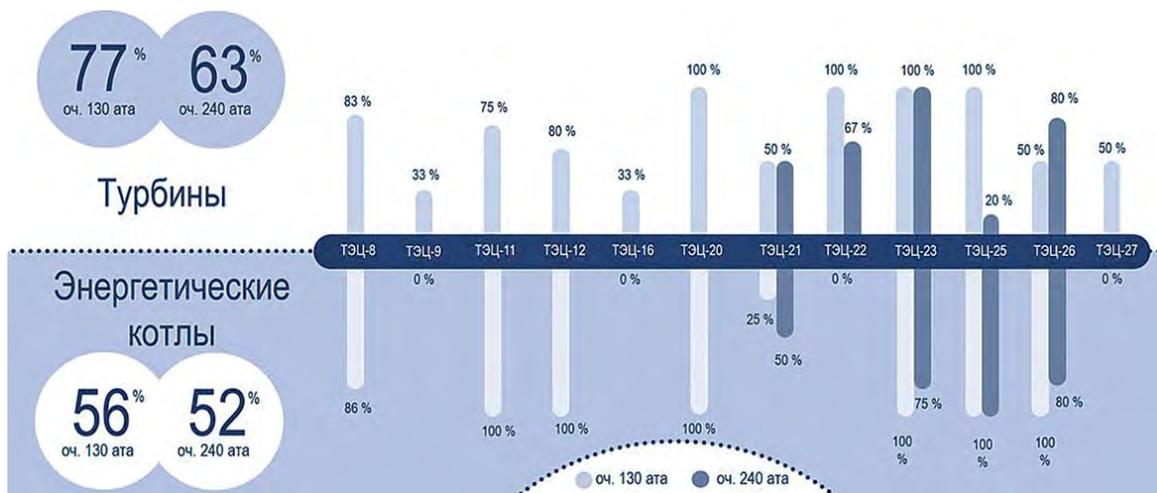


Рис. 2.
Объем испытанного оборудования ПАО «Мосэнерго»

лентных часов работы до 46 тыс. Результаты расчетной работы подтверждены металлографическими исследованиями металла лопаток первых охлаждаемых ступеней газовой турбины. Таким образом, созданная математическая модель «горячих» деталей газовой турбины (рис. 1) в сочетании с исследованиями свойств материалов позволила разработать методику обоснования увеличения межсервисных интервалов.

Кроме этого, ЦРМЗ проводит пусконаладочные работы и испытания ГТУ иностранного производства: SGT5-4000F, V64.3A, SGT5-2000E. Начиная с 2019 года проведено более 150 испытаний основного оборудования ПАО «Мосэнерго» (рис. 2).

В части разработки новой продукции для объектов энергетики предприятием спроектирована линейка малогабаритных цилиндрических водогрейных котлов с применением турбокомпрессора мощностью от 1 до 20 МВт (рис. 3).

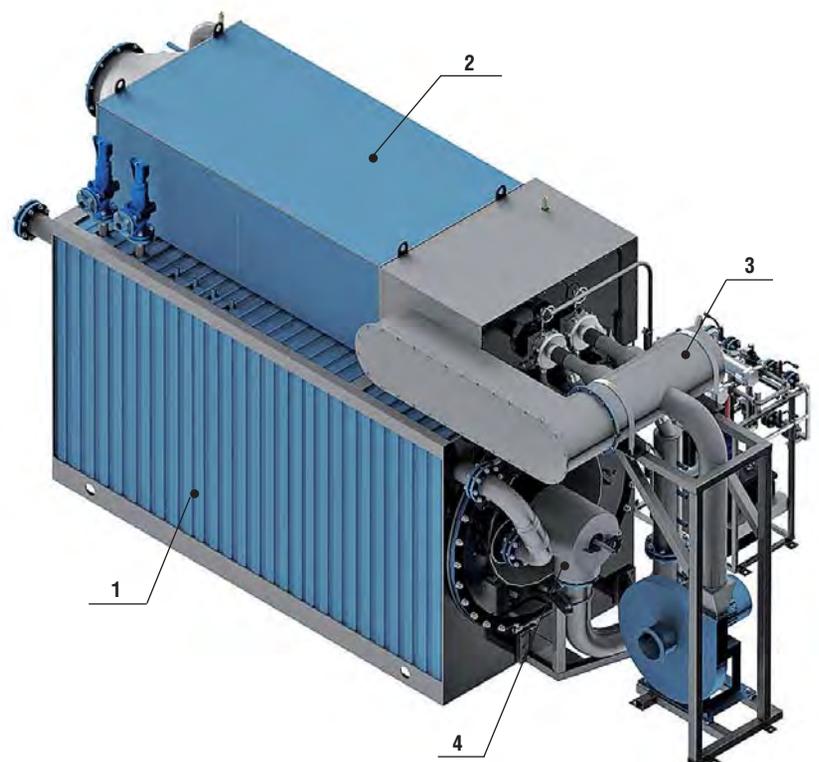
В состав котла входят следующие основные конструктивные элементы:

- секция высокотемпературная (поз. 1) – жаротрубно-дымогарный цилиндрический газоплотный корпус;
- секция низкотемпературная (поз. 2) – шахматный пучок оребренных труб в газоплотном корпусе;
- секция забора воздуха (поз. 3) – узел, состоящий из блока турбокомпрессоров, радиального вентилятора, воздушного коллектора-глушителя, маслостанции смазки подшипниковых узлов турбокомпрессоров;
- горелочное устройство (поз. 4) – узел, включающий в себя комбинированную газодизельную горелку, блоки запорно-регулирующей и отсекающей арматуры, оперативные узлы расхода, фотодатчик пламени;

- шкаф ЛСАУ котла (на рис. не показан) – узел, реализующий полевой уровень автоматизации котлового агрегата, поставляется со всеми необходимыми приборами КИПиА, запорно-регулирующей арматурой по теплоносителю и оперативным узлом расхода по воздуху и теплоносителю.

Специалистами Инженерно-технического центра проведена серия испытаний, подтверждающая высокий КПД котла – 96%. Водогрейные котлы ЦРМЗ имеют также ряд других конкурентных преимуществ. Благодаря высокой степени сжатия серийных автомобильных турбокомпрессоров, используемых для нагнетания воздуха в горелку котла, стало возможным применение

Рис. 3.
Малогабаритный цилиндрический водогрейный котел



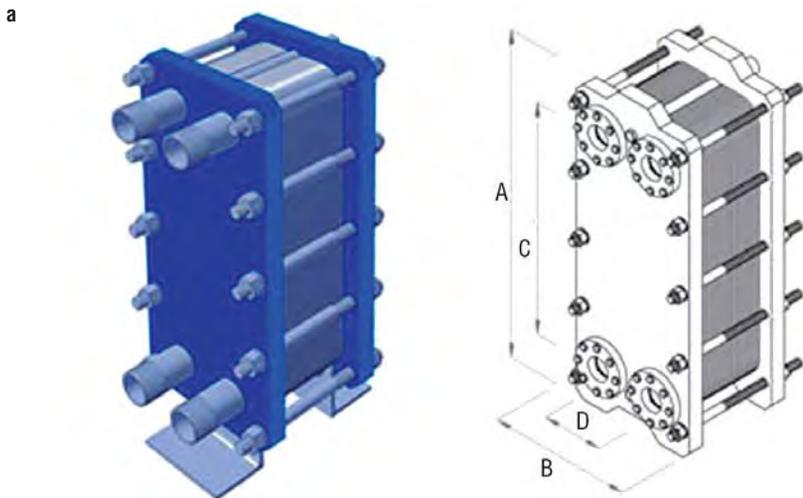


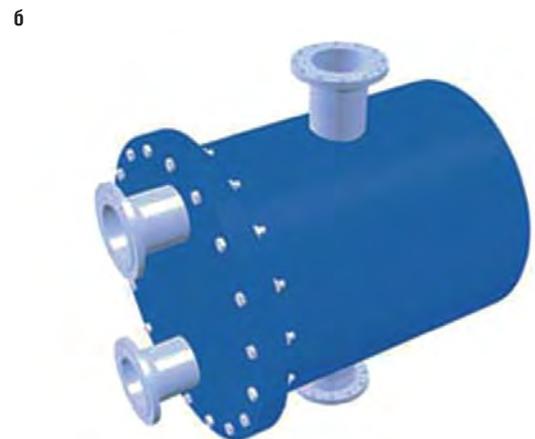
Рис. 4.
Теплообменники:
а) разборнопластинчатый;
б) кожухопластинчатый

компактной конструкции конвективного теплообменника с развитой площадью теплообмена, аэродинамическое сопротивление которой невозможно «прокачать», используя стандартные горелочные устройства, но можно получить температуру отходящих газов не выше 85...90 °С. В связи с тем что из-за повышения давления в камере сгорания уменьшаются размеры факела, уменьшены размеры топки и котлоагрегата в целом. Кроме того, за счет отсутствия расхода электроэнергии на привод вентилятора и дымососа дополнительно снижается стоимость эксплуатации. Общие технические характеристики водогрейных котлов ЦРМЗ представлены в табл.

Наименование	Значение
Мощность, МВт	1...20
Рабочий диапазон от номинальной мощности, %	25...110
Реальный КПД в рабочем диапазоне мощности, %	≥ 97
Рабочие параметры теплоносителя	Макс. рабочее давление не более 0,75 МПа, температурный график 60...150 °С
Срок службы, лет	20
Удельный расход газа (рассчитан для котла 2 МВт), т.у.т./Гкал	0,146
Основное топливо и его параметры	Природный газ по ГОСТ 5542-2014 (низшая теплота сгорания 31,8 МДж/м ³), присоединительное изб. давление 0,15...0,3 МПа
Резервное топливо и его параметры	Дизельное топливо по ГОСТ 305-2013
Показатели уходящих газов при работе на природном газе (при температуре воды на входе 65 °С и α=1,4)	Температура ≤ 85 °С Содержание NO _x ≤ 85 мг/м ³ Содержание СО=0 г/м ³

Табл.
Общие технические характеристики водогрейных котлов производства ЦРМЗ

Фото
Метизная продукция для газовой турбины SGT5-2000E



Кроме котельного оборудования, ЦРМЗ освоил производство теплообменного оборудования – разборнопластинчатых и кожухопластинчатых теплообменников сербской компании Euro Heat (рис. 4). Оба типа теплообменников обладают высоким коэффициентом теплоотдачи – до 6 000 Вт/м² и КПД 95 %.

В рамках программы импортозамещения ЦРМЗ осваивает производство различных деталей, применяемых в газотурбинных установках. В связи с этим выполнено техническое перевооружение станочного парка, оснащен центр реинжиниринга, разрабатывается РКД по выпуску локализованной продукции. В настоящее время предприятием начато освоение метизных изделий для газовой турбины SGT5-2000E (фото), выполняется конструкторско-технологическая подготовка производства для жаропрочного крепежа для газовой турбины Т32 производства «НЗЛ», работающей в составе ГПА-32.

Накопленный к настоящему времени инженерно-технический и научный потенциал позволяет позиционировать ЦРМЗ не только как ремонтно-сервисное предприятие, но и как современный центр компетенций, где решаются комплексные инженерные и научные задачи в рамках обеспечения надежности эксплуатации энергетических объектов РФ. **Д**



Конференция «Компрессорное оборудование и ГТУ для газотранспортной системы» 13-15 сентября 2023 года, г. Санкт-Петербург.

Конференция «Компрессорное оборудование и ГТУ для газотранспортной системы» проводится Высшей школой энергетического машиностроения Института энергетики СПбПУ Петра Великого. Мероприятие приурочено к 90-летию основателя научной школы компрессоростроения Политехнического университета, профессора, доктора технических наук, члена Международной Академии холода, заслуженного работника высшей школы РФ – Юрия Борисовича Галеркина.

В течение трех дней участники смогут обменяться практическим опытом и проблемами эксплуатации, познакомиться с новой компрессорной техникой и ГТУ, установить прямые контакты для выбора путей модернизации существующего или создания нового компрессорного оборудования и ГТУ.

Конференция является правопреемником симпозиума «Потребители – производители компрессоров и компрессорного оборудования» – международного форума, проводимого в интересах организаций, эксплуатирующих компрессорное оборудование. Ежегодно в работе симпозиума принимали участие представители крупнейших мировых компаний из различных отраслей промышленности, эксплуатирующих компрессорную технику.

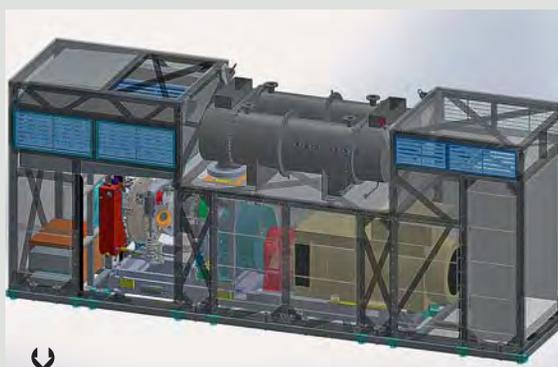
К участию в предстоящей конференции приглашены крупнейшие российские нефтегазодобывающие и перерабатывающие компании – «Газпром» и его дочерние предприятия, «Новатэк», «Газпром нефть», «Газпром переработка», «Газпром СПГ технологии», НК «Роснефть» и др.; крупнейшие поставщики компрессорного и иного оборудования для газовой промышленности – «Невский завод», «Компрессор», «Группа ГМС», НПО «Искра», «Турбохолод», НПФ «ЭнТехМаш» и многие другие. Также примут участие ученые и инженеры отраслевых научно-исследовательских институтов и вузов из г.г. Москвы, Санкт-Петербурга, Казани, Омска.

Основные темы конференции:

- Компрессоры и компрессорное оборудование (подшипники, уплотнения и т.д.)
- Вспомогательное оборудование (запорная арматура, теплообменное оборудование, системы автоматизации и др.)
- Насосное оборудование для ГПА
- Газотурбинные и электрические приводы ГПА
- Технологии изготовления ГПА.

Ученый секретарь конференции – О. А. Соловьёва +7 (911) 171-44-45
e-mail: solovyeva.oa@yandex.ru.

Информация об участии в конференции представлена на сайте <https://CEGTS.spbstu.ru/>.



ЭГТЭС КОРВЕТ-1,0 готов к промышленным поставкам.

МПП «Энерготехника» закончило подготовку серийного производства газотурбинной электростанции ЭГТЭС КОРВЕТ с российским приводом ГТЭА 800 и генератором ГС-1000.

Саратовское предприятие «МПП «Энерготехника» готово поставлять ЭГТЭС КОРВЕТ-1,0 для строительства многоагрегатных электростанций мощностью от 1,0 до 10 МВт.

В настоящее время на предприятии завершена сборка головного образца ЭГТЭС КОРВЕТ-1,0 контейнерного исполнения, который будет установлен на площадке особой экономической зоны Уральского федерального округа. Ввод электростанции в эксплуатацию планируется в текущем году.

Baker Hughes поставит главные холодильные компрессоры для завода СПГ в Катар.

Baker Hughes поставит две основные компрессорные линии для сжижения природного газа для проекта North Field South (NFS), который реализуется компанией Qatargas. Производительность компрессорных линий составит 16 млн тонн в год.

В состав каждой линии войдут три установки Frame 9E DLN для привода шести центробежных компрессоров. Все технологическое оборудование будет изготовлено на предприятии компании Baker Hughes в Италии. Перед поставкой заказчику агрегаты пройдут испытания на стендах изготовителя. Техническое обслуживание и ремонт оборудования будет осуществляться в течение 15 лет специалистами сервисного центра компании в г. Рас-Лаффане, Катар.

Baker Hughes, работающая в Катаре более 45 лет, уже поставила в страну 12 компрессорных линий с газотурбинным приводом. Она располагает в стране тремя сервисными центрами, научно-исследовательским центром, в которых работают более 450 сотрудников.



Конференция по проблемам сохранения ресурса и повышению надежности работы ГТУ

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

In brief

Conference on the problems of service life retaining and improving the reliability of gas turbine plants.

The conference held in May at the site of NPO CKTI, was devoted to improving the efficiency of air treatment at the inlet to the compressor of a gas turbine engine and gas turbine lubricating fluids, reducing operating costs, and improving the reliability of hydraulic systems.

The organizers of the event were NPO CKTI, EMW Filtrtechnik rus LLC and Filtration technical company LLC.

V. E. Mikhailov, General Director of NPO CKTI addressed the participants with a welcoming speech. He noted the importance of the event, a cycle of such annual conferences is planned for the anniversary of the institute.

Конференция, проходившая в мае на площадке ОАО «НПО ЦКТИ», была посвящена повышению эффективности подготовки воздуха на входе в компрессор газотурбинного двигателя и смазывающих жидкостей ГТД, снижению эксплуатационных издержек, повышению надежности гидравлических систем. Организаторами выступили ОАО «НПО ЦКТИ», ООО «ЕМВ Филтратехник рус», ООО «Филтрационная техническая компания».

С приветственным словом к участникам обратился генеральный директор ОАО «НПО ЦКТИ» В. Е. Михайлов. Он отметил важность проводимого мероприятия, к юбилею института планируется цикл подобных ежегодных конференций. Их главная задача – распространение передового опыта в энергетике, а также организация непосредственного общения производителей, поставщиков услуг и эксплуатантов энергетического оборудования.

О влиянии системы фильтрации воздуха на эксплуатационные и ремонтные издержки ГТУ рассказал участникам К. И. Леликов, коммерческий директор ООО «ЕМВ Филтратехник рус». Компания внедряет на российском рынке передовые технологии подготовки циклового воздуха ГТУ, выполняет проектные, инжиниринговые работы, ведет активную исследовательскую деятельность. Докладчик рассмотрел типичные проблемы при работе ГТ,

среди которых дефекты, появляющиеся в турбине, составляют более половины от общей массы возникающих во время эксплуатации проблем.

Рабочие лопатки турбины являются теплообменниками сложной формы. Отложения на лопатках ухудшают охлаждение и приводят к их перегреву и разрушению термобарьерного покрытия. Срок службы лопаток при этом снижается, а объем необходимых ремонтов увеличивается – растут ремонтные издержки. Также снижается производительность и мощность газовой турбины, увеличивается расход топлива. К основным появляющимся дефектам относится прогар направляющей лопатки первой ступени, износ и сколы ТБП, высокотемпературная коррозия.

Компания «ЕМВ Филтратехник рус» выполняет индивидуальное ТЭО проекта, внедряет передовые решения, позволяющие качественно снизить деградацию технических, а следовательно, и экономических характеристик ГТУ в эксплуатации. Применение решений ЕМВ обосновано экономической составляющей, выраженной в экономии для заказчика в долгосрочной перспективе.

В ходе ТЭО анализируется влияние параметров входного воздуха на работу ГТУ в зависимости от уровня влажности, запыленности и иных условий окружающей среды, выполняются технико-экономические расчеты и анализ ТЭП ГТУ, разрабатывается индивидуальное решение с учетом проведенной оценки.

Докладчик отметил, что применение модернизированной системы фильтрации (ФТО Е10) снижает количество наиболее проникающих в проточную часть ГТУ частиц (0,3...0,5 мкм) в 40 раз по сравнению с системой, использующей фильтры F8. На одной из российских ТЭС отклонение мощности ГТУ SGT5-4000F при использовании штатной системы фильтрации (G4+F8) достигало порядка 12 МВт.

С Генеральный директор ОАО «НПО ЦКТИ» В. Е. Михайлов анонсировал цикл новых научных конференций



При использовании системы фильтрации повышенного класса очистки (G2+M6+E11) деградация мощности составила менее 1,5 МВт. Проведенное исследование проточной части продемонстрировало, что загрязнение ВНА отсутствует.

Применение эффективных решений подготовки воздуха турбины SGT5-4000F на Южноуральской ГРЭС позволяет снизить суммарные издержки эксплуатации более чем на 19 млн рублей, при этом отмечены следующие преимущества:

- ресурс СФ увеличился в 2,5 раза;
- полностью исключаются промывки без останова двигателя;
- до одной в год сокращаются промывки остановленного двигателя;
- деградация мощности не более 0,5% в год (за 8000 экв. ч работы);
- перерасход топливного газа не более 1% за последние 21 000 экв. ч.

Переход на ВЭСФ компании «ЕМВ» для КВОУ газотурбинных установок SGT-800 на ГТЭС «Приобская» позволил втрое увеличить срок службы дорогостоящих фильтров тонкой очистки, отказаться от промывок ГВТ турбины. Значительно снизились отклонения технико-экономических показателей работы ГТУ, расширен межремонтный интервал с 20 000 до 30 000 экв. часов.

Опыт применения высокоэффективных КВОУ компании «ЕМВ» в ПАО «Мосэнерго» продемонстрировал увеличение ресурса фильтрующих элементов с одного до двух лет работы. Деградация мощности ГТУ снизилась с 4,3 до 0,5%. Промывки во время работы двигателя исключались, отмечена минимизация перерасхода топливного газа.

Подводя итоги выступления, докладчик подчеркнул комплексный подход компании для оценки состояния компрессора и горячего тракта газовой турбины. Разрабатывается индивидуальное решение для каждого энергообъекта с целью получения максимального результата, масштабирование успешного опыта при поддержке ЦКТИ и других исследовательских организаций. Как результат – сокращение затрат энергокомпаний на ремонт и восстановление запчастей, повышение качества воздухоподготовки.

Современный взгляд на фильтрацию масла представил коммерческий директор ООО «ФТК» С. С. Долгополов. Основной идеей доклада была взаимосвязь чистоты масла и ресурса оборудования, а также способы создания условий эксплуатации, приближенных к идеальным. Докладчик отметил, что действующие российские государственные стандарты значительно



отстают от современных требований оборудования к состоянию масла и от требований аналогичных международных стандартов.

Были рассмотрены основные загрязнения масла: твердые частицы, вода/влаги, шлам и смоляные/лаковые отложения, а также их влияние на работу оборудования. Показаны методы диагностики загрязнений. Также в докладе был затронут вопрос о необходимости фильтрации частиц менее 4 мкм, которые не фиксирует текущий ГОСТ 17216 чистоты промышленных жидкостей.

Фильтрационная компания представила установки микрофильтрации масла, основанные на способности спрессованной целлюлозы к адсорбции. Их использование существенно снижает затраты в условиях роста цен на масла и комплектующие гидравлических систем. Предлагается компактное оборудование для фильтрации масла и сервис под ключ с диагностикой состояния масла и компонентов гидросистемы. В перечень предлагаемых решений входят фильтрующие элементы, картриджи, патроны, мешки, мембраны, самопромывные фильтры, магниты, корпуса, диагностическое оборудование для фильтрации и т.д.

🕒 **О влиянии системы фильтрации воздуха на эксплуатационные и ремонтные издержки ГТУ** рассказал участникам **К. И. Леликов**, коммерческий директор ООО «ЕМВ Фильтртехник рус»

🕒 **Современный взгляд на фильтрацию масла** представил коммерческий директор ООО «ФТК» **С. С. Долгополов**





Обзор продукции ГМС для ГТУ на современном рынке РФ представил И. А. Степанков, руководитель направления «Энергетика» компании «С-Техникс»

В течение двух дней специалисты имели возможность общаться, обсуждать вопросы эксплуатации ГТУ, часто выходящие за рамки обсуждаемых тем. В первый день конференции выступили докладчики, они ответили на вопросы участников мероприятия – дальнейшее общение продолжилось во второй день. Как показывает практика, участникам научно-технических конференций обычно не хватает времени для общения, встреч с достаточным количеством коллег. Данная конференция, благодаря организаторам, полностью удовлетворила все потребности участников в диалоге.

О создании газотурбинных установок ГТЭ-170 и ГТЭ-65 в АО «Силовые машины» рассказал *Н. И. Фокин*, главный конструктор-начальник СКБ ГТУ. По программе НИОКР для обеспечения разработки ГТУ ведутся работы по 154 темам. Принимают участие 59 исполнителей, среди них: ВТИ, ЦИАМ, ЦКТИ, ЦНИИТМАШ, ВИАМ, ОДК, УГАТУ, Самарский университет, СПбГМТУ, СПбПУ, УРФУ и др. Выполняются и находятся в стадии заключения около 60 договоров.

Для обеспечения прочности и ресурса деталей горячего тракта ГТЭ-170.1. выполнены расчеты, подтверждающие прочность и ресурс деталей горячего тракта рабочих и сопловых лопаток турбины, элементов камеры сгорания. Выполнена оценка ресурса по числу пусков, циклов роста трещины, эквивалентных часов.

Ведется разработка техпроцесса и изготовление керамической плитки для облицовки внутренней поверхности жаровой трубы ГТЭ-170, проводятся испытания. Разработана технология и изготавливаются опытные образцы заготовок рабочих лопаток ГТУ, внедряются технологии защитных покрытий лопаток. Выполняется изготовление узлов ГТЭ-170.

Обзор продукции ГМС для ГТУ на современном рынке РФ представил *И. А. Степанков*, руководитель направления «Энергетика», компания «С-Техникс». Докладчик продемонстрировал доли рынка иностранных ГТУ, требования их производителей по выбору смазочного масла. Завод смазочных материалов «ТАИФ-СМ» – первый и единственный производитель полиальфаолефинов (ПАО) в России.

На предприятии осуществляется собственная разработка рецептов смазочных материалов, контроль качества на всех этапах производства, техническая поддержка (контроль качества в период эксплуатации). Ведется тесная работа с производителями оборудования.

Серия турбинных масел TAIF Rave PAO производится предприятием «ТАИФ-Смазочные материалы» на основе отечественных синтети-

ческих базовых компонентов. Завод находится в г. Нижнекамске. Современное оборудование завода позволяет производить базовые масла и смазочные материалы на основе ПАО в промышленных объемах.

О повышении эффективности работы генерирующего оборудования на рынке ОРЭМ рассказал *В. И. Быличкин*, управляющий директор ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз». Тема доклада – «Принципы выбора системы охлаждения циклового воздуха на входе ГТУ и повышение эффективности работы башенных градирен испарительного типа».

Работа энергетической ГТУ существенно зависит от параметров наружного воздуха, таких как давление, влагосодержание и температура. Изменение температуры наружного воздуха оказывает наибольшее влияние на работу ГТУ. При снижении температуры увеличивается плотность воздуха, массовый расход воздуха через компрессор, электрическая мощность ГТУ и электрический КПД. В зависимости от ряда факторов располагаемая мощность может быть значительно ниже, чем установленная, в результате снижается прибыль от работы электростанции в ОРЭМ.

Относительно простое решение, позволяющее снизить потери и не требующее кардинальных конструктивных изменений, – разместить во входном канале воздухозаборного устройства охладитель.

Широкое распространение в мировой практике получила система охлаждения испарительного типа. Вода стекает по пористому материалу, воздух, проходя через материал, охлаждается и насыщается влагой.

Докладчик привел примеры успешной эксплуатации систем охлаждения испарительного типа в составе парогазовых установок в России, рассказал об устройстве, применяемом оборудовании и системах. Например, температура входного воздуха при включении испарительной установки с 23 °С охлаждается до 11 °С. При этом максимальный прирост мощности турбины ГТЭ-160 достигал 11 МВт.

В компании разработана математическая модель, позволяющая производить расчет глубины охлаждения воздуха, расчет мощности ГТУ после системы охлаждения, перерасход газа на ГТУ, связанный с увеличением перепада давления на входе в КВОУ.

Был показан эффект от внедрения установки, он рассчитан с помощью разработанной математической модели. Суммарный годовой эффект от внедрения испарительной установки на ГТУ мощностью 173 МВт, расположенной в центральной части России, составил около 23 млн рублей. Докладчик особо отметил: мн-

ние о том, что данные установки актуальны только для стран с жарким климатом, – миф. Необходимо детально анализировать каждый объект для принятия решения о внедрении данной системы. Компания «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз» готова это сделать для эксплуатантов на базе разработанных моделей и имеющегося опыта.

Практическим подтверждением предыдущего доклада было выступление руководителя проектной службы ПС Фролова А. В. об опыте внедрения систем охлаждения испарительного типа на КВОУ блока ПГУ-450 на ТЭЦ-20 ПАО «Мосэнерго». По данным фактической наработки установки в 2019–2022 гг. выполнен расчет, который показывает окупаемость проекта даже с учетом умеренных температур средней полосы России. В настоящее время подобные установки успешно эксплуатируются на ТЭЦ-12 и ТЭЦ-16 Мосэнерго.

С докладом о современной противообледенительной системе КВОУ энергетической ГТУ с отбором высокотемпературного воздуха выступил ведущий научный сотрудник ОАО «НПО ЦКТИ» П. А. Ермолаев. Он проанализировал типы существующих систем раздачи горячего воздуха ПОС, их достоинства и недостатки.

В ОАО «НПО ЦКТИ» спроектирована новая комбинированная современная система ПОС, с теплообменником и форсунками подачи воздуха для КВОУ газотурбинной установки типа H-100 фирмы Mitsubishi. Она обеспечивает равномерное распределение горячего воздуха с температурой 423 °С по поверхности фильтров без их местного перегрева и гарантирует снижение относительной влажности по всей поверхности фильтров до уровня 80 % для отсутствия условий обледенения без излишнего перегрева воздуха на входе в ГТУ.

Докладчик представил схему системы для установки ее на энергоблоке №1 филиала «Ивановские ПГУ» (Интер РАО-Электрогенерация), рассказал об основных узлах новой комбинированной системы. Представлены основные результаты проекторочного расчета теплообменной поверхности унифицированного модуля раздачи горячего воздуха. Эта система соединяет достоинства двух существующих систем – системы теплообменников и системы высокого давления, исключая их недостатки.

Об эффективности внедрения новых решений в системах фильтрации производства АО «ОДК-Авиадвигатель» рассказал начальник отделения газотурбинных электростанций О. А. Васкецов. Помимо большого количества авиационной продукции, предприятие является лидером в России по созданию

газотурбинных электростанций на базе ГТУ малой мощности. Докладчик представил схему применяемых ВОУ в составе ГТЭС серии «Урал», применяются КВОУ циклонного, а также кассетного типа.

ВОУ циклонного типа обеспечивают очистку воздуха до класса фильтрации F5 по ГОСТ Р ЕН 779-2014 на входе в ГТД, они применялись в составе энергоагрегатов серии «Урал» и ЭГЭС-12С до 2011 года. ВОУ кассетного типа с использованием комбинированной системы фильтрации компании «ЕМВ» обеспечивают класс фильтрации воздуха F9. Воздух проходит очистку в трех ступенях, выполненных на основе современной фильтрационной системы кассетного типа.

Воздухоочистительное устройство оснащено клапанами байпасного типа, которые открываются при предельном значении перепада давления в ступенях очистки. Внутри корпуса ВОУ со стороны всасывания установлен шумоглушитель, обеспечивающий снижение уровня шума до санитарных норм.

Противообледенительная система предотвращает образование льда на элементах ВОУ при работе агрегата в условиях низких температур и повышенной влажности путем подогрева воздуха, проходящего через воздухоочистительное устройство. Докладчик отметил высокую эффективность применения комбинированной системы фильтрации циклового воздуха.

К. Г. Кутергин, директор по развитию АО «Искра-Р», рассказал о применении технологий технического обслуживания динамического оборудования в условиях ограничительных мер. На конференции прозвучали доклады о важности повышения качества эксплуатации и ремонта ГТУ, систем электростанций, о сложностях, которые возникают в случаях отказа ряда иностранных производителей выполнять свои обязательства перед заказчиками. **Д**

Хочется еще раз отметить прикладной характер конференции и предоставленную возможность общения специалистов научно-исследовательских организаций, разработчиков, производителей оборудования и поставщиков услуг с представителями эксплуатирующих организаций.



Газпоршневые установки Jichai для российского рынка

Я. Ю. Сигидов, к.т.н. – АО «Интертехэлектро»

Уход европейских и американских компаний из России создал уникальные возможности для производителей оборудования из Китая. Группа компаний «Интертехэлектро», один из лидеров на рынке российского энергетического инжиниринга, в числе первых объявила о стратегическом сотрудничестве с китайским производителем поршневых двигателей – CNPC Jichai Power Company Ltd.

In brief

Jichai gas engine plants for the Russian market.

The withdrawal of European and American companies from Russia has created unique opportunities for equipment manufacturers from China. Intertechelectro Group of Companies, one of the leaders in the Russian energy engineering market, was among the first to announce strategic cooperation with a Chinese manufacturer of piston engines – CNPC Jichai Power Company Ltd. The agreement signed by the two companies defined the main directions and principles of cooperation in the use and promotion of Jichai products in Russia.

Минувший год стал чрезвычайно сложным для малой энергетики в нашей стране. После введения беспрецедентных по своим масштабам санкций с российского рынка ушли все ведущие поставщики оборудования. Промышленные компании, которые в последние годы активно переходили на собственную генерацию, были вынуждены пересматривать планы по вводу новых мощностей. Из-за проблем с поставкой запасных частей и расходных материалов возникли сложности с эксплуатацией уже построенных объектов.

Уход европейских и американских компаний из России создал уникальные возможности для производителей оборудования из Китая. Группа компаний «Интертехэлектро», один из лидеров на рынке российского энергетического инжиниринга, в числе первых объявила о стратегическом сотрудничестве с китайским производителем поршневых двигателей – CNPC Jichai Power Company Ltd.

Подписанное двумя компаниями соглашение определило основные направления и прин-

ципы сотрудничества в сфере использования и продвижения продукции Jichai в России. В частности, оно предусматривает, что генерирующее оборудование китайской компании станет приоритетным выбором группы «Интертехэлектро» при реализации проектов в области малой и промышленной энергетики. CNPC Jichai окажет необходимую техническую поддержку, обучит персонал компании для проведения пусконаладки и ремонта, обеспечит поставку запасных частей. Кроме этого, стороны изучат возможность локализации оборудования Jichai в России.

Газопоршневые установки Jichai

CNPC Jichai Power Company Ltd. основана в 1920 году и входит в число крупнейших промышленных компаний Китая. Основным направлением ее деятельности является производство двигателей внутреннего сгорания мощностью от 200 до 6300 кВт и компрессорного оборудования. Продукция Jichai широко используется в энергетике, нефтегазовой и химической промышленности, судостроении и поставляется более чем в 60 стран мира.

Номенклатура газопоршневых установок компании Jichai включает модели мощностью от 300 до 4200 кВт, созданные при участии Австрийского университета и научно-исследовательского института AVL List GmbH. Технические характеристики моделей газопоршневых установок CNPC Jichai для российского рынка приведены в табл.

В газопоршневых установках Jichai используются среднеоборотные двигатели с частотой вращения 1000 об/мин. Это позволяет существенно снизить механический износ, повысить надежность и срок службы двигателя. Например, ресурс работы до первого капитального ремонта двигателя H16V190ZLT-2 (модель 1100GF-T мощностью 1100 кВт) составляет



С Испытания газопоршневой установки 4000GF-T для Черногорской ТЭЦ

до 80 тыс. моточасов. Для сравнения: ресурс до капитального ремонта двигателя Jenbacher J320 (мощность 1055 кВт) – 60 тыс. моточасов, а TCG2020V12 (1200 кВт) производства компании MWM – 64 тыс. моточасов;

Все газопоршневые установки мощностью от 400 до 4200 кВт оснащены бесщеточными синхронными генераторами с автоматическим регулированием напряжения (AVR), изготовленными в Китае по лицензии Siemens (Германия). По желанию заказчика поставляемые в Россию установки могут комплектоваться генераторами других производителей (Leroy-Somer, ABB и пр.). Генераторы являются двухпоршнями, коленвал двигателя и вал ротора генератора соединяются посредством упругой муфты.

Для двигателя мощностью 1100 кВт объем заменяемого масла составляет 430 литров. Анализ качества моторного масла осуществляется через каждые 1500 часов работы. В процессе эксплуатации газопоршневого двигателя происходит угар масла, удельный расход масла на угар составляет 0,2 г на 1 кВт·ч произведенной электроэнергии на обкатанной машине и до 0,5 г/кВт·ч на новой машине. В связи с этим необходим постоянный долив моторного масла, для которого используется система автоматического долива с клапанами объемом 250 литров.

Установки Jichai на Черногорской ТЭЦ

Первым крупным объектом, на котором будут работать газопоршневые установки Jichai, станет Черногорская ТЭЦ, строительство которой ведет группа «Интертехэлектро». Электростанция мощностью 96 МВт обеспечит энергией производственные объекты будущего горно-обогатительного комплекса на базе Черногорского месторождения медно-никелевых руд, расположенного в 15 км от г. Норильска (Красноярский край). Всего



С В ходе длительных испытаний на стенде компании Jichai энергоблок 4000GF-T полностью подтвердил все заявленные производителем параметры

на электростанции будут смонтированы 24 газопоршневые установки ITE 4000 G мощностью по 4 МВт. Они заменят газовые турбины компании Siemens, отказавшей из-за введения антиросийских санкций поставлять оборудование по ранее заключенному контракту.

Установка ITE 4000 G состоит из газопоршневого двигателя Jichai 16V26/32T и генератора переменного тока Leleisemar со вспомогательным оборудованием. Двигатель – 16-цилиндровый, V-образный, четырехтактный, с прямым впрыском и наддувом. Рабочий объем двигателя составляет 272 литра, запуск осуществляется от пневматического стартера. Топливом является природный газ, расход газа на мощности 3800 кВт составляет 1000 м³/ч.

Охлаждение двигателя – жидкостное. В системе охлаждения используется горизонтальный двухконтурный радиатор, имеющий небольшой вес и высокую эффективность.

Табл. Технические характеристики газопоршневых установок Jichai

Серия	Модель ГПУ	Модель двигателя	Мощность, кВт	Модель генератора	Частота вращения, об/мин	Напряжение, кВ	Размеры ГПУ ДхШхВ, мм	Масса, кг
140 Series	300GF30-T	JC15D/T	300	XN5C series	1500	0,4/6,3/10,5	3701x1345x1701	3900
2000 Series	500GF-T3	G12V190ZLDT-2	500	1FC series	1000		5925x2184x2870	13800
4000 Series	1200GF-T	L12V200ZLT-2	1200	GPL1200	1000		7900x2300x2800	20600
	2000GF10-T	L20V190ZL	2000	JFG Series	1000		9093x3786x2786	28000
6000 Series	1100GF-T	H16V190ZLT-2	1100	по проекту	1000		6520x2180x2540	19800
	1100GF1-T	H16V190ZLT-2	1100	JFG Series	1000		6520x2180x2540	20500
2632 Series	3000GF-T	12V26/32T	3000	по проекту	1000		8330x2930x3638	48000
	4000GF-T	16V26/32T	4000	по проекту	1000		9435x2930x4175	70000

Система смазки автоматически поддерживает уровень масла в картере двигателя во время его работы.

Генератор переменного тока – трехфазный, четырехполюсный, номинальное напряжение 6,3/10,5 кВ, номинальная частота 50 Гц. Частота вращения и напряжение генератора регулируются автоматически, с помощью электронной системы контроля скорости и системы возбуждения.

Габаритные размеры установки 4000GF70-T (ДхШхВ) составляют 9430х2930х4175 мм, масса – 70 тонн.

Применение газопоршневых установок на Черногорской ТЭЦ повысит маневренность электростанции, обеспечит более плавное распределение нагрузки и позволит выстроить оптимальный график технического обслуживания. Газопоршневые установки китайского производства будут использоваться на российской электростанции такой мощности впервые.

В настоящее время ГПУ для Черногорской ТЭЦ проходят испытания на заводе-изготовителе. Они включают тестирование двигателя в течение 24 часов, испытания на соответствие основным техническим характеристикам, запись параметров работы двигателя под нагрузкой 0...100 %, измерение уровня шума, уровня эмиссии, определение максимально допустимого сопротивления выхлопной системы. Поставка первой установки Jichai для Черногорской ТЭЦ в Россию планируется в июне текущего года.

Инжиниринговая группа компаний «Интертехэлектро»

Группа «Интертехэлектро» с 2001 года участвует в реализации инвестиционных проектов по строительству и реконструкции объектов энергетики и промышленности, включая весь комплекс проектных, строительномонтажных и пусконаладочных работ, поставку оборудования и автоматизацию технологических процессов.

В числе заказчиков группы «Интертехэлектро» крупнейшие энергетические и промышленные компании России, для которых были успешно реализованы проекты строительства и реконструкции объектов, в том числе в рамках программы ДПМ (НК «Роснефть», «ИнтерРАО», «Русгидро», «Т Плюс», «Фортум», ФСК «ЕЭС» и др.).

С 2016 года группа «Интертехэлектро» активно развивает собственное производство энергетического оборудования. Входящий в состав группы Курганский завод комплексных технологий (КЗКТ) выпускает модульные электростанции на базе газопоршневых и дизельных двигателей, газодожимные и компрессорные станции, модульные котельные, электротехнические модули, оборудование для сортировки и утилизации твердых коммунальных и бытовых отходов. Производственные площади завода располагаются на площадке индустриального парка в г. Кургане.

Для обеспечения технического обслуживания и ремонта оборудования в компании «Интертехэлектро» создана собственная сервисная служба. В ее составе опытные специалисты, прошедшие углубленное обучение на предприятиях-изготовителях генерирующего оборудования и имеющие соответствующие сертификаты и авторизованные права для проведения эксплуатационных, оперативных и сервисных операций любой сложности.

Общая численность службы в настоящее время составляет более 120 сотрудников, среди которых сервисные инженеры, эксплуатирующий и диспетчерский персонал, специалисты по запасным частям, гарантии, системам удаленного мониторинга.

Среди работ, проводимых специалистами сервисной службы, – выездная диагностика и инспекция оборудования, техническое обслуживание, текущие и капитальные ремонты, в том числе на месте, а также эксплуатация энергообъектов и обучение персонала заказчика. Кроме того, компания осуществляет поставки запасных частей и расходных материалов с собственного склада. **TD**



TD Подписание соглашения между китайским производителем поршневых двигателей – CNPC Jichai Power Company Ltd.

Для спортивно-стрелкового комплекса «Лисья нора» введена ГТЭС.

Генподрядчиком строительства ТЭС в Московской области выступила компания «Арман Энерго». Основой станции являются семь установок С65 мощностью по 65 кВт со встроенными утилизаторами. Общая электрическая мощность ТЭС составила 455 кВт, тепловая – 1 400 кВт. В качестве топлива используется природный газ высокого давления.

Режим работы станции – резервный, на изолированную нагрузку 0,4 кВ, в том числе параллельно с существующими дизельными энергоблоками. Уровень эмиссии NO_x микротурбин С65 составляет менее 19 мг/м³, СО – менее 50 мг/м³.

Оборудование станции располагается в специально построенном здании на территории спортивного комплекса. ГТЭС полностью обеспечит собственные потребности комплекса в электрической и тепловой энергии.

Крупнейший спортивно-стрелковый комплекс «Лисья нора» построен в п. Игнатово Дмитровского района. На его территории более 20 площадок для спортинга, расположенных в естественных природных условиях.

Gas turbine power station has been commissioned for the Fox Hole sports and shooting complex.

The general contractor for the construction of the station in the Moscow region was Arman Energy. The station consists of seven C65 micro-turbine plants rated at 65 kW each with built-in WHB. The total electric power of the station is 455 kW, thermal output is 1,400 kW. High-pressure natural gas is used as fuel. The station operates in standby mode for an isolated load of 0.4 kV in parallel with existing diesel power plants. The NO_x emission level of microturbines C65 is less than 19 mg/m³, CO – less than 50 mg/m³.



Mitsubishi Power поставила газотурбинные энергоблоки на Ташкентскую ТЭЦ.

Контракт на поставку двух газотурбинных установок H-25 мощностью по 32 МВт заключен с АО «Ташкентская ТЭЦ», которая является собственником и оператором станции. Генподрядчиком по строительству электростанции когенерационного цикла выступает турецкая компания Calik Energy. Основным топливом для ГТУ является природный газ.

С вводом оборудования увеличится мощность Ташкентской ТЭЦ, ежегодно будет дополнительно производиться 515,6 млн кВт.ч электрической и 690,3 тыс. Гкал тепловой энергии. За счет применения ГТУ ежегодная экономия газа составит 219 тыс. м³, выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду снизятся на 200,5 т/год. Проект по строительству электростанции реализуется при поддержке Японского агентства по международному сотрудничеству (JICA). Ввод станции в коммерческую эксплуатацию запланирован на 2024 г.

Газопоршневая электростанция введена в г. Степанакерте, Армения.

Компания 2G-Station поставила в г. Степанакерт контейнерную газопоршневую установку avus 500 plus простого цикла электрической мощностью 523 кВт, КПД 42,6 %.

ГПЭС создана на базе двигателя ajenitor 412 компанией 2G Energy, топливо – природный газ. Станция будет обеспечивать электрической энергией заправочную станцию в Степанакерте (высота 850 м над уровнем моря). Уровень выбросов парниковых газов ГПУ avus 500 plus составляет 2327 тонн/год – это чрезвычайно низкий показатель.

Пусконаладочные и шефмонтажные работы на электростанции завершены, оборудование введено в эксплуатацию.

КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ГАЗОВЫХ И ПАРОВЫХ ТУРБИН

Siemens
General
Electric
Dresser Rand
Pratt & Whitney
Rolls Royce

Максимальная эффективность очистки

TURBO-K 1:4

Масла: AEROSHELL, Eastman, Total, Shell, Mobil

Alstom
Kawasaki
Ansaldo Energia
Solar Turbines
Mitsubishi
Centrax

ЗАО "Росма" - поставщик оригинальной продукции в РФ и странах СНГ
www.rosma.ru, тел. +7 (831) 277-38-77

РЕКЛАМА

Модернизация газопоршневых установок производства АТР

А. И. Архипова – ООО «Мотортех»

Сегодня в России, с уходом с отечественного рынка оригинального газопоршневого оборудования европейских и американских брендов, достойной альтернативой стали азиатские производители ГПУ, оперативно «подхватившие» оставленные проекты отечественных агрегирующих компаний.

В связи с этим возникают закономерные вопросы: во-первых, почему на протяжении нескольких десятилетий продукция данных производителей не могла конкурировать с западными брендами и, во-вторых, как отечественному потребителю подготовиться к эксплуатации оборудования, поставляемого из Азиатско-Тихоокеанского региона.

В качестве ответа на первый вопрос можно отметить основные «минусы» ГПУ азиатских производителей относительно привычных для нас западных аналогов:

- низкая степень автоматизации;
- небольшой моторесурс основных компонентов;
- отсутствие полноценной технической документации;
- низкая доступность ЗИП;
- отсутствие технической поддержки.

Конечно, этот список можно продолжить, но, на наш взгляд, этого достаточно, чтобы обосновать проблемное использование поставляемых ГПУ для работы в базовом режиме на номинальной мощности в нашей стране за последние два-три десятилетия.

На второй вопрос существует ответ: нужно заранее устранить «минусы», отмеченные выше. Для каждого из обозначенных пунктов есть решение:

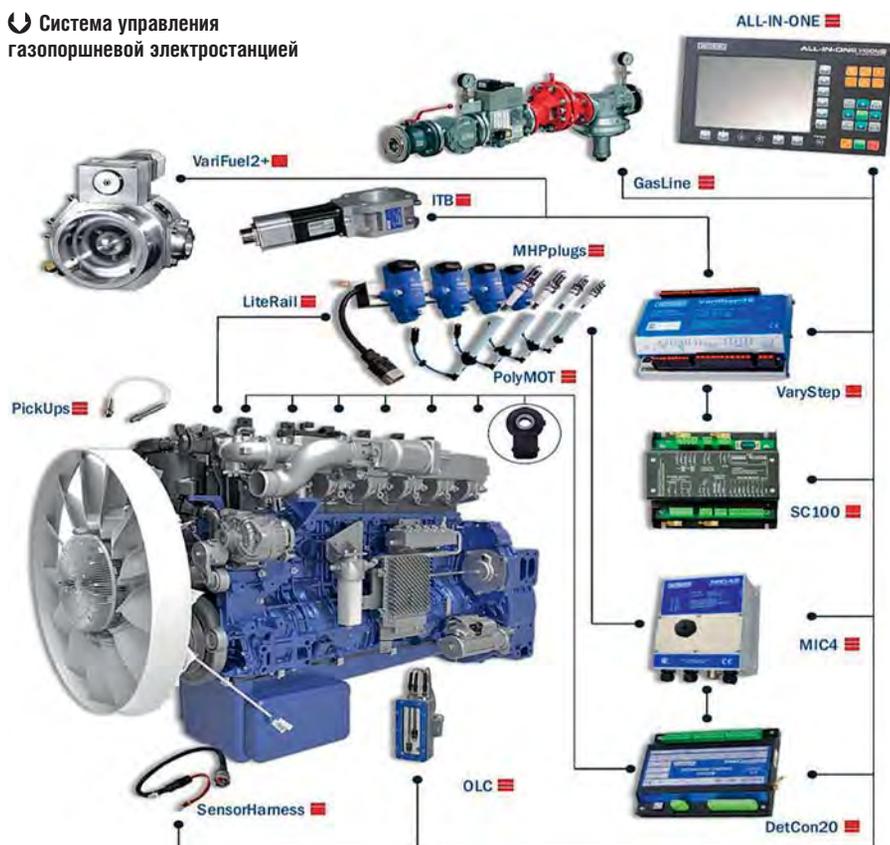
- заменить систему управления ГПУ на привычные западные аналоги, но с применением отечественного программного обеспечения (подобное решение представлено на рис.);

- чтобы увеличить моторесурс двигателей, нужно обеспечить правильную настройку автоматики и, самое главное, контроль большого количества параметров, что позволит сократить количество отказов и продлить срок службы оборудования на 20–30 %;
- взаимодействовать с производственными компаниями, способными методом обратного инжиниринга разработать необходимую документацию на оборудование;
- приобрести полный комплект ЗИП с необходимым дублированием критических позиций для капитального ремонта одновременно с основным энергетическим оборудованием;
- использовать полный комплект новой автоматики, тесно взаимодействуя в области технической поддержки с компанией-интегратором;
- заключать длительные договоры на обслуживание с отечественными сервисными компаниями.

В сложившихся сегодня условиях нужно трезво оценивать ситуацию. И если за год масштабного присутствия азиатских производителей на нашем рынке энергетического оборудования не удалось устранить технологическое отставание от западных конкурентов, то сейчас для них в этом нет необходимости – в отсутствие альтернативы потребитель будет вынужден покупать оборудование предлагаемого качества.

Однако и из данной ситуации существует выход. Как известно, часть западного оборудования попадает в страну обходными путями, а у нас достаточно специалистов для обслуживания этой техники. Кроме того, отечественные инжиниринговые компании активно разрабатывают технические решения для производства оборудования с необходимыми характеристиками и показателями «из того, что имеется», и, на наш взгляд, именно за такими решениями будущее развитие отрасли. **Д**

Система управления газопоршневой электростанцией



XXVI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

31 ОКТЯБРЯ - 3 НОЯБРЯ 2023

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ЭКСПОФОРУМ

**РОС
ГАЗ
ЭКСПО**



В РАМКАХ XII ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕЖДУНАРОДНОГО
ГАЗОВОГО ФОРУМА

РЕКЛАМА



ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА:



www.rosgasexpo.ru



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЕ МЕЖДУНАРОДНОЕ ГАЗОВОЕ ОБЩЕСТВО

Стационарные осевые компрессоры производства Невского завода (АО «НЗЛ»)

В. К. Юн, д.т.н. – генеральный конструктор, АО «НЗЛ», V.Yun@reph.ru

Е. И. Давлетгареева – ведущий инженер-конструктор, АО «НЗЛ», ek.davletgareeva@reph.ru

А. А. Лысякова, к.т.н. – ведущий конструктор проекта, АО «НЗЛ», a.lysyakova@reph.ru

Ключевые слова:

стационарный осевой компрессор, лопаточный аппарат, изолированный профиль, продувка плоских решеток, модельная ступень, CFD-расчет

Аннотация

Осевой компрессор обычно состоит из ряда последовательно расположенных ступеней. Соединение осевых ступеней в компрессоре обеспечивает достаточную прямолинейность проточной части, что способствует получению высокого КПД по сравнению с центробежными компрессорами. Условия работы ступени в группе отличаются от условий работы изолированной ступени. Предыдущие ступени создают определенную нестационарность потока, что изменяет обтекание последующих ступеней, влияет на их напорность и КПД. При проектировании проточной части воздушных осевых компрессоров общепромышленного назначения преимущественно используется метод расчета лопаточного аппарата, разработанный в Центральном научно-исследовательском и проектно-конструкторском котлотурбинном институте им. И.И. Ползунова. Однако при ограниченном выборе испытанных колес не всегда

имеется возможность спроектировать новый компрессор на заданные параметры. Учитывая недостаточный объем теоретических и экспериментальных материалов, следует руководствоваться методами проектирования, которые позволяют либо полностью использовать имеющийся прототип по методам теории подобия, либо использовать накопленный ранее опыт испытания проточных частей с введением в них возможно меньших изменений.

Таким образом, совершенствование существующей методики расчета проточных частей с целью создания новых высокоэффективных осевых компрессоров является актуальным вопросом.

В данной работе представлены результаты CFD-расчета течения газа в лопаточном аппарате двухступенчатого осевого нагнетателя. Рассчитанные параметры потока сопоставлены с данными, полученными при испытаниях.

Stationary axial compressors manufactured by Nevsky Zavod JSC

V. K. Yun, Doctor of Engineering Science – General Designer, Nevsky Zavod JSC, V.Yun@reph.ru

E. I. Davletgareeva – Leading Design Engineer, Nevsky Zavod JSC, ek.davletgareeva@reph.ru

A. A. Lysyakova, Candidate of Engineering Science – Leading Project Designer, Nevsky Zavod JSC, a.lysyakova@reph.ru

Key words:

stationary axial compressor, row of blades, insulated profile, purging of flat gratings, model stage, CFD calculation

Abstract

An axial compressor usually consists of a series of sequentially arranged stages. The connection of the axial stages in the compressor is very simple and provides sufficient straightness of the flow part, which contributes to high efficiency compared to centrifugal compressors.

The working conditions of a stage in a group differ from the working conditions of an isolated stage. The previous stages create a certain unsteadiness of the flow, which changes the flow around the subsequent stages, affects their pressure and efficiency.

When designing the flow part of air axial compressors for general industrial purposes, the method of calculating the blade unit developed at the Central Research and Design Institute of Boiler Turbine named after I. I. Polzunov is mainly used. However, with a limited selection of tested wheels, it is not

always possible to design a new compressor for the specified parameters.

Given the insufficient amount of theoretical and experimental materials, one should be guided by design methods that allow either to fully use the existing prototype according to the methods of similarity theory, or to use the previously accumulated experience of testing flow parts with introduction minimum possible changes requiring additional tests. Thus, improving of existence design methods of flow parts with the aim of design brand new high efficiency axial compressors is a topical issue.

This article presents the results of CFD-calculations of gas flow in the blade unit of a two-stage axial compressor. Calculated flow parameters are compared with the test ones.

До сих пор рассматривались данные по испытанию профилей, решеток и отдельных ступеней. Осевой компрессор обычно состоит из ряда последовательно расположенных ступеней. Соединение осевых ступеней в компрессоре осуществляется весьма просто и обеспечивает достаточную прямолинейность проточной части, что способствует получению высокого КПД по сравнению с центробежными компрессорами. В ступени осевого компрессора может быть достигнута степень сжатия 1,35...1,4. Для достижения степени сжатия 3 и более проточная часть компрессора должна состоять из 10 и более ступеней, в зависимости от его типа и назначения.

Условия работы ступени в группе отличаются от условий работы изолированной ступени. Предыдущие ступени создают определенную нестационарность потока, что изменяет обтекание последующих ступеней, влияет на их напорность и КПД. Одновременно следует учитывать некоторое увеличение пограничного слоя по длине компрессора на кольцевых поверхностях.

При проектировании проточной части (лопаточного аппарата) воздушных осевых компрессоров общепромышленного назначения преимущественно используется метод расчета лопаточного аппарата, разработанный в Центральном научно-исследовательском и проектно-конструкторском котлотурбинном институте им. И. И. Ползунова. Однако при ограниченном выборе испытанных колес не всегда имеется возможность спроектировать новый компрессор на заданные параметры.

Учитывая недостаточный объем теоретических и экспериментальных материалов, при проектировании осевых компрессоров следует руководствоваться методами, которые позволяют либо полностью использовать имеющийся прототип по теории подобия, либо использовать накопленный ранее опыт испытания проточных частей, избегая изменений, нуждающихся в дополнительной опытной проверке. Таким образом, совершенствование существующей методики расчета проточных частей с целью создания новых высокоэффективных осевых компрессоров является актуальным вопросом.

В данной работе представлены результаты CFD-расчета течения газа в лопаточном аппарате двухступенчатого осевого нагнетателя. Рассчитанные параметры потока сопоставлены с данными, полученными при испытаниях.

В конце 1990-х годов обнаружилась острая необходимость в замене физически и морально устаревшего воздухоудвигного оборудования

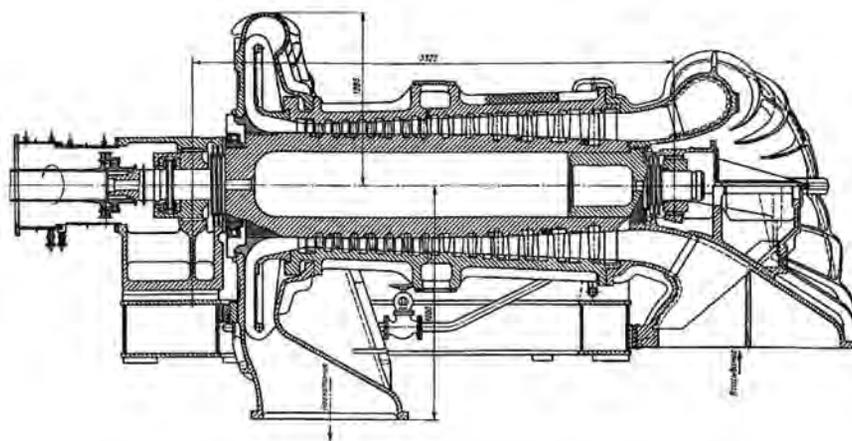


Рис. 1.
Продольный разрез
компрессора К-3750/4,7

на металлургических заводах. РЭП Холдингом были получены технические задания на ряд осевых компрессоров. Параметры, которые должны обеспечить компрессоры, приведены в табл. 1.

Для того чтобы конструктор мог создавать высокоэффективные осевые компрессоры, в его распоряжении должен быть надежный метод расчета проточной части на основной и дополнительные режимы работы. Расчет осевых компрессоров при проектировании можно произвести тремя методами:

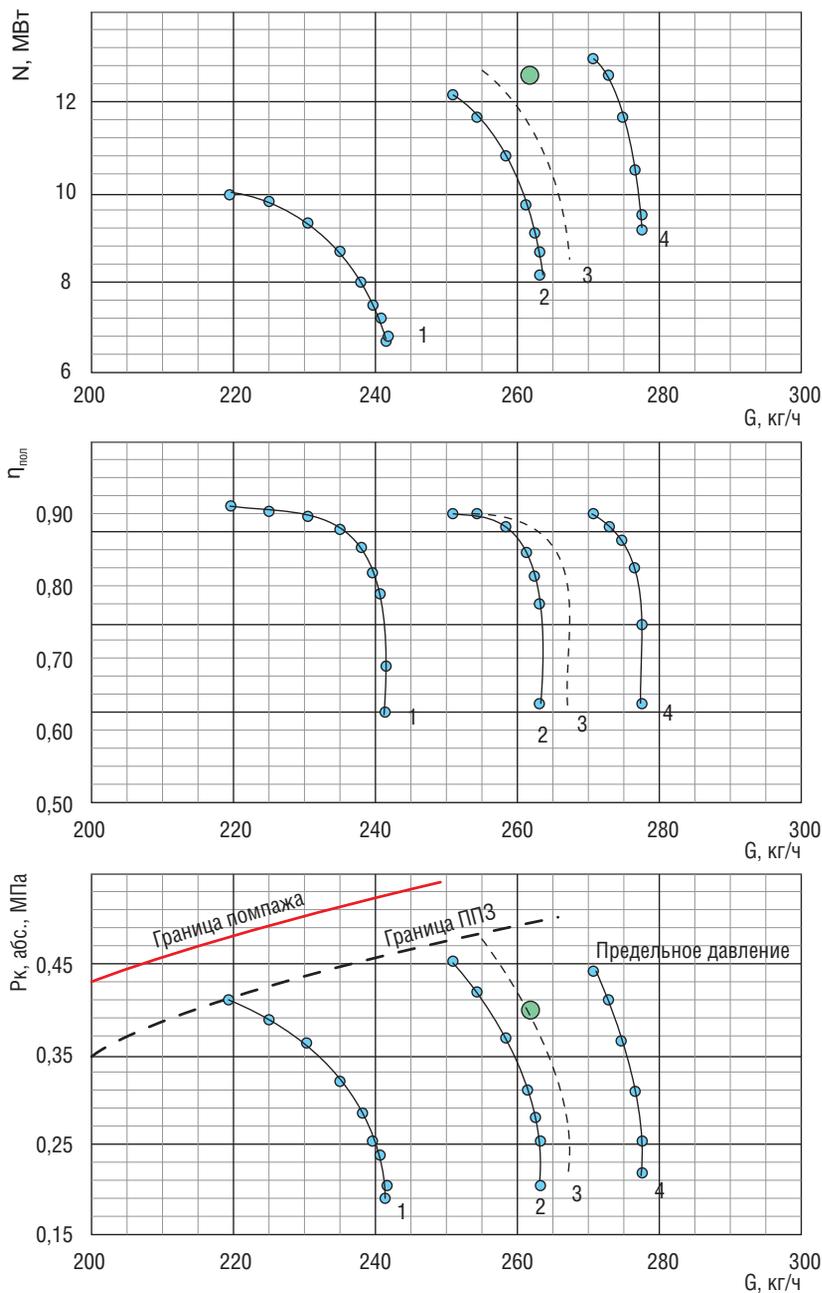
- на основе данных экспериментального исследования изолированного профиля;
- на основе продувок плоских решеток в аэродинамических трубах;
- используя испытания модельных ступеней.

Табл. 1.
Проектные параметры
осевых компрессоров

Тип осевого компрессора	К-3750/3,8	К-3750/4,7	К-4950/4,5	К-4950/5,5
Объем доменной печи, м ³	1300...1400	1300...1400	2000	2000
Проект	Факт.	Перспект.	Факт.	Перспект.
Производительность максимальная при P=0,1013 МПа и t=0°C, м ³ /мин	2963	3242	3885	4258
Производительность минимальная при P=0,1013 МПа и t=0°C, м ³ /мин	2143	2516	2516	2982
Способ регулирования	Частота вращения	-	-	-
Начальное давление, МПа	0,098	0,098	0,098	0,098
Начальная температура, К	253...303	253...303	253...303	253...303
Объемный расход максимальный, м ³ /мин	3430	3750	4500	4930
Объемный расход минимальный, м ³ /мин	2050	2410	2860	2860
Тип осевого компрессора	К-3750/3,8	К-3750/4,7	К-4950/4,5	К-4950/5,5
Давление нагнетания, МПа	0,37	0,46	0,44	0,54
Частота вращения, об/мин	– максимальная	5400	5400	5250
	– минимальная	3900	3900	4600
Мощность на муфте максимальная, МВт	12,2	14,8	16,6	22,1
Тип приводной паровой турбины	П-16-3,4	П-16-3,4	П-23-8,8	П-23-8,8

Первый метод расчета предложил профессор К. А. Ушаков (Центральный аэрогидродинамический институт – ЦАГИ). Экспериментальные данные испытания изолированного профиля применяются лишь для расчета низконапорных вентиляторов с редкой решеткой [1, 2]. Согласно этому методу, в качестве исходного профиля для лопаток вентилятора выбирается хороший крыловой или винтовой профиль, аэродинамические характеристики которого, полученные опытным путем, известны.

Рис. 2.
Характеристики компрессора К-3750/4,7



Частота вращения ротора, об/мин:
1 - 4300; 2 - 4580; 3 - 4650; 4 - 4770
● - опытные точки

Условия воздуха на входе:
Давление, абс. $P_H = 0.1$
Температура $T_H = 24$ °C

N – мощность, МВт; $\eta_{пол}$ – политропный КПД; P_k – конечное давление абс., МПа,
 G – массовая производительность, кг/ч

Применение такого метода сейчас для расчета высоконапорных компрессоров нецелесообразно в связи с малой точностью расчета при достаточно густой решетке, когда сказывается взаимное влияние профилей в решетке.

Метод расчета компрессоров на основе испытания плоских решеток, разработанный А. Ховеллом, В.Г. Процеровым и Л.Е. Ольштейном и углубленный К.В. Холщевниковым, получил название «метод плоских решеток» [3, 4]. Он основан на использовании экспериментальных данных продувок неподвижных решеток профилей в аэродинамических трубах. Предполагается, что характеристики данной решетки такие же, как и у соответствующей решетки, образованной цилиндрическим сечением при вращении.

Достоинством данного метода являются простое экспериментальное оборудование и возможность проектировать компрессоры на самые разные параметры. Недостаток – трудность точного учета влияния физических явлений, возникающих в пространственной вращающейся решетке (пространственный характер потока, действие центробежных сил, взаимное влияние решеток в ступени, конце выявления и т.д.). Для учета этих факторов в методике вводятся поправочные коэффициенты. Сходимость расчетных и получаемых натуральных данных для номинального режима достаточно хорошая, но при нерасчетных режимах расходимость результатов резко увеличивается. Поэтому на практике чаще всего требуется доводка спроектированных по данному методу ступеней и компрессоров.

Еще один метод расчета осевых компрессоров основан на результатах испытаний изолированных модельных ступеней, а также на данных исследования взаимного влияния ступеней на многоступенчатых компрессорах – «метод Центрального котлотурбинного института» (ЦКТИ) [5, 6, 7]. Достоинством этого метода является получение экспериментальных характеристик изолированной ступени, учитывающих все особенности работы реальной одиночной ступени; недостаток – необходимость сооружения дорогого экспериментального оборудования и длительность отработки модельной ступени. При ограниченном выборе испытанных колес не всегда имеется возможность спроектировать компрессор на заданные параметры.

Учитывая недостаточный объем теоретических и экспериментальных материалов, которые можно применять для проектирования новых осевых компрессоров, следует отдать предпочтение методам, позволяющим либо полностью использовать имеющийся прототип

по методам теории подобия, либо использовать накопленный ранее опыт испытания проточных частей, вводя в них как можно меньше изменений, нуждающихся в дополнительной проверке.

В соответствии с техническим заданием все осевые компрессоры, проектируемые АО «НЗЛ», должны обеспечивать экономичную работу в двух зонах эксплуатационных режимов, отличающихся номинальным значением производительности на 15 % и конечным давлением на 20 %.

Для каждого осевого компрессора предусматривалось выполнение модификаций как на существующие фактические параметры дутья, так и на перспективные, с увеличением рабочего давления. При проектировании за основу были приняты перспективные режимы, модификации для фактических режимов были получены за счет удаления первых или последних ступеней, с возможностью модернизации компрессоров на месте эксплуатации.

Первым из ряда спроектированных компрессоров является 13-ступенчатый компрессор К-3750. Продольный разрез К-3750 приведен на рис. 1, характеристики – на рис. 2. Модификация на фактические режимы выполняется без 1-й ступени. Головной образец компрессора К-3750 был изготовлен в сентябре 1988 года и испытан в обеих модификациях на стенде завода. После монтажа в НПО «Тулачермет» и приемочных испытаний с участием представителей АО «Центроэнергочермет» и ЦКТИ им. И.И. Ползунова компрессор находится в эксплуатации с марта 1990 года.

Эти агрегаты эксплуатируются также на Челябинском и Запорожском металлургических комбинатах. Агрегат с 9-ступенчатым вариантом компрессора К-3750/3,3 с 2002 года работает в установке каталитического крекинга на Мозырском нефтеперерабатывающем заводе. С 2020 года была проведена модернизация осевого компрессора К-3750/3,3 до степени сжатия 5, при этом восстановили число ступеней до 12.

С целью реализации компрессора К-4950 с наименьшими производственными затратами был спроектирован базовый лопаточный аппарат, из которого выбиралось требуемое сочетание ступеней для каждой модификации. Первые 6 ступеней выполнены с поворотными направляющими лопатками. Исследования и отработка лопаточного аппарата производились на экспериментальной модели в масштабе 1:2, на которой помимо газодинамических исследований также выполнялась оптимизация углов поворота НА по ступеням и проводилась проверка вибрационной прочности лопаток.

Рис. 3.

Продольный разрез компрессора К-4950/5,5

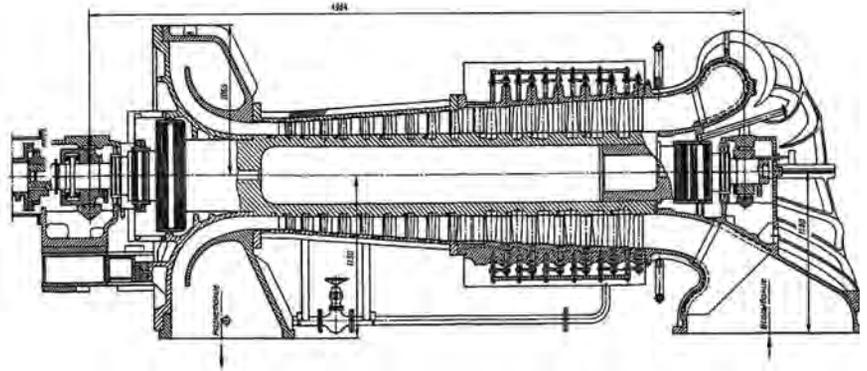


Рис. 4.

Характеристики компрессора К-4950/5,5

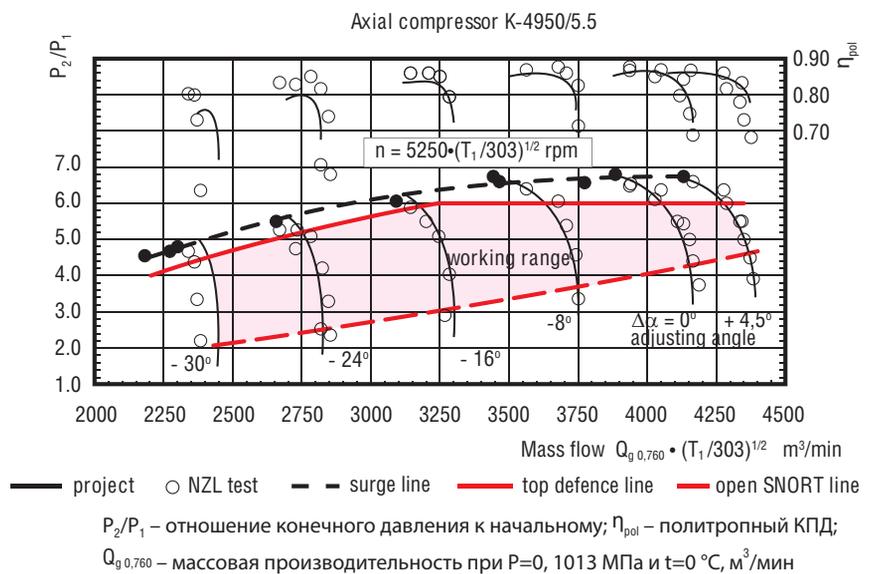


Рис. 5.

Сводная диаграмма рабочих режимов осевых компрессоров АО «НЗЛ»

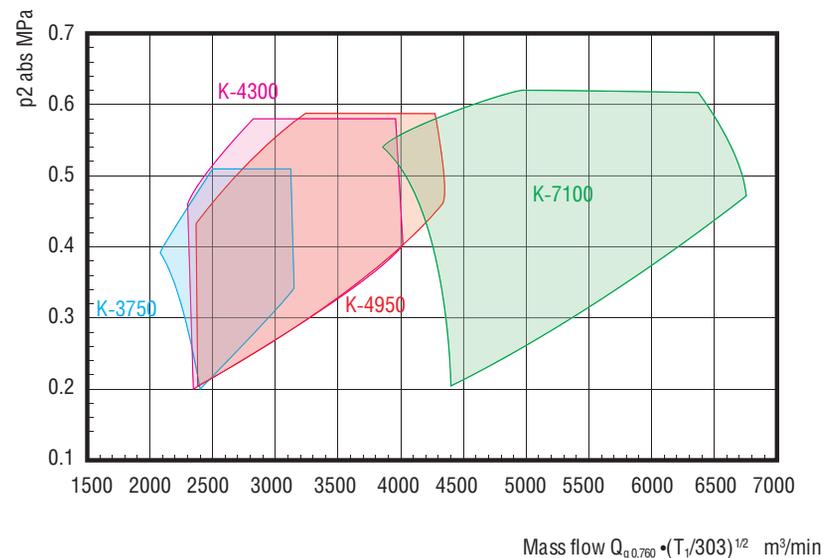
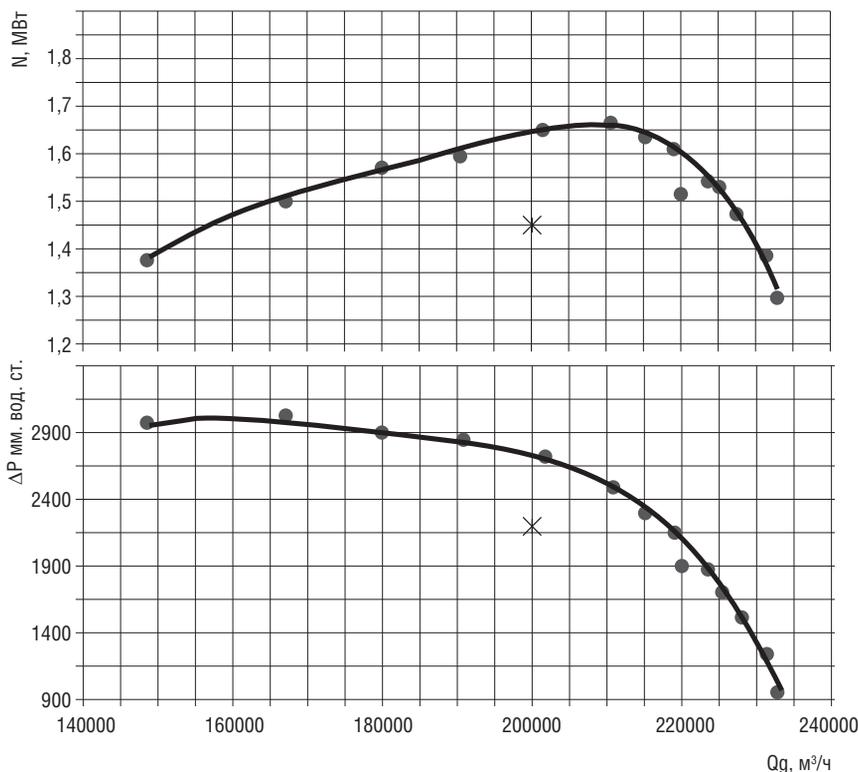


Рис. 6.
Осевой нагнетатель 3400-21-1



Рис. 7.
Осевой нагнетатель 3400-21-1



- По результатам испытаний 29.05
- ✕ Точка по техническому заданию
- По результатам испытаний 25.05

Условия приведения:

$T_{н0}=293\text{ K}$
 $n=3000\text{ об/мин}$

$zR_0=288,4\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$
 $P_{н0}=0,98\text{ МПа}$

Головной образец компрессора К-4950 был изготовлен в 1996 году и испытан в обеих модификациях на стенде завода. Модификация на фактические режимы выполнялась без двух последних ступеней.

Продольный разрез 15-ступенчатого компрессора К-4950 приведен на рис. 3, характеристики – на рис. 4. В декабре 2006 г. головной образец агрегата сдан в эксплуатацию на ЗСМК (г. Новокузнецк). Компрессор К-4300 отличается от К-4950 удалением первой ступени и добавлением концевой ступени. Модификация на фактические режимы выполняется без двух последних ступеней.

Эскизный проект компрессора К-7100 был выполнен на частоту вращения 3000 ± 150 об/мин в связи с требованием заказчика располагать также паровой турбиной мощностью 35 МВт для привода электрогенератора. Исследования и отработка лопаточного аппарата К-7100 с поворотом НА первых 5 ступеней также производились на экспериментальной модели в масштабе 1:3 с изучением проблем, аналогичных К-4950. Модификация на фактические режимы выполняется без двух последних ступеней.

Все осевые компрессоры прошли испытания на стенде предприятия, в ходе которых помимо проверки механики и газодинамики определялись границы помпажа и производилась тарировка расхода по перепаду на конфузоре всасывающего патрубка. Эти результаты используются для реализации противопомпажной защиты в автоматической системе контроля и управления (АСКУ). АСКУ обеспечивает продолжительную работу на любом режиме в пределах от линии открытого ШОРТа до линии предельной защиты (противопомпажной защиты и предельного давления) и границ углов поворота направляющих лопаток.

При регулировании частоты вращения компрессора по эквивалентной скорости линия предельной защиты реализуется в универсальных координатах, инвариантных к условиям всасывания (температуре и давлению). В АСКУ противопомпажная защита осуществляется перепуском части сжимаемого газа на всасывание через противопомпажный клапан на такую величину, чтобы обеспечить режим работы компрессора на линии настройки противопомпажной защиты. Автоматическое регулирование предельного давления осуществляется поворотными лопатками компрессора, снижая расход через компрессор. Особенностью данных компрессоров было отсутствие промежуточного охлаждения, что позволило уменьшить суммарный расход топлива в подсистеме «сжатие-нагнетание» и снизить затраты на охлаждающую воду.

Еще одной особенностью спроектированных компрессоров была необходимость регулирования массовой производительности в широком диапазоне ($G_{\text{мин}}/G_{\text{макс}} = 0,65..0,70$) при постоянном конечном давлении. С учетом изменения температуры атмосферного воздуха в пределах от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и необходимого запаса устойчивости требуемый диапазон объемной производительности составил величину $Q_{\text{помп}}/Q_{\text{макс}} = 0,48$. На рис. 5 приведена сводная диаграмма областей рабочих режимов осевых компрессоров, которая показывает, что удовлетворяются все потребности дутья для доменных печей объемом от 1300 до 3000 м³.

Применение осевых компрессоров позволило уменьшить массу компрессора по сравнению с ранее используемыми центробежными компрессорами в 2,5...3 раза при одновременном снижении потребляемой мощности. Газодинамические испытания полностью подтвердили высокую эффективность компрессоров, а тензометрирование лопаточного аппарата – качественную отстройку от возможных резонансов.

Накопленный ранее опыт проектирования и испытания проточных частей осевых компрессоров позволяют разрабатывать новые осевые компрессоры. Так, в 2018 году в АО «РЭПХ» был изготовлен воздушный осевой нагнетатель 3400-21-1, предназначенный для подачи атмосферного воздуха в систему вентиляции тоннеля метрополитена.

Нагнетатель 3400-21-1 – одноцилиндровый, двухступенчатый (рис. 6), приводом служит синхронный электродвигатель СТД 2000-10-2УХЛ4. Газодинамические испытания нагнетателя 3400-21-1 показали, что он обеспечивает получение заданных параметров во всем диапазоне режимов. Основные параметры нагнетателя даны в табл. 2, экспериментальные характеристики – на рис. 7.

В 2019 году в АО «РЭПХ» изготовлен осевой компрессор ОК2100-4,68/4,65-5400/10, предназначенный для подачи атмосферного воздуха в установки каталитического крекинга «Комплекса нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов» ПАО «Татнефть». Компрессор выполнен осевым, одновальным, одноцилиндровым, без промежуточного охлаждения. Продольный разрез 15-ступенчатого компрессора ОК2100-4,68/4,65-5400/10 приведен на рис. 8, основные параметры – в табл. 3.

Для исследования течения газа в проточной части в инженерном центре АО «НЗЛ» применяется CFD-моделирование, т.е. создание расчетных моделей для анализа рабочего процесса в проточных частях спроектированных компрессоров.

Табл. 2.

Основные параметры нагнетателя 3400-21-1

Наименование параметров	Значение
Производительность при $P=0,1013$ МПа и $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, м ³ /ч	200 000
Сопrotивление со стороны всасывания (расчетное), мм вод.ст.	600
Сопrotивление со стороны нагнетания (расчетное с учетом сопротивления концевго холодильника), мм вод.ст.	1600
Сопrotивление воздухоохладителя, не более, мм вод.ст.	320
Полное повышение давления (расчетное), мм вод.ст.	2200
Температура воздуха после концевго холодильника, не более, $^{\circ}\text{C}$	25
Мощность, потребляемая нагнетателем, кВт	1450
Начальное давление на входе во всасывающий патрубок, МПа	0,098
Начальная температура, $^{\circ}\text{C}$	20
Частота вращения ротора нагнетателя, об/мин	3000

Рис. 8.

Модель осевого компрессора ОК2100-4,68/4,65-5400/10

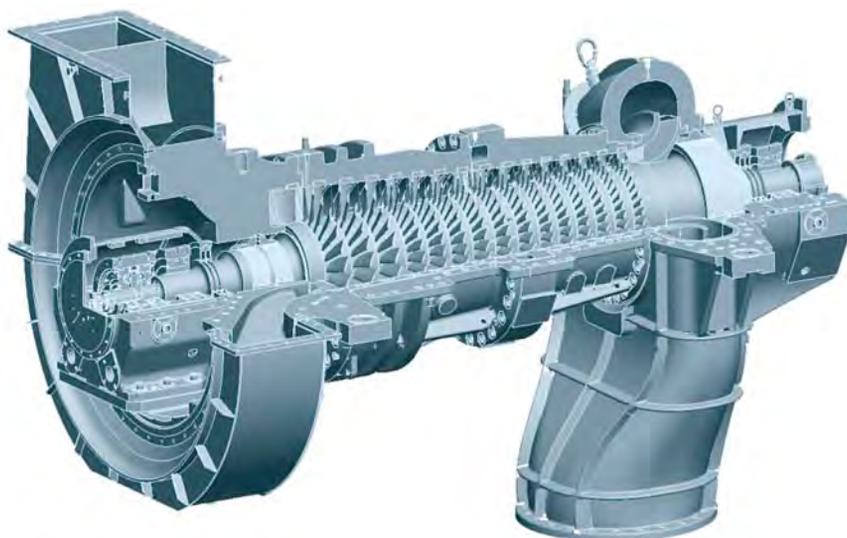


Рис. 9.

Схема задания граничных условий для расчета 3400-21-1

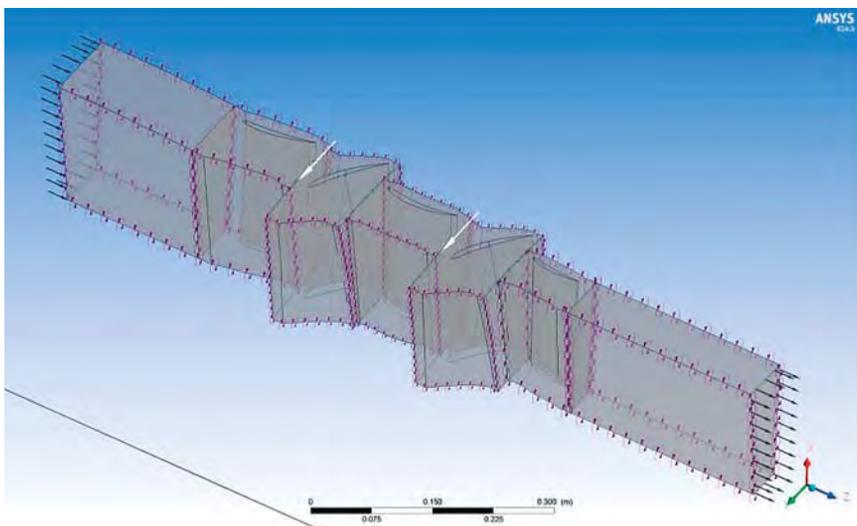


Рис. 10.

Линии тока в лопаточном аппарате 3400-21-1

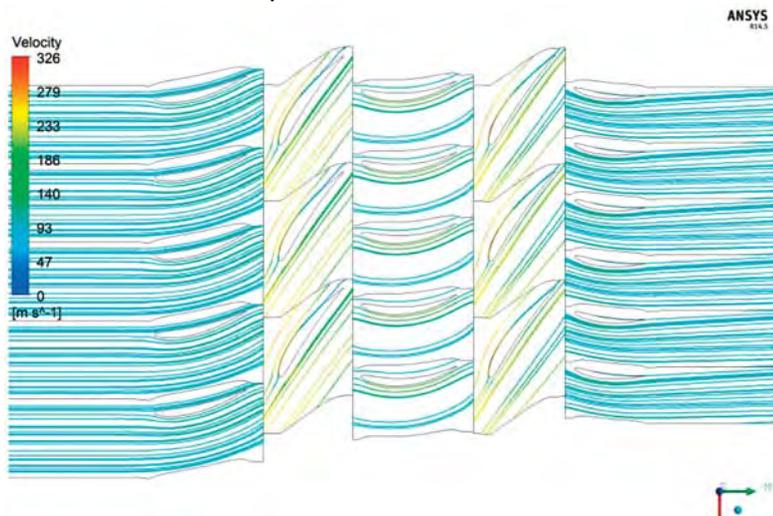


Рис. 11.

Векторы скоростей в проточной части 3400-21-1

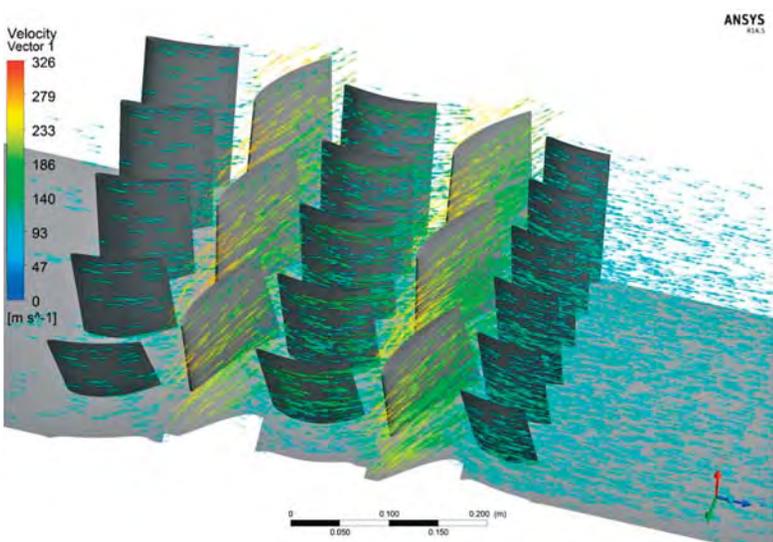


Табл. 3.

Основные параметры компрессора ОК2100-4,68/4,65-5400/10

Наименование параметра	Значение			
	Вар. 1	Вар. 2	Расчетный режим**	Режим с пониженной мощностью
Производительность при P=0,1013 МПа и t=0 °C, м³/ч	90708	74164	106673	44726
Производительность объемная, отнесенная к начальным условиям, м³/ч	95346	77952	127170	40704
Конечное давление, абсолютное, на выходе из нагнетательного патрубка компрессора, МПа	0,366	0,357	0,457	0,350
Мощность, требуемая для привода, включая потери, кВт	5041	4600*	8051	3500*
Давление воздуха начальное, абсолютное, при входе во всасывающий патрубок компрессора, МПа	0,0975	0,0975	0,0975	0,0975
Температура воздуха начальная при входе во всасывающий патрубок компрессора, °C	3	3	40	минус 34
Частота вращения ротора, об/мин	4300	4300*	5000	3900*

* работа с выпуском части рабочего тела в атмосферу

** гарантийный режим

Это направлено на выявление ошибок, возможно, допущенных при проектировании, поиск путей увеличения газодинамической эффективности осевых компрессоров и уточнение существующих методов расчета.

Ниже представлены результаты численного эксперимента – расчета течения газа в проточной части двухступенчатого воздушного осевого нагнетателя 3400-21-1 с помощью программного комплекса ANSYS CFX.

В программный комплекс ANSYS CFX входят специализированные модули для проектирования лопаточных машин различных типов. Линейка состоит из следующих продуктов:

- blade Modeler – модуль для создания геометрии или загрузки модели из CAD-программ;
 - turboGrid – модуль для создания расчетной сетки;
 - ANSYS CFX Turbo PrePost – специальный режим работы пре- и постпроцессора CFX.
- Задание граничных условий для проведения численного эксперимента:
- рабочее тело – воздух с параметрами идеального газа (Air Ideal Gas);
 - тип решения – стационарный расчет (Steady State);
 - модель передачи тепла – модель полной энергии, учитывающая изменение температуры при увеличении скорости газа (Total Energy);
 - с дозвуковым течением (Subsonic);
 - модель турбулентности – SST (Shear Stress Transport);
 - на поверхности Inlet, через которую поток попадает в расчетную область, заданы значения полного давления и температуры;
 - на поверхности Outlet, через которую поток выходит из расчетной области, задано значение массового расхода (т.к. расчетная модель представляет собой сектор с одной лопаткой, задавалась 1/Z-я часть массового расхода);
 - вид интерфейса – Frozen rotor (для связи неподвижной области с вращающейся).

Схема задания граничных условий приведена на рис. 9

На рис. 10–12 представлена полученная в результате CFD-расчета картина течения: линии тока в сечении 50% по высоте лопаток, векторы скорости в проточной части, распределение полного давления в проточной части.

Проведенный численный эксперимент показал, что течение газа в проточной части осевого компрессора 3400-21-1 носит благоприятный характер, без отрывов и низкоэнергетических зон. Кроме того, результат численного эксперимента совпадает с результатами натур-

ных испытаний с погрешностью 0,64 % по конечному давлению. Сравнение данных численного и натурального эксперимента для компрессора приведено в *табл. 4*.

Моделирование течения газа в проточной части осевого компрессора дает качественную картину течения газа. Полученная после проведения расчета картина течения полностью соответствует теоретическим представлениям и экспериментальным данным. Таким образом, применение CFD-моделирования позволяет на этапе первоначального проектирования определить характер течения в лопаточном аппарате, выявить необходимые изменения элементов проточной части, ведущие к устранению потенциальных недостатков, обнаруженных в результате расчета, а также открывает возможность для поиска новых, прогрессивных решений. С учетом имеющихся экспериментальных данных, данных CFD-расчетов и накопленного опыта проектирования становится возможным совершенствование существующей методики расчета проточных частей и создание высокоэффективных осевых компрессоров.

В современных методах проектирования осевых компрессоров не обходится без CFD-расчетов, а без экспериментальных исследований тем более невозможно спроектировать более эффективную проточную часть. Только применяя обе составляющие проектирования (теоретическую и экспериментальную), можно быть уверенным в проектировании и изготовлении новых проточных частей осевых компрессоров. **Д**

Наименование величины	Значение	
	Расчет в ANSYS CFX	Данные испытаний
Повышение давления в компрессоре, МПа	0,026	0,027
Конечное давление, МПа	0,124	0,125
Погрешность численного эксперимента, %	0,64	

Табл. 4.
Сравнение данных численного и натурального эксперимента для компрессора 3400-21-1

Список литературы

1. Довжик С.А. *Аэродинамика осевого компрессора* // Труды ЦАГИ, ч. 1. 1947. № 626.
2. Жуковский Н.Е. *Избранные сочинения*. Гостехиздат, 1947.
3. Ольштейн Л.Е., Процеров В.Г. *Метод расчета осевого компрессора по данным продувок плоских решеток* // Труды ЦИАМ. 1948, №150.
4. Холщевников К.В. *Выбор параметров и расчет осевого компрессора*. М.: МАП, 1949. 310 с.
5. Гофлин А.П. *Руководящее указание по аэродинамическому расчету проточной части осевых компрессоров (со степенью реактивности $\Omega=1,0$)*. ЦКТИ, 1954.
6. Гофлин А.П. *Взаимное влияние ступеней в многоступенчатом осевом компрессоре со стопроцентной реакцией*. // Котлотурбостроение. 1952, № 8.
7. Бабкова М.М. *Работа ступени осевого компрессора на нерасчетных режимах*. ЦКТИ, 1954.

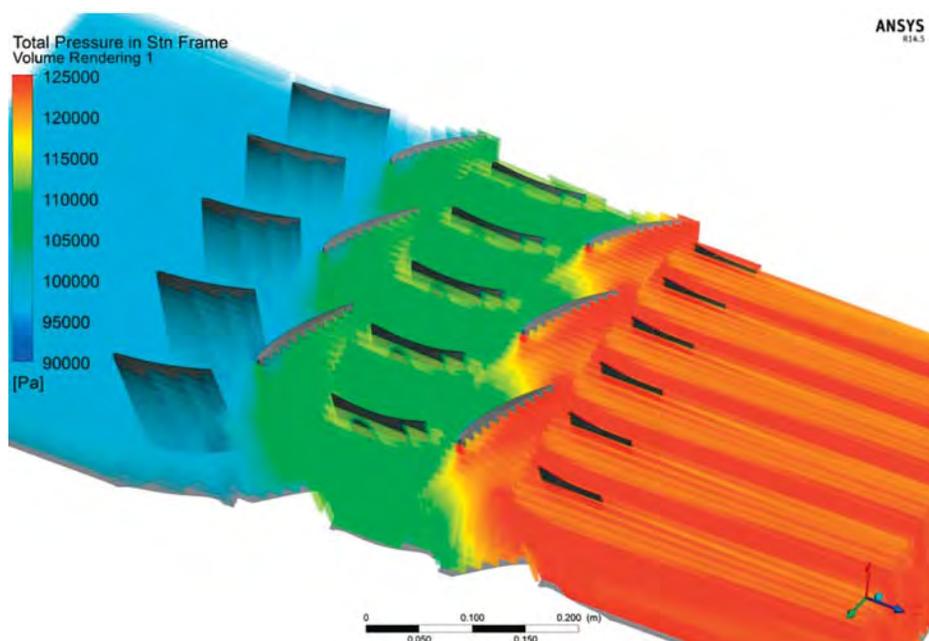


Рис. 12.
Распределение полного давления в проточной части 3400-21-1

Развитие подходов и опыт оптимального проектирования центробежных компрессоров газоперекачивающих и турбодетандерных агрегатов

Ю. Б. Галеркин*, д.т.н. – профессор, yuri_galerkin@mail.ru

А. А. Дроздов*, д.т.н. – доцент, a_drozdi@mail.ru

А. Ф. Рекстин*, д.т.н. – ведущий специалист, rekstin2k7@mail.ru

В. Б. Семеновский*, к.т.н. – доцент, swb534@mail.ru

О. А. Соловьёва*, к.т.н. – доцент, Solovyeva.OA@yandex.ru

Л. Н. Маренина*, к.т.н. – старший преподаватель, marenina_in@mail.ru

А. В. Махонин* – инженер, sir.mahonin@gmail.com

*Высшая школа энергетического машиностроения, Институт энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ

Ключевые слова:

газоперекачивающий агрегат, центробежный компрессор, сменная проточная часть, CFD-оптимизация, модернизация

Аннотация

В 1990–2000 гг. ученые-политехники были привлечены для газодинамического проектирования компрессоров и сменных проточных частей нового поколения в рамках программы «Урал–Газпром». Располагая собственным инженерным методом оптимального проектирования и расчета, политехники решили задачу, создав вместе с промышленными партнерами компрессоры и сменные проточные части (СПЧ) с КПД на 3–4 % больше, чем у аналогов. Сейчас актуален новый этап модернизации. Ученые-политехники к этому времени передали промышленным

партнерам более 50 проектов новых компрессоров и СПЧ и накопили большой опыт.

В СПбПУ построена экспериментальная установка – стенд ЭЦК-55 – для проверки наиболее ответственных и инновационных проектов. Приемы CFD-оптимизации подтвердили эффективность применительно к неподвижным элементам проточной части. Приведен пример выполнения газодинамических проектов центробежных компрессоров для газовой промышленности различного назначения.

Development Methods and Experience in Optimal Design of Centrifugal Compressors for Gas-Pumping and Turbo-Expander Units

Yu. B. Galerkin*, Doctor of Engineering Science – professor, yuri_galerkin@mail.ru

A. A. Drozdov*, Doctor of Engineering Science – Associate Professor, a_drozdi@mail.ru

A. F. Rekstin*, Doctor of Engineering Science – Leading Specialist, rekstin2k7@mail.ru

V. B. Semenovskiy*, Candidate of Engineering Science – Associate Professor, swb534@mail.ru

O. A. Solovieva*, Candidate of Engineering Science – Associate Professor, Solovyeva.OA@yandex.ru

L. N. Marenina*, Candidate of Engineering Science – Senior Lecturer, marenina_in@mail.ru

A. V. Makhonin* – Engineer, sir.mahonin@gmail.com

*Higher School of Power Engineering, Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Key words:

pipeline unit, centrifugal compressor, replaceable flow path, CFD-optimization, modernization

Abstract

In 1990 – 2000 polytechnic scientists were involved in the gas-dynamic design of new generation compressors and replaceable flow paths as part of the «Ural–Gazprom» program. Possessing their own engineering method of optimal design and calculation, the polytechnics solved the problem by creating, together with industrial partners, compressors and replaceable flow paths with an efficiency of 3–4 % higher than that of analogs. A new stage of modernization is currently relevant. Scientists – polytech-

nic by this time transferred to industrial partners more than 50 projects of new compressors and replaceable flow paths and accumulated a lot of experience. At the expense of the National Technological Initiative Center of Excellence in New Manufacturing Technologies SPbPU, the test rig ECC – 55 was built to test the most important and innovative projects. CFD optimization techniques have confirmed their effectiveness in relation to flow path stator elements.

Введение

Рабочий процесс центробежных компрессоров исключительно сложен. Разнообразны формы и соотношения размеров проточной части. Приемы их проектирования и расчета базируются на результатах экспериментов, количество которых не может быть достаточным для решения всех научных и прикладных задач. Ученые и инженеры вынуждены как бы интерполировать и экстраполировать экспериментальные данные на неизученные объекты. Для этого нужны некие физические модели и их математическое описание.

Создателем первой научной школы по промышленным центробежным компрессорам стал В. Ф. Рис на Невском машиностроительном заводе. Его наработки лежат в основе Ленинградской – Санкт-Петербургской школы К. П. Селезнева, который возглавил кафедру и проблемную лабораторию компрессоростроения в самом конце 1950-х гг., когда они были практически в зачаточном состоянии, и руководил ими до 1989 г.

В выработке рекомендаций по оптимальному проектированию центробежных компрессоров для газовой промышленности значительную роль сыграла научная группа проф. Ю. Б. Галеркина «Рабочие процессы турбокомпрессоров». На основе физических и вычислительных экспериментов была разработана концепция и создан метод газодинамического проектирования центробежных компрессорных ступеней и математического моделирования их характеристик (инженерного метода расчета) [1]. Работа научного коллектива получила высокую оценку со стороны компрессоростроителей и Газпрома, отраженную в публикации органа Правительства РФ.

Некоторые из направлений исследования не имеют аналогов в мире. Изобретенная аппаратура [2] позволила измерять параметры потока внутри вращающихся рабочих колес центробежных ступеней при 18 000 об/мин и окружной скорости рабочего колеса 330 м/с. Результаты измерения были сопоставлены с расчетами потока в упрощенной постановке, без учета вязкости, и показали хорошее совпадение [3].

Накопленный опыт позволяет постоянно дополнять и совершенствовать математические модели собственной разработки.

Актуальность проблемы

Газовая промышленность в России является одной из наиболее важных областей применения центробежных компрессоров, которые используются при добыче газа, его транспортировке, подготовке к транспортировке и при хранении.

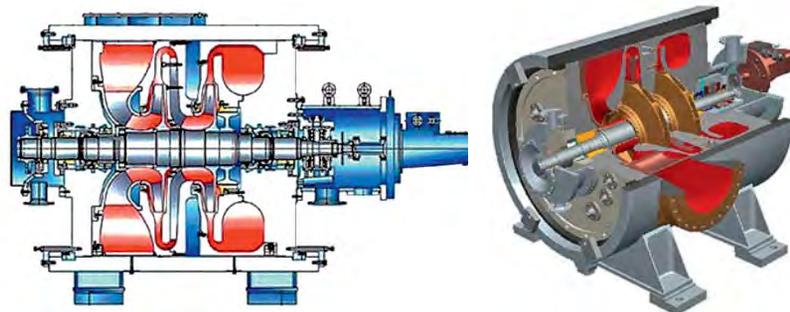


Рис. 1.
Центробежный компрессор
ГПА 16 МВт
(сменная проточная часть)
по проекту методом
универсального моделирования
СПБГУ

Основной тип этого оборудования – газоперекачивающий агрегат (ГПА), который включает центробежный компрессор для повышения давления природного газа, газовую турбину, приводящую компрессор во вращение, и вспомогательное оборудование. В зависимости от назначения ГПА, центробежные компрессоры развивают конечное давление до 15 МПа при мощности 2500...32 000 кВт. Только в системе ПАО «Газпром» работает примерно пять тысяч центробежных компрессоров суммарной мощностью не менее 50 млн кВт.

История вопроса

Впервые масштабно вопрос модернизации центробежных компрессоров ГПА был поставлен в 1990-е гг. в связи с изменением экономической системы в стране. В СССР разрабатывались компактные центробежные компрессоры с лопаточными диффузорами, которые не требуют больших радиальных размеров и отлично работают на номинальном режиме. Но при изменении давления в трубопроводе на нерасчетных режимах лопатки диффузора становятся плохо обтекаемыми. У компрессоров с лопаточными диффузорами зона эффективной работы узкая.

Рис. 2.
Сопоставление показателей
КПД компрессоров ГПА
нового поколения 2000 г.
с аналогами [4]

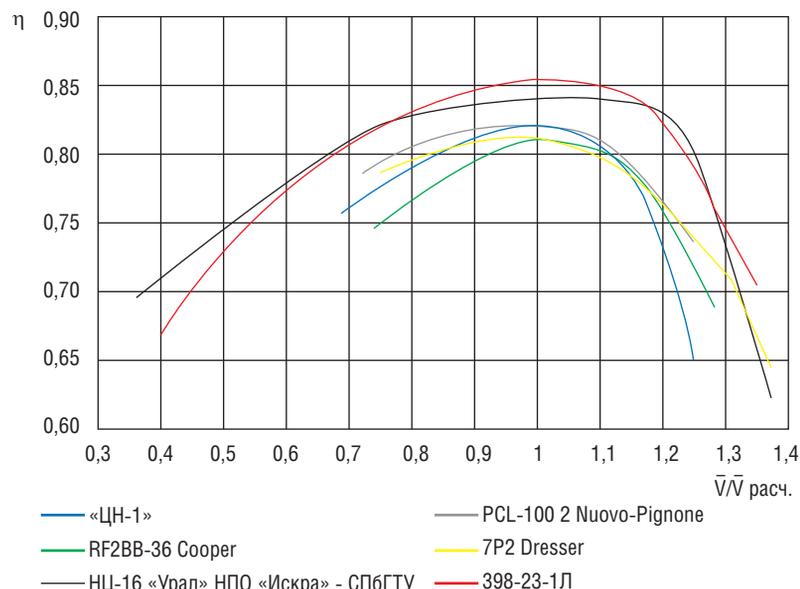


Рис. 3. Характеристики и схема проточной части малорасходного дожимного компрессора ЦК 56/76-1,77 по результатам испытаний и по программе 5-й версии. Вверху – КПД и отношение давлений, внизу – схема ПЧ

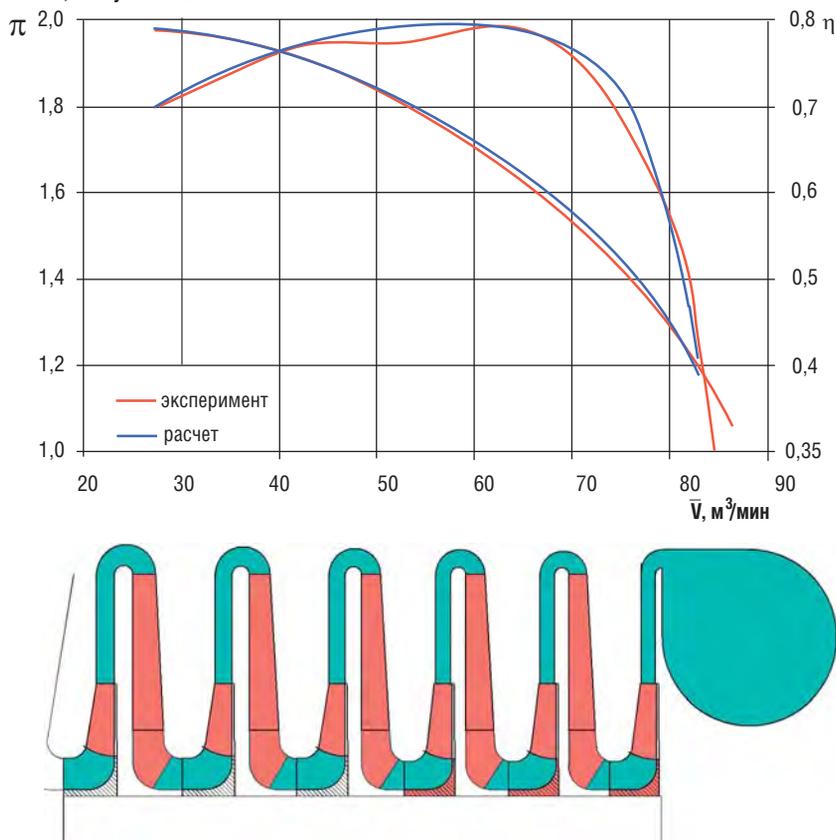
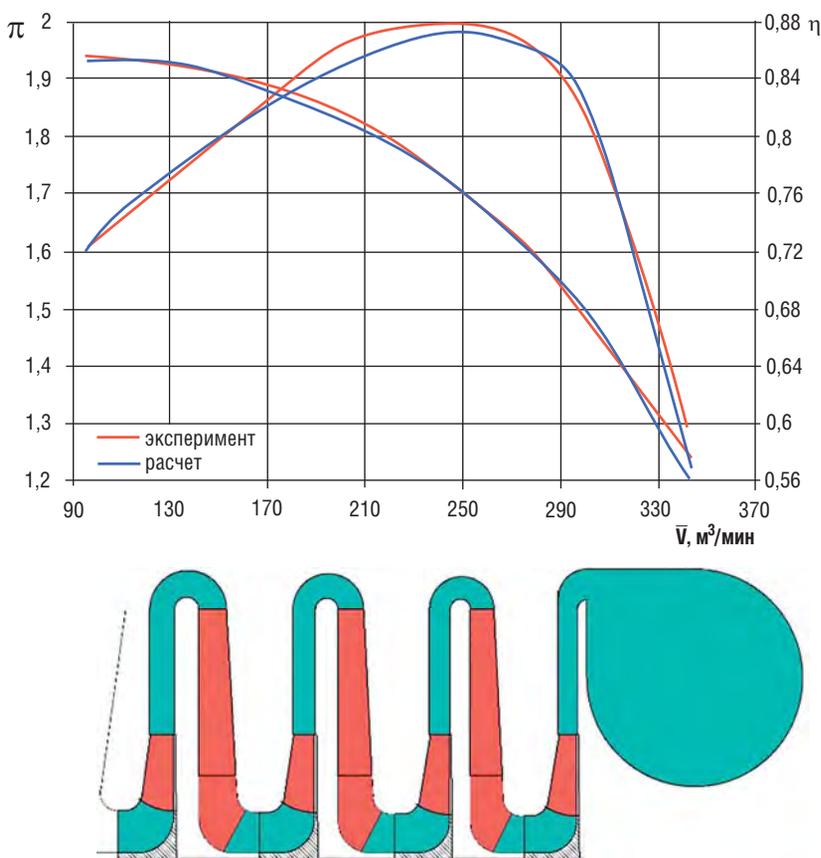


Рис. 4. Характеристики и схема проточной части высокорасходного дожимного компрессора ЦК 249/76-1,71 по результатам испытаний и по программе 5-й версии. Вверху – КПД и отношение давлений, внизу – схема ПЧ



В рамках программы «Урал–Газпром» к созданию компрессоров нового поколения были привлечены традиционные производители компрессоров и оборонные предприятия – участники процесса конверсии. Компрессоростроители, в свою очередь, привлекли ученых-компрессорщиков Политехнического университета. Проблема газодинамического проектирования центробежных компрессоров с последующим расчетом газодинамических характеристик не имеет строгого теоретического решения.

Коллектив проф. Ю. Б. Галеркина разработал газодинамические проекты компрессоров нового поколения с характеристиками, полностью соответствующими требованиям, научно обоснованным специалистами ПАО «Газпром». В рамках программы «Урал–Газпром» были выполнены газодинамические проекты компрессоров ГПА для ОАО «Компрессорный комплекс» и НПО «Искра».

Проекты выполнены с учетом технических требований и ограничений заказчиков-машиностроителей (иногда компрессоры ГПА называют нагнетателями). В рамках модернизации в большинстве случаев предприятия-изготовители поставляли потребителю сменные проточные части для установки в корпуса типа «баррель» существующих компрессоров.

На рис. 1. показан центробежный компрессор поколения начала 2000-х гг. для ГПА 16 МВт. Он размещен в корпусе старого компрессора с лопаточным диффузором, поэтому радиальный размер безлопаточного диффузора не оптимально маленький. Прогрессивный метод газодинамического проектирования и расчета позволил создать в рамках программы «Урал–Газпром» компрессоры нового поколения, превосходящие по эффективности существующие тогда отечественные и зарубежные аналоги. (В журнале «Промышленность России», органе Правительства РФ, руководство Газпрома и индустриального партнера отметило этот факт [4].) На рис. 2. характеристики КПД двух компрессоров по проектам методом универсального моделирования: НЦ-16 «Урал» и 398-23-1Л – сопоставлены с характеристиками одного отечественного и трех зарубежных аналогов. Все компрессоры предназначены для ГПА мощностью 16 МВт и давлением в трубопроводе 76 ата.

Характеристики компрессоров по проектам методом универсального моделирования СПбПУ представлены по результатам заводских испытаний. Характеристики аналогов представлены специалистами Газпрома по измерениям на месте эксплуатации. Следует отметить, что зарубежные поставщики в то время

указывали гарантированный КПД так: «87 % минус 4 %», или «86 % плюс/минус 3 %». Измерения показали, что КПД зарубежных поставщиков обеспечен на нижнем пределе.

Спроектированные при помощи универсального моделирования новые линейные нагнетатели обладают рядом преимуществ по сравнению со старыми компрессорами с аналогичными параметрами. Они более чем на 2 % превосходят их по максимальному КПД и обладают большим запасом по помпажу [4].

Всего по проектам, разработанным методом универсального моделирования, создано более 50 типов компрессоров со следующими характеристиками:

- мощность 1,1...32,0 МВт;
- конечное давление 1,28...22,4 МПа;
- количество ступеней 1...14;
- количество промежуточных охладителей 0...5.

На объектах эксплуатируется более 400 компрессоров суммарной установленной мощностью более 5 000 МВт.

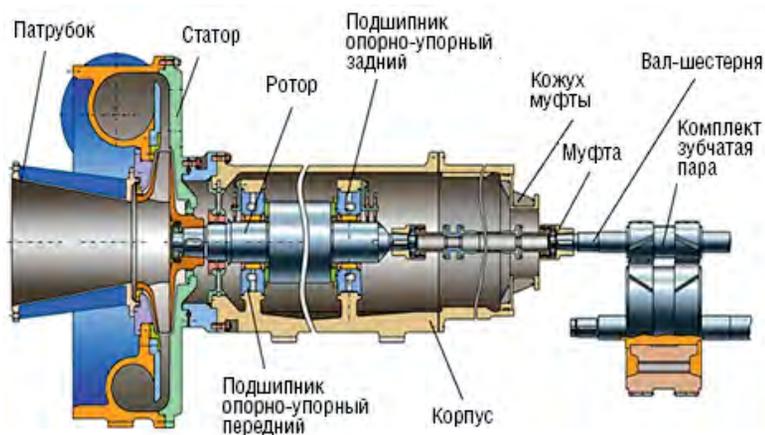
Современное состояние научной школы компрессоростроения СПбПУ

Научная школа компрессоростроения продолжает свое развитие в обоих направлениях – развитие теории и методов проектирования и их применение в интересах промышленных партнеров.

Упомянутые выше компрессоры нового поколения 1990–2000-х гг. разработаны с помощью 4-й версии компьютерных программ метода универсального моделирования. В 5-й версии (2010-е гг.) реализована более сложная математическая модель, что позволило моделировать расчетные режимы компрессоров единым набором эмпирических коэффициентов [6]. По 5-й версии метода с хорошей точностью выполнено моделирование ряда характеристик компрессоров для газовой промышленности – примеры на рис. 3 и 4.

Для компрессора на рис. 4 оптимизация методом установила оптимальное число ступеней – шесть, что позволило создать компрессор с высоким КПД. На рисунке представлены характеристики высокорасходного дожимного компрессора. Этот компрессор имеет КПД 87,5 % – наивысшее значение среди поставленных конечному потребителю.

Дальнейший прогресс достигнут в 6–9-й версиях метода. Реализован квазитрехмерный расчет осерациальных рабочих колес и получено экспериментальное подтверждение эффективности проектирования высокорасходных ступеней.



Высокоэффективный одноступенчатый центробежный компрессор ГПА

Проект полнонапорного одноступенчатого компрессора мощностью 32 МВт по заданию ПАО «СМПО» был выполнен по программе метода универсального моделирования. Была поставлена задача достичь КПД компрессора на уровне 90 %.

При проектировании теоретического напора Ψ_T был принят немного больше рекомендованного для компрессоров ГПА значения 0,50. Консольное расположение РК позволило применить осевой входной патрубок с малыми собственными потерями напора. Радиальные входные патрубки создают неравномерность потока на входе в РК, снижают его КПД. В этом качестве выступает внутренняя улитка с круглым поперечным сечением.

Рис. 5. Элемент экспериментальной установки с моделью компрессора мощностью 32 МВт в масштабе 1:2 [7]

Рис. 6. Характеристики модели компрессора мощностью 32 МВт. Проектные характеристики, результаты трех испытаний, расчет по Ansys CFX [7]

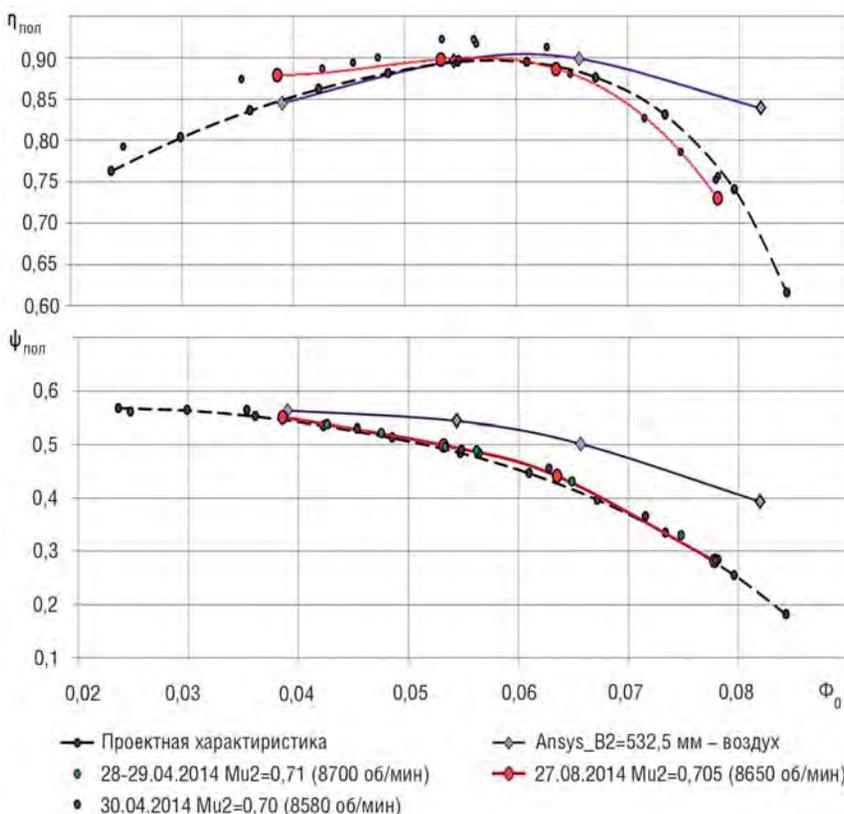
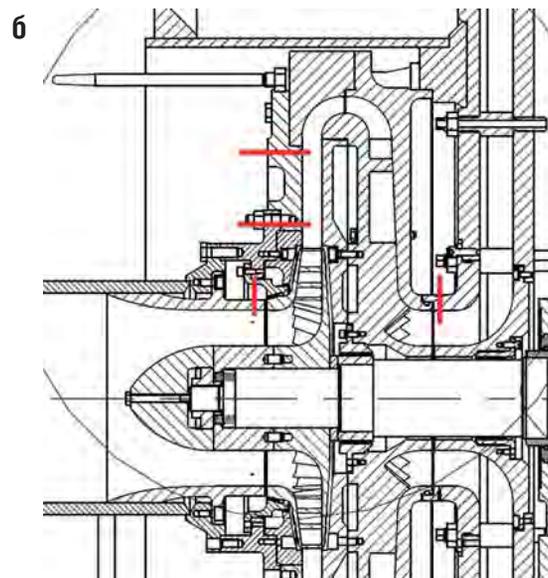


Рис. 7.
 а) общий вид
 экспериментального
 стенда ЭЦК-55
 б) измерительные сечения
 проточной части
 промежуточной ступени



Заказчиком были проведены испытания модели в масштабе 1:2. На рис. 5 показан элемент экспериментальной установки с моделью компрессора. Результаты трех испытаний у заказчика в сравнении с проектной характеристикой по методу универсального моделирования представлены на рис. 6.

Экспериментальная база и исследования модельных ступеней

В последнее время возобновляется серьезный интерес к проведению испытаний центробежных компрессорных ступеней [8, 9]. Также создаются новые базы данных модельных центробежных компрессорных ступеней. Не оста-

лась в стороне от этих тенденций и научная группа компрессоростроения ВШЭМ ИЭ СПбПУ. Закончился период наладки и вступил в регулярную эксплуатацию экспериментальный стенд ЭЦК-55 для испытания моделей центробежных компрессоров.

Стенд ЭЦК-55 предназначен для экспериментов с целью развития методов проектирования и проверки конкретных проектов промышленных центробежных компрессоров. Общий вид стенда и точки измерения параметров потока в проточной части показаны на рис. 7.

На экспериментальном стенде были успешно проведены испытания пяти модельных центробежных компрессорных ступеней – их

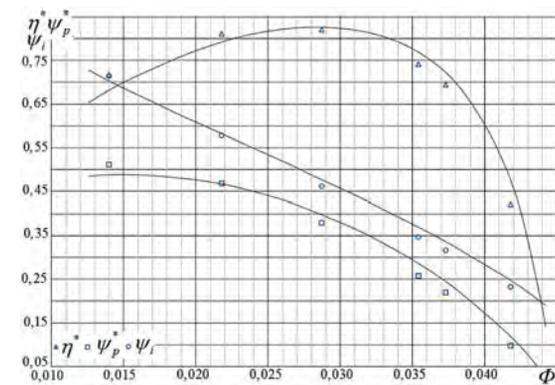
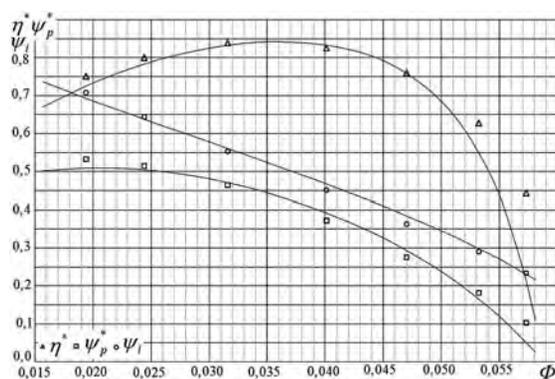
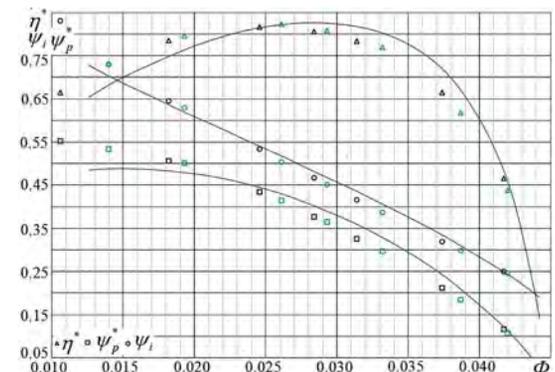
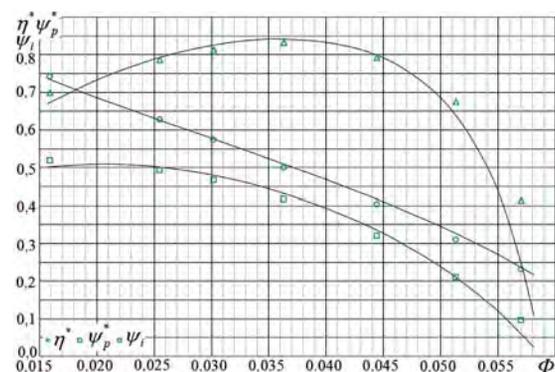


Рис. 8.
 Газодинамические
 характеристики ступени
 с $\Psi_{расч} = 0,035$ при 8700
 об/мин, $M_u=0,464$ (слева)
 и ступени
 с $\Psi_{расч} = 0,025$ при 5300 об/мин,
 $M_u=0,282$ (справа).
 Сплошная линия – расчет;
 точки – эксперимент [10]



рассчитанные и измеренные газодинамические характеристики представлены на рис. 8. Практически отсутствующий разброс точек при повторных испытаниях ступеней подтверждает высокую точность и стабильность электронной измерительной системы. Математическая модель точно определяет расчетный коэффициент расхода. Измеренная характеристика *КПД* чуть более пологая, чем по математической модели, вблизи расчетного режима математическая модель завышает *КПД* на 1–1,3 %. На режиме максимального расхода измеренный *КПД* даже превышает ожидаемый по расчету.

Проектирование центробежных компрессоров ТДА и совершенствование математических моделей их оптимального расчета

Турбодетандеры агрегаты (ТДА), или «детандер-компрессорные агрегаты», применяются

как на газоперерабатывающих заводах, так и на головных станциях добычи газа. В зонах распространения многолетнемерзлых грунтов (криолитозоны) на компрессорных станциях применяются агрегаты круглогодичного охлаждения газа. В большинстве случаев ТДА применяются в составе низкотемпературной установки комплексной обработки газа (УКПГ) на головной станции добычи газа, а в отдельных случаях и на линии транспорта газа. Потребность в ТДА различного назначения до 2035 г. только на объектах ПАО «Газпром» для оснащения и реновации УКПГ оценивается в 113 единиц [11].

Научный коллектив сектора компрессоростроения ВШЭМ ИЭ СПбПУ под руководством проф. Ю.Б. Галеркина сдал заказчику уже 27-й проект компрессора для турбодетандерного агрегата. Индустриальный партнер – АО «Турбохолод» – выпустил более сотни ТДА с компрессорами, выполненными в СПбПУ.

Табл.

Перечень компрессоров турбодетандерных агрегатов по газодинамическим проектам СПбПУ для АО «Турбохолод»

№	Тип	Мощ/год, кВт	D ₂ , *м	\bar{m} , *кг/с	р _к , *МПа	π^*	n,*об/мин	Количество на 2015 г., ед	Суммарная мощность, кВт	Место установки
1	ТК-1	2350/2005	0,320	59	11,8	1,311	15500	1	2400	Опытный образец
2	ТК-2	3650/2005	0,365	79	8,0	1,333	15500	н.д.	н.д.	н.д.
3	ТК-3	2670/2006	0,365	78,1	8,906	1,22	14000	10	26700	Песцовое, Харвутинское
4	ТК-4/0706	5030/2007	0,375	79	6,75	1,424	15500	н.д.	н.д.	н.д.
5	ТК-4/530	5030/2007	0,390	79	6,75	1,424	16250	10	50300	Бованенково
6	ТК-5	3080/2007	0,350	77,7	7,75	1,277	16000	7	21500	Заполярье
7	ТК-6	1850/2007	0,575	163	8,69	1,070	5000	22	40700	Ярынская
8	ТК-7	2400/2007	0,275	86,3	13	1,209	16000	6	14400	Юрхарово
9	ТК-8	1660/2007	0,275	59,19	13	1,209	16000	4	6600	Юрхарово
10	ТК-4/410	5580/2009	0,410	79	6,75	1,424	14500	30	167400	Бованенково
11	ТК-3а	1200/2010	0,365	59	8	1,12	12000	4	4800	Находкинское
12	ТК-8а	1660/2010	0,240	59	10,8	1,18	16000	1	1660	Г.д Ямбург
13	ТК-10	2099/2012	0,310	36,05	13,02	1,32	16500	н.д.	н.д.	н.д.
14	ТК-11	3231/2012	0,310	103,5	12,2	1,208	15000	н.д.	н.д.	н.д.
15	ТК-11А	3320/2012	0,340	105,3	12,2	1,208	13280	1	3300	Юрхаровское
16	ТК-12	1792/2012	0,275	60,5	13	1,244	15550	3	5400	Самбургское
17	ТК-13	1962/2013	0,300	85,19	12,53	1,171	13300	4	7800	Ачимовское
18	ТК-14	3651/2013	0,320	84,0	14,2	1,365	16000	н.д.	н.д.	н.д.
19	ТК-14А	2290/2013	0,340	84,0	12,5	1,202	12500	2	4600	Яро-Яхинское
20	ТК-15	762/2014	0,490	88,19	5,513	1,072	5100	8	6100	Чаяндинское
21	ТК-16	6363/2017	0,390	88,4	6,3	1,460	16250	1	6400	Бованенково
22	ТК-17	5135/2017	0,400	84,6	6,3	1,406	15900	1	5100	Бованенково
23	ТК-18	680/2018	0,280	27,26	5,398	1,169	15500	3	2000	Узбекистан
24	ТК-21	3282/2020	0,300	104,9	13,41	1,23	15000	8	26300	Салман
25	ТК-22	2703/2020	0,340	90,16	7,461	1,26	13500	В процессе изготовления		Ковыткинское
26	ТК-23	1628,9	0,305	31,6	5,977	1,406	18800	В процессе изготовления		Ево-Яхинское
27	ТК-24	2814,5	0,330	54,414	5,879	1,384	17500	В процессе изготовления		Ево-Яхинское
28	ТК-27	4370	0,415	93,4	4,9	1,316	13495	В процессе изготовления		Харасавэй
	Всего							126	401800	

Предприятие «Турбохолд» снабжает газовую промышленность агрегатами с осевой турбиной и центробежным компрессором (рис. 9).

В табл. представлена информация о проектах КВХТ – ЛГДТМ компрессоров ТДА по информации АО «Турбохолд» (указаны только компрессоры, уже поставленные заказчиком). Все компрессоры проходят процедуру газодинамических испытаний на воздушном стенде АО «Турбохолд» в составе турбодетандерных агрегатов.

Проектирование методом универсального моделирования выполняется в следующем порядке:

- с применением правил и расчетных формул для нужных значений, с учетом критериев подобия и конструктивных ограничений выполняется первичное проектирование, т.е. определяются форма и соотношение размеров проточной части при выбранном расчетчиком ожидаемом значении КПД;
- по математической модели расчета потерь напора определяется КПД первичного проекта проточной части и корректируются размеры в случае несовпадения заданного и рассчитанного КПД;
- путем варьирования соотношения размеров проточной части создаются альтернативные варианты, КПД которых рассчитывается. Соответствующий алгоритм оптимизации находит вариант с размерами проточной части, у которого максимальный КПД;
- после оптимизации формы лопаточного аппарата РК на основании диаграмм скоростей невязкого потока по математической модели производится расчет газодинамических характеристик спроектированного компрессора.

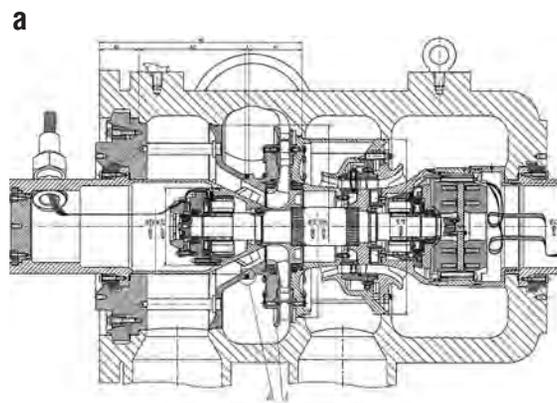
Заключение

Развитие инженерных методов оптимального газодинамического проектирования промышленных центробежных компрессоров, разрабатываемых в Санкт-Петербургском политех-

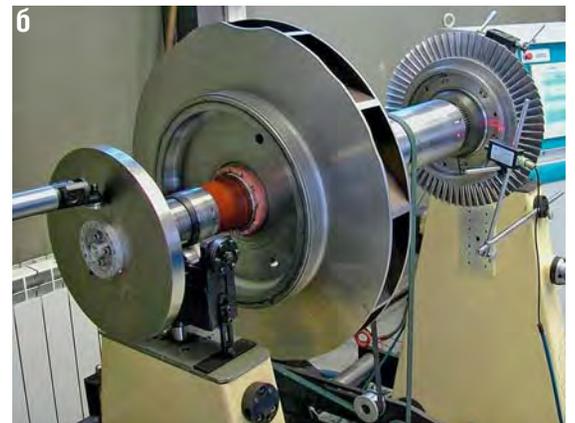
ническом университете, прошло долгий путь. Работы в этом направлении начались в 1969 г. и продолжаются до настоящего времени. Основанные на многочисленных результатах экспериментальных исследований, они успешно применяются при реализации газодинамических проектов центробежных компрессоров газоперекачивающих агрегатов, дожимных компрессоров, компрессоров ТДА. Опыт применения показал высокую эффективность и достоверность получаемых результатов как в расчетной точке, так и по газодинамической характеристике в целом. Спроектированные компрессоры показали высокий КПД – на 3...4 % выше существующих аналогов. Спроектирован и экспериментально исследован одноступенчатый центробежный компрессор ГПА проектной мощностью 32 МВт и КПД 90 % на расчетном режиме. **□**

Список литературы

1. Галеркин Ю.Б. Турбокомпрессоры. Рабочий процесс, расчет и проектирование проточной части [текст] / М.: ООО «Информационно-издательский центр «КХТ». - 2010. - 596 с.
2. Галеркин Ю.Б., Серегин В.С. Высокооборотный передатчик давления с переключающим устройством для исследования течения газа во вращающихся роторах турбомашин / «Энергетика», Изв. вузов. 1963, № 5.
3. Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б. Центробежные компрессоры [текст] / Л.: Машиностроение. - 1982. - 271 с.
4. Васильев Ю.С. Высокоэффективные центробежные компрессоры нового поколения. Научные основы расчета, разработка методов оптимального проектирования и освоение производства [текст] / Ю.С. Васильев, П.И. Родионов, М.И. Соколовский // Промышленность России. 2000, № 10-11. С. 78-85.



➤ Рис. 9.
а) продольный разрез ТДА на магнитных подшипниках [12]
б) ротор ТДА [11]



Выполнена реконструкция системы электроснабжения Северо-Соленинской электростанции.

Продлен рабочий ресурс двигателей электростанции ПАЭС-2500 на период до реализации проекта по реконструкции электросилового хозяйства Северо-Соленинского ГКМ и, таким образом, повышена надежность электроснабжения и рабочая мощность ГТЭС.

На действующем оборудовании электростанции установлена современная САУ. Она включает контроллеры, расположенные непосредственно на агрегатах ПАЭС-2500, а также автоматизированное рабочее место, регулирующее работу электростанции, и программное обеспечение, осуществляющее взаимодействие всех систем комплекса. Система позволяет синхронизировать работу силовых агрегатов и увеличивает рабочую мощность электростанции до 5 МВт.

В состав Северо-Соленинской электростанции входят четыре агрегата ПАЭС-2500 мощностью по 2,5 МВт. Они обеспечивают электроэнергией три промысла: Северо-Соленинское ГКМ, Южно-Соленинское ГКМ и Мессояхское ГМ.

При реализации проекта подрядная организация «Севморпроект» столкнулась с определенными сложностями. Так, при разработке проектных решений современное оборудование интегрировано в существующую производственную цепочку, учтены сезонные условия доставки грузов, ограничения по их габаритам и массе.

ООО «ИНГК» развивает международные деловые связи.

29 мая в рамках промышленной выставки в г. Эр-Рияд прошли рабочие встречи специалистов компании «ИНГК» с представителями бизнеса Саудовской Аравии при поддержке Российского экспортного центра и Российско-Саудовского делового совета.

На встречах обсуждались вопросы «трансфера» технологий и поставок оборудования. Стороны отметили глубокую взаимную заинтересованность в совместной работе и развитии дальнейших взаимоотношений.

ООО «ИНГК» активно сотрудничает с компаниями региона Персидского залива, участвуя в выставочных экспозициях промышленных предприятий Пермского края. В 2021–2022 гг. на выставке ADIPEC были представлены производственно-технологические и конструкторские разработки компании и прошла серия переговоров с крупнейшими представителями нефтегазовой отрасли и энергетики Ближнего Востока – ADNOC, MAASDAR, Dragon Oil и другими. Достигнуты договоренности о развитии совместного производства газотурбинного и компрессорного оборудования на территории ОАЭ по технологиям компании «ИНГК».



5. Галеркин Ю. Б., Рекстин А. Ф., Солдатова К. В., Дроздов А. А., Попов Ю. А. Развитие научной школы турбокомпрессоростроения ЛПИ-СПбПУ Петра Великого, результаты сотрудничества с компрессоростроителями // 17 Международная научно-техническая конференция. Казань, 2017. - Май. - С. 19-29.

6. Галеркин Ю. Б., Солдатова К. В. Моделирование рабочего процесса промышленных центробежных компрессоров. Научные основы, этапы развития, современное состояние / СПб: изд-во Политехн. ун-та, 2011. - 328 с.

7. Тертышный И. Н. Термодинамический анализ эффективности центробежного компрессора как сложной энерготехнологической системы в составе агрегата типа ГПА-Ц-32П. [текст] / И. Н. Тертышный, В. П. Парафейник, А. Н. Нефедов, С. А. Рогальский, Н. А. Котенко, Д. Н. Тимошадченко, С. А. Михайленко // 15 Международная научно-техническая конференция. - СПб. - РЭПХолдинг. - 2014.

8. R. Matas, T. Syka, L. Hurda. Experimental investigation and numerical modelling of 3D radial compressor stage and influence of the technological holes on the working characteristics. EPJ Web of Conferences 180, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818002060> EFM 2017 (2018)

9. Bianchini, Alessandro, Ferrari, Lorenzo, Ferrara, Giovanni. «An Academic Test Rig for Industrial Centrifugal Compressor Stages: A Design Approach». Proceedings of the ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO2 Power Cycles; Wind Energy. Seoul, South Korea. June 13–17, 2016. V009T24A021. ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2016-57697>.

10. Дроздов А. А. Разработка математической модели расчета и проектирования центробежных компрессоров на основе расчетно-экспериментальных исследований и ее практическое применение / Дис. ... д-ра техн. наук. С-Петербург, 2021. 440 с.

11. Семёновский В. Б. Особенности газодинамического проектирования центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов и создание базы данных модельных ступеней по результатам заводских испытаний [текст] / В. Б. Семёновский // Дис... канд. техн. наук. КНИТУ, 2020. 173 с.

12. Агрегат турбодетандерный производительностью 7–11 млн м³/сут [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.turbokholod.ru/content/c7-page1.html> (дата обращения: 16.10.2018).

Система управления «Сириус» – новая разработка российской компании «ИНГК–Промтех»

А. В. Лебедев, И. В. Травкина, В. Е. Щавлев (к.т.н.) – ООО «ИНГК–Промтех»

Современная нефтегазовая отрасль требует максимальной автоматизации технологических процессов, основные цели которой – точное выполнение технологического регламента, исключение ошибок персонала; обеспечение промышленной безопасности, дистанционного контроля и управления производственными комплексами с верхнего уровня управления.

In brief

The Sirius control system is a new development of INGC-Promtech.

The modern oil and gas industry requires maximum automation of technological processes, the main goals of which are the exact implementation of technological regulations, the elimination of personnel errors, ensuring industrial safety and remote control and management of production complexes from the upper management level. INGC-Promtech has been developing and manufacturing automatic control systems for the oil and gas industry for more than eight years - several dozen systems have been delivered during this time. Since 2020 the company has started the production of control systems under the brand name of Sirius Information Management System. In the same year Sirius system was tested for the purpose of approving the type of measuring instrument and in December 2020 it was included in the register of approved measuring instruments of the Federal Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements FGIS Arshin (certificate of approval of measuring instruments type No. 80247-20).

Компания «ИНГК–Промтех» более восьми лет разрабатывает и изготавливает системы автоматического управления (САУ) для нефтегазовой отрасли – за это время поставлено несколько десятков САУ. С 2020 года компания начала выпуск САУ под маркой «Система информационно-управляющая (ИУС) «Сириус». В этом же году ИУС «Сириус» прошла испытания с целью утверждения типа средства измерений и в декабре 2020-го была включена в реестр утвержденных средств измерений Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений ФГИС «Аршин» (сертификат об утверждении типа средств измерений № 80247-20).

ИУС «Сириус» предназначена, прежде всего, для автоматического управления газовыми компрессорными установками и газоперекачивающими агрегатами. Как и другие подобные системы автоматического управления, ИУС «Сириус» обеспечивает прием, обработку аналоговых и дискретных сигналов от средств измерения (давление, температура, уровень жидкости, вибрация) и других унифицированных сигналов и исполнительных механизмов. На основе анализа полученных значений параметров технологического процесса система формирует управляющие аналоговые и дискретные сигналы как по заданным алгоритмам управления, так и по командам оператора.

Оперативная и архивная информация, визуализация технологического процесса (отображение оперативной информации о текущих значениях технологических параметров, их граничных значений, предупредительной и аварийной сигнализации, состояний исполнительных механизмов, мнемосхем и графиков), задание режимов отображаются на сенсорных панелях операторов и автоматизированных рабочих местах (АРМ) оператора.

Панель оператора устанавливается на передней панели шкафа управления, в некоторых случаях дополнительная панель во взрывозащищенном исполнении устанавливается

в машинном зале. ИУС «Сириус» обеспечивает архивирование заданных технологических параметров, событий и действий оперативно-диспетчерского персонала, обмен информацией с вышестоящими системами управления по цифровым каналам связи. Предусмотрена защита системной информации от несанкционированного доступа к программным средствам и изменения установленных параметров.

Конфигурация каждого конкретного исполнения ИУС «Сириус» по составу оборудования, его количеству, требованиям к функциям формируется с учетом особенностей каждого конкретного управляемого технологического процесса и определяется техническим заданием. В зависимости от проекта, ИУС может включать следующее оборудование:

- шкафы управления САУ, в которых размещаются процессорные модули, модули связи, станции и модули ввода/вывода, измерительные преобразователи (искробезопасные барьеры), панели управления, блоки питания, релейные модули и клеммы;
- шкафы управления силовые, в которых, помимо указанного оборудования ИУС «Сириус», в отдельной секции размещаются силовые автоматические выключатели, контакторы, устройства плавного пуска, преобразователи частоты и элементы их управления;
- шкафы устройств связи с объектом;
- автоматизированное рабочее место оператора;
- панели резервного управления;
- пульты местного управления;
- серверное и коммуникационное оборудование.

На рис. 1 представлена типовая структурная схема управления газоперекачивающим агрегатом, на фото – шкаф управления.

Для обеспечения бесперебойной и безопасной работы ИУС «Сириус» может поставляться в отдельных транспортабельных блоках-контейнерах с системами жизнеобеспечения.

До 2022 года ИУС «Сириус» строилась на базе программируемых контроллеров SIMATIC S7 (Siemens), Modicon (Schneider Electric), Allen-Bradley Control Logix (Rockwell). Выбор конкретного оборудования определялся техническим заданием на проектирование. В зависимости от выбранной аппаратной базы подбирались средства человеко-машинного интерфейса с набором максимально совместимых протоколов и технологий взаимодействия.

С 2022 года в связи с введенными санкциями компания «ИНГК–Промтех» перешла на использование отечественных комплектующих, в том числе на отечественные программируемые контроллеры REGULR 500 производства «Прософт-Системы» и АБАК компании «Инкомсистем». В качестве базы для разработки средств человеко-машинного интерфейса после анализа специалистами ООО «ИНГК–Промтех» была выбрана СКАДА-система Master SCADA 4D отечественного разработчика «МПС Софт». В декабре 2022 года метрологические характеристики ИУС «Сириус» с отечественными контроллерами были подтверждены испытаниями, и в феврале 2023 года приказом Росстандарта были внесены соответствующие изменения в описание типа средства измерений.

ИУС «Сириус» имеет программное обеспечение собственной разработки компании «ИНГК–Промтех». Как показывает практика, в сфере промышленной автоматизации процесс разработки программного обеспечения (ПО) для САУ всегда включает три этапа:

- разработка базовой версии ПО при отсутствии непосредственного доступа к оборудованию компрессорных установок или газоперекачивающих агрегатов;
- корректировка конфигурации в процессе привязки к конкретным вычислительным средствам в составе шкафов автоматики перед отправкой САУ на объект;
- доводка и адаптация разработанного ПО непосредственно на объекте в процессе пусконаладки оборудования.

Любой разработчик ПО в стремлении повысить эффективность своей работы всегда старается сократить затраты на последний этап, что требует создания гибкой базовой концепции и структуры на начальном этапе разработки. Исходя из опыта «ИНГК–Промтех» при разработке и внедрении ИУС «Сириус», можно заключить, что качественный программный продукт для систем промышленной автоматики должен создаваться с учетом следующих принципов:

- наличие у разработчика ПО комплекса аппаратных и программных средств (рабочей станции), позволяющих эмулировать работу

контроллера, причем важна эмуляция не только правильности исполнения программного кода, но также возможность обмена данными с эмулятором по заданному в проекте промышленному протоколу (Modbus, OPC и др.);

- использование объектно-ориентированного подхода при формировании базовой структуры проектируемого ПО. Данный подход удобен и понятен не только программисту, но и инженеру по автоматизации, эксплуатирующему управляемое системой «Сириус» оборудование;
- применение всех языков стандарта IEC 61131-1 в зависимости от задачи, решаемой в конкретной части программы, что также помогает инженерам по автоматизации понимать логику работы системы управления. Например, условия готовности к запускам проще отслеживать по цепям LD, исполнительные механизмы и датчики представлять в виде блоков FBD, а формулы расчета – с использованием синтаксиса SCL;
- ведение индексации объектов, использование структур типа «массив» для хранения значений параметров, позволяющих реализовать доступ к ним через индекс.

Стоит отметить, что аппаратные и программные решения отечественных компаний позволяют учитывать все перечисленные принципы при работе над проектом САУ.

Рис. 1.

Схема структуры управления

Сокращения:
 АСЭУ - автоматизированная система управления энергоснабжением;
 АО - аварийный останов;
 АПК - антипомпажный клапан;
 АРМ - автоматизированное рабочее место;
 АСУ ТП - система автоматизированного управления технологическим процессом;
 НКУ - низковольтное комплектное устройство;
 ПРУ - панель резервного управления;
 САУ - система автоматического управления;
 ЭГПА - электроприводной газоперекачивающий агрегат

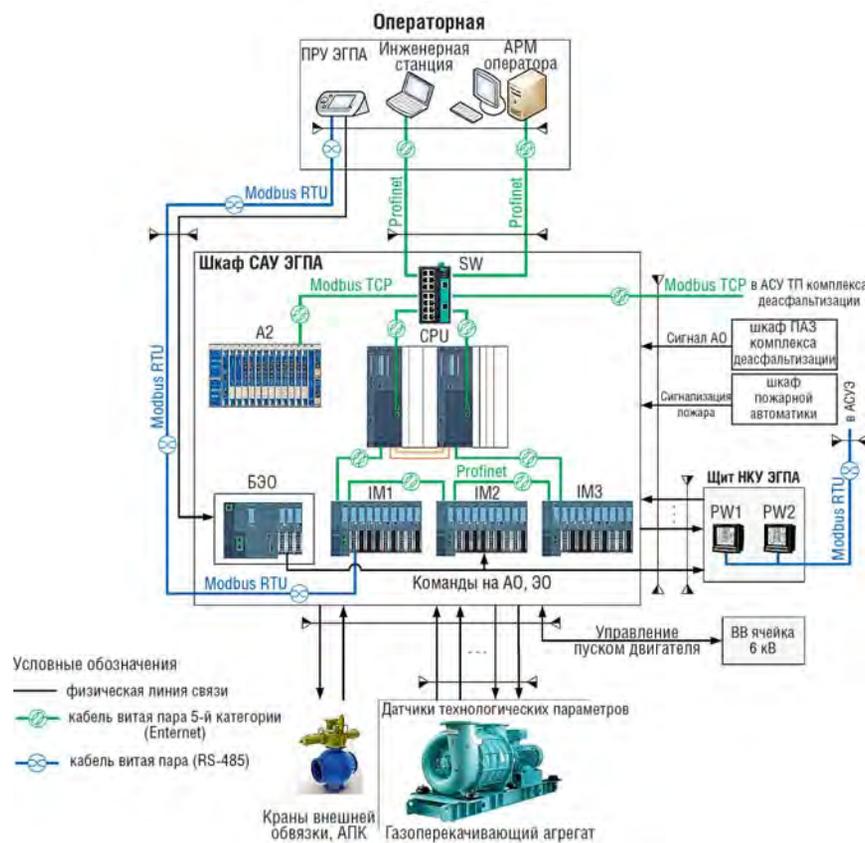


Фото.
Шкаф управления



Использование веб-технологий и возможностей языка структурирования HTML5, являющегося стандартом построения любых современных веб-интерфейсов, позволяет также применять объектно-ориентированный подход при работе с системами визуализации (например, в Master SCADA 4D). Применение данной разработки отечественной компании «МПС Софт» позволяет без значительных трудозатрат создавать интерактивные интерфейсы для управления ГПА (рис. 2).

Чтобы следовать изложенным принципам, разработчик ПО должен структурировать про-

ект на начальном этапе разработки и далее соблюдать правила этой структуры при выполнении доработок. Согласно разработанной структуре, программная часть ИУС «Сириус» обычно включает в себя следующие компоненты:

- блоки взаимодействия с аналоговыми датчиками;
- блоки взаимодействия с исполнительными механизмами;
- блоки регуляторов;
- структуры параметров данных блоков, объединенные в массивы;
- модуль противоаварийной защиты с отслеживанием первопричины срабатывания;
- модуль выполнения последовательных операций.

Таким образом, базовая единица программы – это блок, а глобальный алгоритм функционирования оборудования – это взаимосвязи между различными блоками. Наличие данных взаимосвязей также заставляет разработчика ПО стандартизировать базовую структуру блока. Согласно опыту, накопленному при разработке ИУС «Сириус», каждый блок должен соответствовать следующим требованиям:

- предусматривать наличие логики подмены обратной связи сигналом команды (так называемый «режим симуляции»);
- предусматривать стандартный интерфейс взаимодействия с системами отображения для обращения к параметрам блока с помощью стандартного окна управления – паспорта (пример на рис. 3);

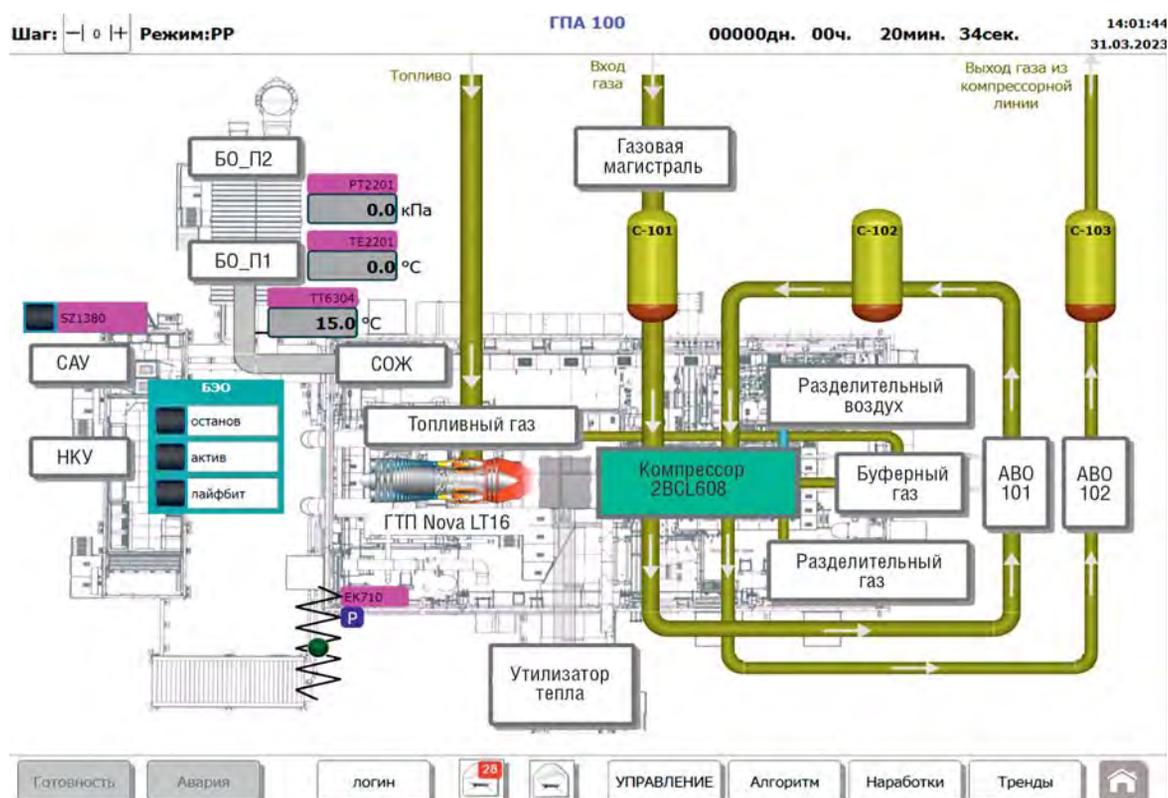
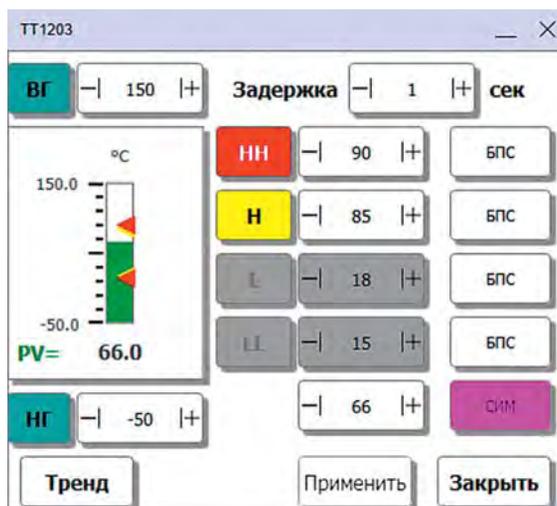


Рис. 2.
Общая мнемосхема
газоперекачивающего агрегата

Рис. 3. Всплывающее окно настроек параметров аналогового датчика



- быть максимально универсальным с точки зрения соответствия различным приборам, механизмам;
- иметь резервную область памяти для добавления параметров и выполнения доработки в случае необходимости.

Практика успешного внедрения компанией «ИНГК–Промтех» своих разработок показала, что, следуя принципам и требованиям, заложенным в основу ИУС «Сириус», можно минимизировать затраты на выполнение рутинных операций и, как следствие, ускорить работу над проектом на всех этапах. Соответственно, это положительно сказывается на качестве конечного продукта, которым пользуется всё большее количество промышленных предприятий.

«ИНГК–Промтех» имеет собственную электролабораторию для испытаний шкафного оборудования. ИУС «Сириус» проходит все необходимые испытания и проверки и поставляется в полной заводской готовности. Монтаж и наладка системы осуществляется сервисной службой компании, в состав которой входят не только инженеры, но и квалифицированные программисты.

С 2020 года компанией «ИНГК–Промтех» под маркой ИУС «Сириус» изготовлено, поставлено и успешно эксплуатируется девять САУ на следующих объектах: Волгоградский НПЗ, Повховское месторождение (ПАО «Лукойл»); месторождения Денгизкуль, Арниез (Узбекнефтегаз); Вынгапуровское месторождение (АО «Газпромнефть–Ноябрьскнефтегаз»); Хабаровский НПЗ (АО «ННК–Хабаровский нефтеперерабатывающий завод»), Ичединское месторождение (Иркутская нефтяная компания), Восточно-Капитоновское месторождение (ПАО «Оренбургнефть»). 

Компания «Интертехэлектро» разработала модульный комплекс компостирования.

На Курганском заводе комплексных технологий (группа «Интертехэлектро») завершено изготовление модульного комплекса компостирования. Оборудование собственной разработки, не имеющее российских аналогов, предназначено для использования на промышленных предприятиях и объектах обращения с отходами. В настоящее время комплекс проходит опытную эксплуатацию, после которой на заводе начнется его серийное производство.

Комплекс компостирования состоит из закрытых контейнеров и технического модуля, в котором располагаются блок управления и системы очистки фильтрата и воздуха. В составе комплекса может работать от двух до девяти модулей. Оборудование позволяет перерабатывать органическую часть твердых бытовых отходов или очистных сооружений, отходы предприятий животноводства в технический грунт. Максимальная производительность составляет до 500 м³ в месяц.

В основе работы комплекса метод аэробного компостирования, при котором выработка компоста происходит с доступом кислорода и при использовании специальных бактерий. Основным достоинством метода является скорость переработки – срок созревания компоста в модулях занимает от 14 до 20 дней.

Для ускорения и стабилизации применяется биопрепарат собственной разработки. Образующиеся в процессе компостирования отработанный воздух и фильтрат проходят очистку на специальном оборудовании, что полностью исключает их попадание в окружающую среду. Комплекс позволяет получать техногрунт, который может использоваться для рекультивации полигонов или благоустройства в городской среде.

Основные преимущества комплекса в сравнении с существующими стационарными решениями – малая занимаемая площадь, высокий уровень заводской готовности, быстрый монтаж на месте размещения, простота использования.

Intertechelectro has developed a modular composting complex.

Production of a modular composting complex has been completed at the Kurgan plant of integrated technologies (Intertechelectro Group). The equipment of its own design, which has no Russian analogues, is intended for use at industrial enterprises and waste management facilities. Currently, the complex is undergoing pilot operation, after which its serial production will begin at the plant. The composting complex consists of closed containers and a technical module, in which the control unit, filtrate and air purification systems are located.



Проектирование ПТУ малой мощности для утилизации тепла ГТУ в органическом цикле Ренкина

П. Н. Коок – руководитель группы термодинамики, теплопередачи и гидравлики, АО «НЗЛ», p.kook@reph.ru

Ключевые слова:

паровая турбина, проточная часть, органический цикл Ренкина (ОЦР), изопентан, утилизация тепла, газоперекачивающие агрегаты (ГПА), парогазовая установка (ПГУ)

Аннотация

В статье даны оценки энергетических характеристик паровой турбины, которая может применяться для работы в составе УТЭК, и рассмотрены различные варианты ее конструктивного исполнения. Показана возможность утилизации тепла уходящих газов за газотурбинной установкой, входящей в состав газоперекачивающего агрегата или ГТЭС в утилизационном контуре, включающем паротурбинную установку с органическим рабочим телом – изопентаном. На основе данных с эксплуатируемых ГПА был сделан анализ наиболее рационального диапазона электрических мощностей паротурбинной установки для обеспечения собственных нужд ГПА. Также рассмотрен вариант полной утилизации тепла уходящих газов газотурбинной установки

на примере ГТУ типа Т32 мощностью 32 МВт, серийно выпускаемой АО «НЗЛ», и дана оценка максимальной электрической мощности утилизационного контура. Проанализированы оптимальные параметры рабочего тела перед турбиной – как с точки зрения термодинамической эффективности, так и технической целесообразности.

Показаны принципиальные особенности изопентана, используемого в качестве рабочего тела для паротурбинной установки, и соответствующие варианты конструктивных решений для паровой турбины. В результате проведенных расчетов были получены предварительные параметры проточных частей для различных конструктивных вариантов исполнения паровой турбины с изопентаном в качестве рабочего тела.

Design of small-scale steam turbine plants for heat recovery behind gas turbines in the organic Rankine cycle

P.N. Kook – Head of the thermodynamics, heat transfer and hydraulics group, Nevsky Zavod JSC, p.kook@reph.ru

Key words:

steam turbine, flow path, organic Rankine cycle (ORC), isopentane, heat recovery, gas pumping units (GPU), combined cycle power plant (CCPP)

Abstract

The prospects for the extraction and processing of hydrocarbons in the Arctic zone raise the question of the feasibility of reliable energy supply and increasing the efficiency of industrial facilities of gas processing and gas transportation enterprises. One of the possible solutions is the introduction of a utilization thermal energy complex (UTEK) at compressor stations and gas turbine power plants, using the waste heat of the exhaust gases of a gas turbine plants. The novelty of the considered utilization circuit is the use of a steam turbine plant with an organic working fluid (with a low boiling point and a low freezing point), which increases the reliability of the equipment of the steam turbine circuit under the low temperatures of the Arctic zone. The article gives estimates of the energy characteristics of a steam turbine that can be used to work as part of the UTEK, and various variants of its design are considered. The possibility of heat recovery of exhaust gases behind a gas turbine plant (GTP), which is part of a gas pumping unit (GPU) or a gas turbine

power plant (GTPP) in a utilization circuit, including a steam turbine plant with an organic working fluid – isopentane, is shown. Based on the data from the operated GTPs, an analysis was made of the most rational range of electric capacities of the steam turbine to meet the own needs of the gas turbine plants. The option of complete utilization of heat of the exhaust gases of the GTP is also considered on the example of the T32 GTP with a capacity of 32 MW, and an estimate of the maximum electrical power of the utilization circuit is given. The question of optimal parameters of the working fluid before the turbine is considered – both from the point of view of thermodynamic efficiency and technical feasibility.

The principal features of isopentane used as a working fluid for a steam turbine plant and the corresponding design options for a steam turbine are shown. As a result of the calculations carried out, the predicted parameters of the flow parts for various design variants of a steam turbine with isopentane as the working fluid were obtained.

Перспективы добычи и переработки углеводородов в Арктической зоне ставят вопрос о надежном энергообеспечении и повышении эффективности промышленных объектов газоперерабатывающих и газотранспортных предприятий. В связи с этим предлагается внедрить на компрессорных станциях и газотурбинных электростанциях утилизационный тепловой энергокомплекс (УТЭК), использующий тепло уходящих газов газотурбинной установки. Новизна рассматриваемого утилизационного контура заключается в использовании паротурбинной установки с органическим рабочим телом (с низкой температурой кипения и низкой температурой замерзания), что повышает надежность оборудования паротурбинного контура в условиях низких температур Арктической зоны.

Перспективы применения органического цикла Ренкина (ОЦР)

С учетом перспектив развития добычи и переработки углеводородов в Арктике становится необходимостью надежное энергоснабжение промышленных объектов в этой климатической зоне, характеризующейся низкими температурами атмосферного воздуха в течение всего года. Эта задача может быть решена за счет использования газотурбинных электростанций, причем в качестве эффективного способа повышения КПД и мощности энергоблока может быть рассмотрена надстройка ГТЭС котлом-утилизатором и паротурбинной установкой.

Однако эксплуатация парового цикла в условиях экстремально низких температур и ограниченных водных ресурсов потребует значительных затрат на обеспечение надежности станции. Одним из путей решения может стать использование в качестве ПТУ установок, работающих по циклу Ренкина на органическом рабочем теле с низкой температурой замерзания. Создание турбинных установок, работающих по ОЦР с реализацией воздушного охлаждения конденсатора, позволит обеспечить надежную работу энергоустановки в условиях Арктики.

Другим перспективным направлением использования ОЦР может быть установка утилизационного контура на существующие и работающие газоперекачивающие агрегаты с целью получения дополнительной электроэнергии для покрытия собственных нужд промышленных объектов. В рамках НИОКР в АО «НЗЛ» прорабатывается возможность реализации утилизационного контура ОЦР как на работающих ГПА-32 «Ладога» с целью покрытия их собственных нужд, так и реализация парогазовой установки (ПГУ) на основе

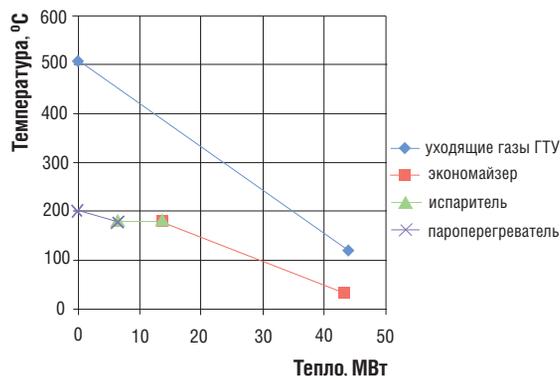


Рис. 1. T-Q диаграмма полной утилизации уходящих газов ГТУ Т-32 в ОЦР

газотурбинной электростанции ГТЭ-32. Так, по предварительной оценке, надстройка ГТЭ-32 энергоустановкой, работающей по ОЦР, с полной утилизацией тепла уходящих газов ГТУ, позволит увеличить электрическую мощность энергоблока на 5...6 МВт. На рис. 1 представлена T-Q диаграмма полной утилизации уходящих газов ГТУ Т-32 в ОЦР (без термомасляного контура).

Расчетные рекомендуемые электрические мощности установок ОЦР для большого количества работающих компрессорных цехов приведены в «Программе по внедрению технологии утилизации тепла отходящих газов ГПА на компрессорных станциях [1]. Такие данные в графическом виде представлены на рис. 2.

На основе представленных данных можно сделать вывод о том, что наиболее востребованной на эксплуатируемых ГПА будет установка ОЦР мощностью 1...4 МВт, что приводит к выводу о целесообразности создания линейки турбоагрегатов в этом диапазоне мощностей с максимальной унификацией.

Особенности рабочего тела и связанные с этим конструктивные решения

На рис. 3 представлена принципиальная схема газоперекачивающего агрегата с утилизационным контуром ОЦР [2]. В качестве рабочего тела для утилизационного контура был рассмотрен изопентан.

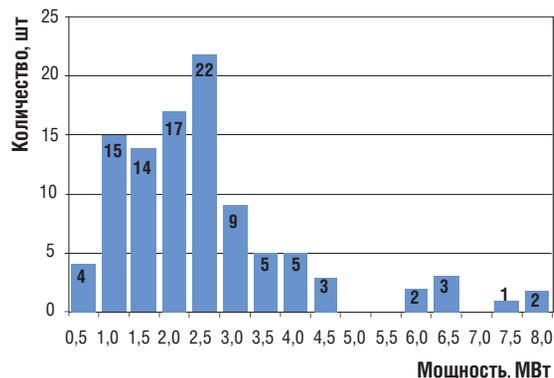


Рис. 2. Рекомендованные расчетные электрические мощности установок ОЦР для компрессорных цехов

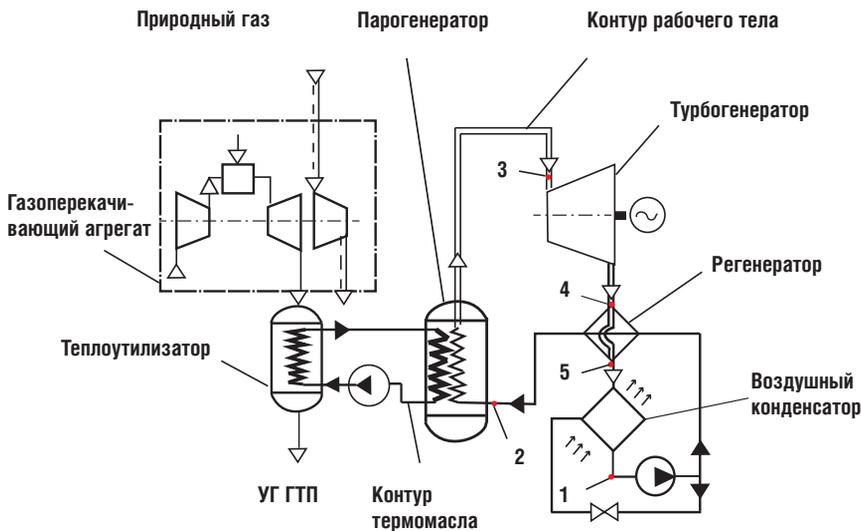


Рис. 3. Принципиальная схема энергетической установки с ОЦР

Поскольку он относится к категории взрывоопасных смесей ПА-Т1 по ГОСТ 12.1.011, его прямой нагрев в котле-утилизаторе нецелесообразен с точки зрения пожаро- и взрывобезопасности. Поэтому в установку вводится промежуточный контур – термомасляный. С одной стороны, это исключает взаимодействие горючего рабочего тела с горячими выхлопными газами турбины, но с другой – требует установки дополнительного теплообменного и насосного оборудования.

У большинства органических рабочих тел (ОРТ), к которым относится и изопентан, пограничная кривая пара на диаграмме состояний в T-S координатах имеет положительный наклон [3]. Поэтому процесс расширения заканчивается в области перегретого пара, что исключает появление конденсата в конце процесса расширения, соответствующие потери энергии, а также эрозию рабочих лопаток.

На рис. 4 представлена T-S диаграмма состояния изопентана с нанесенной на нее линией цикла (для некоторых принятых параметров перед/за турбиной). Как видно из представленной диаграммы, температура торможения пара на выходе из турбины, определяемая давлением торможения за ее послед-

Рис. 4. T-S диаграмма состояния изопентана с нанесенной на неё линией ОЦР

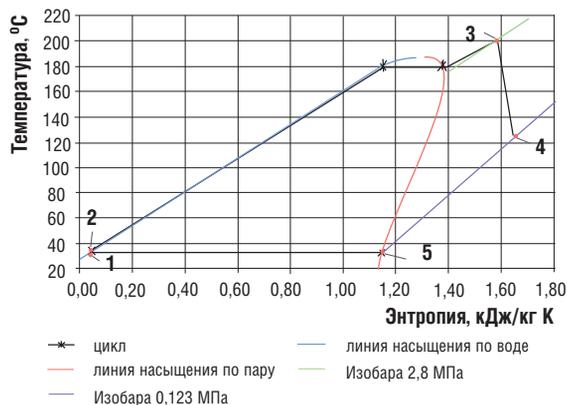


Рис. 5. Зависимость располагаемого теплоперепада на турбину и удельного объема рабочего тела перед турбиной от давления перед турбиной (при фиксированном статическом давлении за турбиной 0,123 МПа)

ней ступенью, существенно превышает нижнюю температуру цикла. Для компенсации этой особенности фазовой диаграммы в цикл вводится регенератор теплоты – сконденсированное рабочее тело подогревается в нем за счет охлаждения пара, выходящего из турбины.

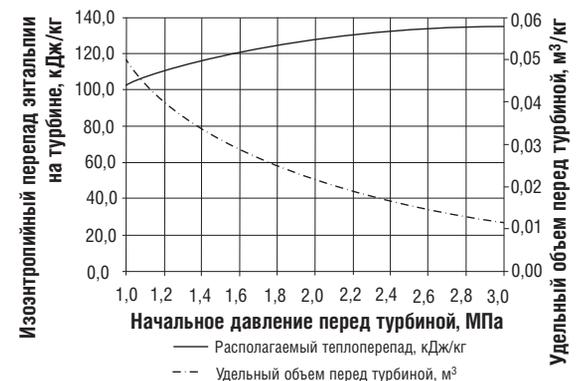
Также необходимо свести к минимуму возможные утечки рабочего тела из цикла. С технической точки зрения, это потребует создания надежных уплотнений как в самой паротурбинной установке, так и в теплообменных аппаратах, используемых в установке ОЦР. Возможным вариантом решения этой технической задачи является размещение турбины и генератора в едином герметичном кожухе, имеющем только патрубки для подвода и отвода рабочего тела. Относительно невысокие температуры рабочего тела исключают значительные термические напряжения в элементах конструкции турбины и создают благоприятные условия для применения систем магнитного подвеса.

Параметры перед турбиной и варианты конструкции

Важным фактором, во многом определяющим облик проточной части, являются параметры рабочего тела перед турбиной. Из рис. 5 видно, что при фиксированном статическом давлении за турбиной (0,123 МПа) увеличение давления перед турбиной более 2,8 МПа практически не приводит к увеличению располагаемого теплоперепада, а удельный объем рабочего тела перед турбиной при этом уменьшается.

Уменьшение удельного объема рабочего тела приводит к необходимости снижать пропускную способность ступени для обеспечения требуемого расхода – уменьшать высоту лопаток, эффективный угол выхода и вводить парциальность. На рис. 6 на TS-диаграмму состояния изопентана нанесены линии процесса при давлении перед турбиной 2,8 МПа и 1,0 МПа.

Снижение давления перед турбиной может благоприятно отразиться на ее конструкции – позволит отказаться от парциальности на пер-



вых ступенях, увеличить высоту лопаток, сократить число ступеней. С другой стороны, это приведет к изменению площадей поверхностей теплообмена в регенераторе и котле-утилизаторе.

Окончательно выбор оптимального давления перед турбиной должен проводиться с рассмотрением всех элементов установки ОЦР. Интенсивное увеличение удельного объема в процессе расширения при относительно небольших перепадах давления приводит к необходимости резко увеличить проходные сечения лопаточных венцов, особенно на последних ступенях (рис. 7). Для обеспечения заданного расхода и сохранения приемлемого увеличения высоты лопаток по ходу проточной части эффективные углы выхода из соплового и рабочего аппаратов ступени увеличиваются от первой к последней ступени.

Еще одной особенностью изопентана, как рабочего тела для паровой турбины, оказывающей значительное влияние на выбор конструкции, является относительно небольшое значение скорости звука в области диаграммы состояния, в которой происходит процесс расширения в турбине. При принятых начальных параметрах это приводит к тому, что даже при небольшом теплоперепаде на ступень числа $M_{аха}$ на выходе из соплового аппарата для всех ступеней близки к 1. Если требуется сохранять дозвуковой режим течения в ступенях, теплоперепады на них должны быть небольшими (до 20 кДж/кг), что, соответственно, приведет к увеличению числа ступеней. Как известно, теоретическая скорость выхода из сопла при изоэнтروпийном перепаде составит

$$c_0 = \sqrt{2 \cdot \Delta H}$$

При скорости звука в рабочем теле $\alpha_{зв}$ при параметрах за сопловой лопаткой число Маха на выходе из соплового аппарата ступени $M_{СА}$ составит

$$M_{СА} = \frac{c_0}{\alpha_{зв}} = \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta H / n_{ступ}}}{\alpha_{зв}}$$

где $n_{ступ}$ – число ступеней в турбине. Так, если принять теплоперепад на турбину 135 кДж/кг, что соответствует начальному давлению 2,8 МПа и статическому давлению за турбиной 0,123 МПа, а скорость звука средней по турбине – 206 м/с, то минимальное количество ступеней при дозвуковом режиме работы составит

$$n_{ступ_мин} = \frac{2 \cdot \Delta H}{M^2 \cdot \alpha_{зв}^2} = \frac{2 \cdot 135 \cdot 10^3}{1^2 \cdot 206^2} \approx 6$$

Технический параметр		Значение	
Начальное давление перед турбиной, МПа		2,80	1,00
Изоэнтропийный перепад на турбине, кДж/кг		134,8	102,9
Средняя скорость звука на выходе из соплового аппарата по всем ступеням, м/с		206,0	224,0
Минимальное число ступеней для различных чисел $M_{аха}$	$M=1,2$	4	3
	$M=1$	6	4
	$M=0,85$	9	6

В табл. представлены результаты оценки количества ступеней турбины для разных начальных давлений перед первой ступенью при статическом давлении за турбиной 0,123 МПа.

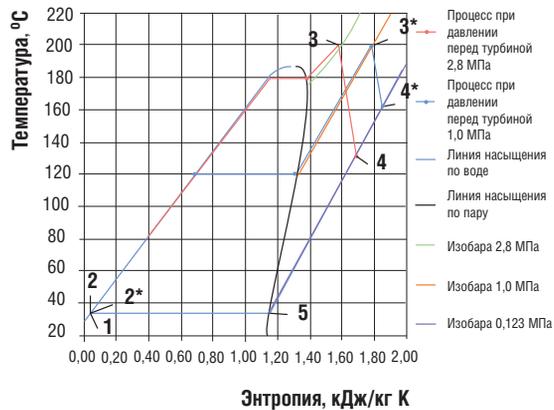


Табл. Оценка минимального количества ступеней для различных начальных давлений перед турбиной

Рис. 6. TS-диаграмма состояния изопентана с линиями процесса при давлении перед турбиной 2,8 МПа и 1,0 МПа

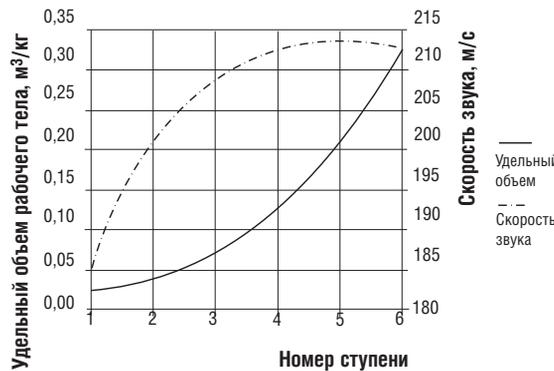


Рис. 7. Изменение удельного объема рабочего тела (изопентана) по ходу проточной части

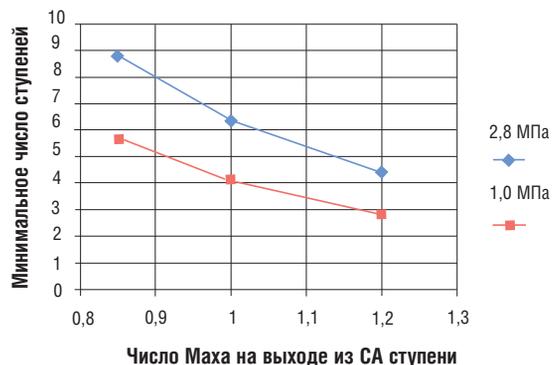
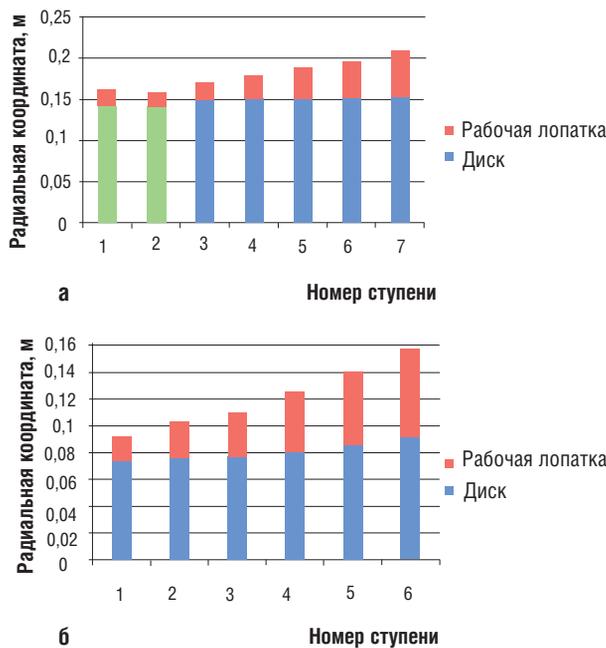


Рис. 8. Изменение минимального числа ступеней в турбине для различных начальных давлений при изменении числа Маха на выходе из соплового аппарата ступени

Рис. 9.
Геометрия проточной части турбины с парциальным подводом рабочего тела (3000 об/мин)



Рис. 10.
Геометрия проточной части высокооборотной турбины с полным подводом рабочего тела:
а) частота вращения 6000 об/мин;
б) частота вращения 10 000 об/мин



Однако стоит отметить, что, несмотря на сокращение числа ступеней, увеличение числа Маха на выходе из соплового аппарата приводит к увеличению степени парциальности ступени при сохранении одинакового массового расхода рабочего тела через проточную часть (рис. 8). Также при сокращении числа ступеней повышается интенсивность раскрытия проточной части. Значительное увеличение удельного объема рабочего тела на последних ступенях и невысокая скорость звука для изопентана приводят к необходимости делать последние ступени реактивными.

Одним из вариантов при отказе от парциальных ступеней является переход на более высокую частоту вращения – по предварительным оценкам до 10 000 об/мин. Средние диаметры ступеней в высокооборотной турбине при тех же начальных параметрах перед первой ступенью будут значительно меньше, интенсивность раскрытия проточной части и высоты лопаток – больше. В высокооборотной турбине на изопентане с полным подводом рабочего тела интенсивное раскрытие проточной части потребует отдельного рассмотрения вопросов

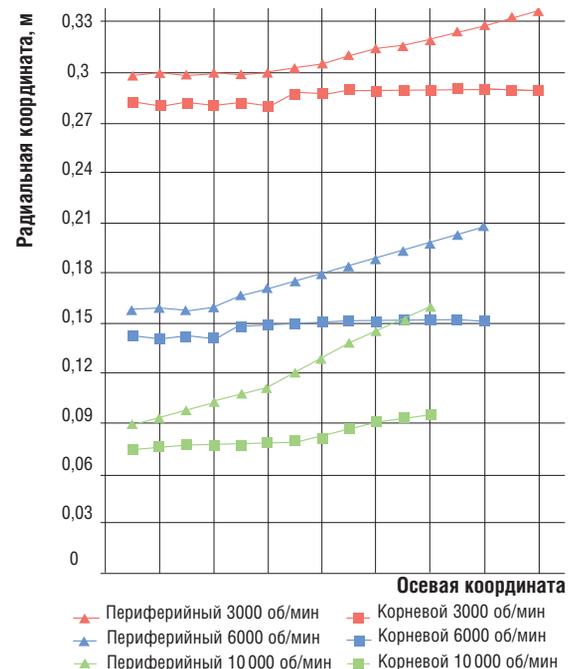
Рис. 11.
Предварительные корневой и периферийный обводы проточных частей различных вариантов исполнения паровой турбины для ОЦР

прочности рабочих лопаток и дисков последних ступеней.

Переход на более высокую (свыше 3000 об/мин) частоту вращения в энергетической турбине потребует установки дополнительного оборудования – редуктора или электрического преобразователя, в случае применения генератора с высокой частотой вращения. В ходе проработки вариантов конструкции паровой турбины, рабочим телом в которой является изопентан, и основываясь на значительном опыте АО «НЗЛ» в создании ПТУ средней и малой мощности, было сделано заключение, что ожидаемый адиабатический КПД паровой турбины не превысит 45...65% в зависимости от выбранных начальных параметров и вариантов конструкции. На рис. 9–11 представлены предварительные геометрические характеристики проточных частей паровых турбин для различных вариантов конструкции (парциальные ступени выделены зеленым цветом). **Д**

Список литературы

1. Программа по внедрению технологии утилизации тепла отходящих газов ГПА на компрессорных станциях РД 03-41 от 23.03.2016.
2. Паротурбинные установки с органическими рабочими телами / [М. М. Гришутин, А. П. Севастьянов, Л. И. Селезнев, Е. Д. Федорович]. – Москва : Машиностроение, 1988. – 219 с.
3. *The Properties of Gases and Liquids 5th edition 2004* / [Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell.]



HEAT & ELECTRO MACHINERY

Международная выставка
оборудования для промышленности
и теплоэнергоснабжения
гражданских объектов и
предприятий различных отраслей



24–26.10.2023

ЦВК «Экспоцентр», Москва



machinery-fair.ru

РЕКЛАМА

GA GEFERA MEDIA

Перспективные диффузионные алюминидные покрытия для турбин III-IV поколения

А. Н. Аксенов*, к. ф.-м. н. – начальник лаборатории ремонтных технологий,
9123975423@mail.ru

К. П. Бурдина* – ведущий инженер-технолог, *burdinakp@tyuiu.ru*
*ПАО «Тюменские моторостроители»

Ключевые слова:

химическое осаждение из паровой фазы, жаростойкие покрытия, алитирование, электролит Уатта, диффузионный барьер

Аннотация

Рассматриваются покрытия типа β (NiAl) для защиты рабочих лопаток турбины высокого давления III–IV поколений от высокотемпературного окисления. Для существенного увеличения жаростойкости выполняется легирование интерметаллида цирконием, путем предварительного гальванического осаждения композита Ni-Zr в электролите Уатта с последующим гомогенизационным отжигом.

Снижение нежелательного диффузионного взаимодействия покрытия с основой достигнуто с помощью барьера на основе рения. Альтернативно, изучался барьер на основе вольфрама.

Приводятся состав насыщающей смеси для контактного порошкового алитирования и режимы термообработки. Приводятся данные по сравнительным изотермическим испытаниям рабочих лопаток из сплава ЧС88У-ВИ с покрытиями ВСДП-11 (г. Уфа), МЗП-1+МКТП-1 (г. Николаев), β (NiAl) Zr и СВС+КДП-1 (г. Лыткарино).

Установлено, что жаростойкие свойства β (NiAl) Zr существенно превышают ВСДП-11. Шликерное покрытие СВС показало удовлетворительные результаты при работе в качестве соединительного подслоя под электронно-лучевое конденсационное покрытие КДП-1.

Promising diffusion aluminide coatings for turbines of the III-IV generation

A. N. Aksenov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences – Head of the Repair Technology Laboratory, *9123975423@mail.ru*

K. P. Burdina* – Leading Process Engineer, *burdinakp@tyuiu.ru*
*Tyumen Motor Builders PJSC

Key words:

chemical vapor deposition, heat-resistance coatings, aluminizing Watt electrolyte, diffusion barrier

Abstract

NiAl coatings are considered to protect the rotor blades of the modern high-pressure turbine blades (III-IV gen.) from high-temperature oxidation. To significantly increase oxidation resistance, the intermetallide (NiAl) is doped with zirconium by preliminary galvanic plate of the Ni-Zr composite in the Watt electrolyte, followed by homogenization annealing.

The reduction of the undesirable diffusion interaction of the coating with the superalloy is achieved with a rhenium-based barrier. Alternatively, a tungsten-based barrier has been studied.

The composition of the saturating mixture for contact powder alitizing and heat treatment modes are given. Data on comparative isothermal tests of working blades made of CHS88U-VI alloy with coatings VSDP-11 (Ufa), MZP-1+MKTP-1 (Nikolaev), (NiAl) Zr and SVS+KDP-1 (Lytkarino) are presented.

It was found that the heat-resistant properties of (NiAl) Zr significantly exceed VSDP-11. The SVS slip coating showed satisfactory results when working as a connecting sublayer under the electron beam condensation coating KDP-1.

Современная экономика требует от конструкторов и от производства не только повышения эффективности, мощности, надежности и ресурса новых ГТД, но и снижения их стоимости. Одним из решений поставленных задач может быть разработка недорогих защитных покрытий проточной турбины методом химического осаждения из паровой фазы (Chemical Vapor Deposition, CVD), который уже более полувека активно используется в турбомашиностроении для насыщения поверхности деталей кобальтом, хромом, алюминием.

Метод CVD активно развивается и уже позволяет получать термобарьерные керамические слои, аналогичные электронно-лучевым конденсатам [1]. В производстве достаточно давно отлажены надежные технологии формирования алюминидных защитных слоев на трактовых поверхностях, а также на поверхности внутренней полости охлаждаемых лопаток. Широко применяются методы контактного порошкового насыщения в муфелях и специальные газоциркуляционные установки.

Обычно CVD предполагает использование галогенидов соответствующих металлов в качестве прекурсоров. Как результат, на поверхности жаропрочного никелевого сплава (ЖНС) формируется защитный слой на основе NiAl (β -фаза) с примесью элементов основы (Cr, Co, Ti и пр.), но защитных свойств такого решения недостаточно для использования на трактовой поверхности рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) III поколения. Более качественные результаты могут быть получены при алитировании с дополнительным легированием металлами платиновой группы [2], активно применяемыми за рубежом на ГТД авиационного, судового и энергетического типа.

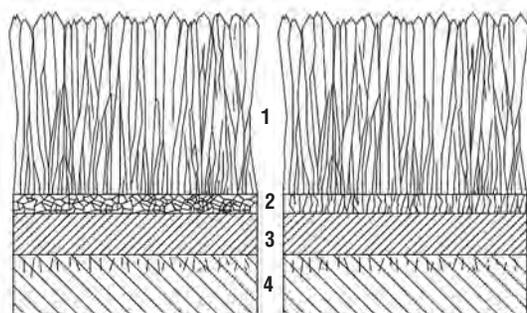
Оригинальная технология покрытия PtAl предполагает использование водородного CVD реактора с контролем активности процесса [3]. Для ЖНС с высоким содержанием алюминия (≥ 9 ат. %) высококачественное жаростойкое покрытие может быть сформировано primitивно: путем гальванического осаждения платины (~ 7 мкм) с последующим диффузионным отжигом [4], при этом CVD реактор не требуется, а пластичность, адгезия керамического электронно-лучевого конденсата и сопротивление окислению находятся на высоком уровне. Однако, несмотря на высокую эффективность платины, ее использование не может считаться рациональным (на каждую типовую лопатку потребуется от 1 до 4 граммов драгметалла). Но результаты [5] позволяют качественно повысить жаростойкость алюминидных покрытий без использования дорогих материалов.

В ходе серийных испытаний образцов плавки β (NiAl) были зафиксированы отдельные случаи аномально высокой окислостойкости, превышающей стандартные значения до 10 раз. Эффект проявлялся только при использовании тиглей из оксида циркония, и последующие исследования подтвердили гипотезу микролегирования плавки цирконием из тигля, а также установили его оптимальную концентрацию в диапазоне 0,05...0,25 масс. % [6]. Замена циркония гафнием увеличивает жаростойкость интерметаллида дополнительно в 1,5...2 раза (для температур 1100...1200 °C), при этом допуск на концентрацию Hf больше [7].

Высокое химическое родство циркония или гафния к кислороду качественно меняет микроструктуру окарины (термически выращенного оксида, ТВО) с равноосной на направленную (рис. 1). Столбчатый слой ТВО имеет лучшие механические свойства (модуль Юнга, адгезию) и хорошо себя проявляет при термоциклических нагрузках, а равноосная структура ТВО разрушается, восстанавливается, быстро исчерпывает запас алюминия.

В настоящей работе формирование слоя β (NiAl) Zr проводилось контактным способом в муфелях (с предварительным вакуумированием и/или в инертной атмосфере). Как оказалось, подход ONERA не позволяет точно контролировать концентрацию циркония. Более того, связанная вода в прекурсор провоцирует нежелательное спекание насыщающей смеси.

Для повышения чистоты химического состава β (NiAl) Zr рассматривался диффузионный барьер на основе вольфрама. Аналогично [10] была отработана методика гальванического осаждения слоя NiW с требуемым распределением по всей поверхности рабочей лопатки, однако после всех промежуточных термообработок созданный барьер оказался подвижным, нестабильным и распределялся в объеме внешней зоны покрытия при испытаниях. Лучшие результаты были получены с барьером на основе Re (~ 10 мкм), который наносился из электролита с рениевокислым аммонием (20...25 г/л) на никелевых анодах.



Исследования Французского центра аэрокосмических исследований (Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatiales, ONERA) показали, что покрытия (NiAl) Zr и NiPtAl на образцах из монокристаллического сплава AM1 имеют равную термоциклическую жаростойкость (при базе испытаний $\tau = 2500$ ч, $T = 1100$ °C, выдержка $\Delta t = 1$ ч), а также хорошо подходят в качестве подслоя под керамический электронно-лучевой конденсат 7YSZ [8,9].

Рис. 1. Схема архитектуры теплозащитного покрытия (для простоты восприятия масштаб не соблюден): 1 - керамический электронно-лучевой конденсат; 2 - термически выращенный оксид α (Al₂O₃); 3 - жаростойкий слой β (NiAl) (слева) и β (NiAl)Zr (справа); 4 - диффузионный слой;

Лучшим технологическим решением проблемы контроля концентрации Zr является работа [11], в которой предлагается предварительное никелирование поверхности сплава в электролите Уатта (плотность тока $\sim 150 \text{ А/м}^2$) с добавлением металлического порошка циркония (6 г/л; средний размер частиц 3 мкм). После осаждения композита Ni-Zr (слой не менее 25 мкм) выполняется гомогенизационный отжиг и алитирование с последующим старением основы.

В процессе покрытия опытных рабочих лопаток слоем Ni-Zr был выявлен заметный «питтинг» и утолщение осадка вблизи выходной кромки. Первая проблема была решена с помощью подвеса лопатки на вибратор; вторая – установкой на выходную кромку пера прямоугольной пластины, сдвигающей неравномерность потенциала на себя. Добавка циркония в виде порошка ПЦрК1 улучшает рассеивающую способность электролита Уатта. Формируемый осадок – светло-серебристого цвета, с распределением по профилю от 25 до 30 мкм. Для поддержания частиц циркония во взвешенном состоянии использовалась магнитная мешалка. Гомогенизация композита Ni-Zr совмещалась со стандартной термообработкой сплава ЧС88У-ВИ. Последующее алитирование препарированных лопаток выполнялось в индивидуальных муфелях $\varnothing 90 \times 200$ с полной засыпкой насыщающей смесью с массовым составом: 1,7 % алюминиевый порошок АСД-4; 1,2 % NH_4Cl ; 97,1 % корунд 25AF180. Режим термообработки (с учетом кинетики нагрева): 870 °С; 3,5 часа; атмосфера – аргон.

Еще более эффективным и экономным жаростойким покрытием является разработка специалистов Лыткаринского машиностроительного завода и МГТУ ГА по жаростойкому покрытию типа «СВС» [12], высокие защитные

свойства которого обусловлены быстрыми экзотермическими реакциями, вплоть до уровня самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в слое шликера, наносимого краскораспылителем из водной суспензии. Формируемые покрытия – плотные, без пор при 10 000-кратном увеличении.

Технология СВС апробирована на сплавах ЖС6У, ЖС32 и ВЖЛ12У (рабочие лопатки первой и второй ступени турбины, сопловые блоки и элементы сопла двигателей), а также на новых сплавах ВЖМ4 и СЖЛС3. Общая толщина слоя на всех сплавах – 40...80 мкм.

По результатам сравнительных изотермических испытаний опытных рабочих лопаток ТВД ДГ90 из сплава ЧС88У-ВИ с покрытиями ВСДП-11 (Уфа), МЗП-1+МКТП-1 (Николаев), β (NiAl) Zr (Тюмень), СВС+КДП-1 (Лыткарино) в атмосферной электропечи при $T=1100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t=100 \text{ ч}$ установлено:

- жаростойкий слой ВСДП-11 близок к исчезанию защитных свойств (по реакции $\beta \rightarrow \gamma'$) и может иметь опасные сквозные прогорания в радиусах перехода пера в бандажные полки;
- покрытие НПКГ «Зоря–Машпроект» вспучилось при толщине ТВО $\sim 4 \text{ мкм}$;
- β (NiAl) Zr выдерживает, как минимум, двойной ресурс (по сравнению с ВСДП-11) без существенной деградации микроструктуры и снижения концентрации алюминия;
- СВС+КДП-1 проявило себя наилучшим образом: без сколов, вспучиваний или отслоений; ТВО – 2,5 мкм.

Выводы:

1. Разработано покрытие β (NiAl) Zr для защиты лопаток турбины ДГ90 от высокотемпературного окисления. Его свойства допускают применение как в качестве самостоятельного функционального слоя, так и в качестве связующего с электронно-лучевыми керамическими конденсатами. Технология формирования β (NiAl) Zr относительно проста и может быть освоена в короткие сроки.

2. На рабочих лопатках ТВД ДГ90 апробировано шликерное покрытие СВС по технологии Лыткаринского машиностроительного завода. По результатам контроля выносливости и изотермической жаростойкости архитектуры СВС+КДП-1 замечаний не выявлено.

3. Сравнительными лабораторными испытаниями показано, что защитные слои β (NiAl) Zr и СВС качественно превосходят ВСДП-11 по жаростойкости. Для СВС преимущество дополнительно проявляется в испытаниях на сульфидную коррозию и на стойкость к термоциклированию до появления первой трещины.

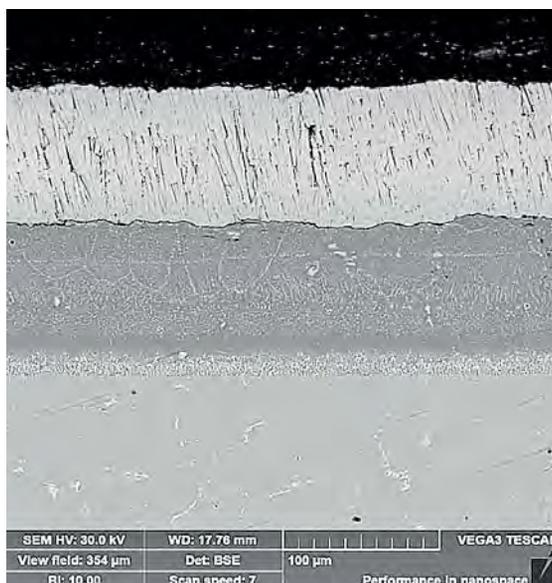


Рис. 2.
Микроструктура архитектуры
СВС+КДП-1

4. Серийное теплозащитное покрытие ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» не прошло испытания на изотермическое окисление в атмосферной печи по режиму 1 100 °С, 100 ч.

5. Стоимость отдельного СВС покрытия до 3,5...4 раз ниже ионно-плазменных методов нанесения ВСДП-11, а с электронно-лучевым керамическим слоем – до 1,5...2 раз. **D**

Список литературы

1. Игуменов И.К., Аксенов А.Н. Термобарьерные покрытия лопаток газовых турбин: метод химического осаждения из паровой фазы (обзор) // Теплоэнергетика. 2017. №12. С. 5-15.

2. Wing R. G., McGill I. R. The Protection of Gas Turbine Blades: A Platinum Aluminide Diffusion Coating // Platinum Metals Rev. 1981. Vol. 25 (Issue 3). P. 94-105.

3. Near D. Active element modified platinum aluminide diffusion coating and CVD coating method. US patent 6291014 C23 C16/08, 2001.

4. Pint B. A., Haynes J. A., Zhang Y. Effect of superalloy substrate and bond coating on TBC lifetime // Surface and Coating Technology. 2010. Vol. 205. P. 1236-1240.

5. Barrett Ch. A. Effect of 0.1at% Zirconium on the Cyclic Oxidation Resistance of β -NiAl // Oxidation of Metals. Vol. 30. Nos. 5/6. 1998. P. 361-390.

6. Barrett Ch. A., Lowell C. E. Nickel base coating alloy. US patent 4, 610, 736.

7. Pint B. A., Wright I. G., etc. Substrate and bond coat compositions: factors affecting alumina scale adhesion // Materials Science and Engineering. Vol. A245. 1998. P. 201-211.

8. Thery P.-Y. Adherence de barriers thermiques pour aube de turbine avec couche de liaison β -(NiPt)Al ou β -NiAl(Zr). Mechanics. Universite Joseph-Fourier – Grenoble I, 2007. French.

9. Bacos M.-P., Dorvaux J.-M., Landais S. etc. 10 Years-Activities at Onera on Advanced Thermal Barrier Coatings // J. Aerospace Lab. Issue 3. 2011. P.1-14.

10. Cavaletti E. Etude et developpement de barriere de diffusion pour les sous-couches de systeme barriere thermique. l'Institut National Polytechnique de Toulouse. 2009. French.

11. Narita T., Thosin K. Z., etc. Development of Re-based diffusion barrier coatings on nickel based superalloys // Materials and Corrosion. 2005. Vol. 56. No. 12. P. 923-929.

12. Иванов Е.Г., Самойленко В.М., Равилов Р.Г., Петрова М.А. Применение покрытий из водной суспензии для защиты деталей ГТД от коррозии // Научный вестник МГТУ ГА. №217. 2015. С. 46-50.



Представлена новая компания на рынке систем управления генераторных установок.

Deep Sea Electronics Ltd. (дочернее предприятие компании Generac) и немецкая Motortech GmbH объявили о создании компании по управлению и автоматизации. Controls and Automation Business Group специализируется на производстве систем управления дизельными и газопоршневыми двигателями и генераторными установками.

Deep Sea Electronics со штаб-квартирой в г. Ханманби (Великобритания) разрабатывает, производит и поставляет продукцию для дизельных двигателей и генераторных установок на их основе. Motortech, расположенная в г. Целле (Германия), поставляет аналогичные продукты и технологии для двигателей и генераторных установок, работающих на газовом топливе.

Бизнесы компаний являются взаимодополняющими, и, объединившись, они смогут удовлетворить все специфические требования заказчиков. Совокупная численность персонала компаний составит более 500 сотрудников, общий годовой доход – \$125 млн. При этом обе компании останутся отдельными юридическими лицами.

Motortech GmbH объявила о консолидации всех активов в своей новой штаб-квартире, что приведет к закрытию производственных площадок в Центральной Европе. С 1 июня все отделы и производственные мощности переводятся в г. Целле, в связи с чем компания прекращает всю деятельность на своем предприятии в г. Чаржино (Польша). Перенос всего производства в Германию позволит компании оптимизировать работу и материальные потоки.

Концерн Siemens поставит газовые турбины в Узбекистан.

ГТУ предназначены для ТЭС в г.г. Бухаре и Кашкадарье. В рамках узбекско-германского бизнес-форума, проходившего 2 мая, Siemens Energy и узбекская компания «Тепловые электрические станции» подписали контракты стоимостью 72 млн евро на поставку четырех газотурбинных энергоблоков SGT-800 когенерационного цикла. ГТУ электрической мощностью по 54 МВт установят в котельной №-3 в г. Бухаре и на Мубарекской тепловой электростанции в г. Кашкадарье.

В результате ввода ГТУ общая генерирующая мощность станций в стране увеличится на 216 МВт. Это позволит ежегодно дополнительно производить 1,7 млн кВт·ч электрической и 1,5 Гкал·ч тепловой энергии.

Планируется, что компания Siemens также построит несколько новых электростанций. Строится тепловая электростанция в Сурхандарьинской области – ее ввод запланирован на 2026 г. Также компания примет участие в возведении ТЭС для Навоийского химического комплекса.



Устойчивое развитие энергетики на основе достижений и современных разработок российского энергомашиностроения

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

In brief

Sustainable power industry development based on the achievements and modern developments of the Russian power-plant engineering.

In May, the Ural Turbine Plant in Yekaterinburg hosted Sustainable Energy Development based on the achievements and modern developments of Russian Power Engineering international scientific and technical conference. It was dedicated to the 85th anniversary of the Ural Turbine Plant, which is celebrated in October this year. The conference brought together more than 150 specialists – representatives of industrial enterprises, engineering companies, research institutes, operating energy organizations from all over Russia, Belarus and Kazakhstan. Ural Turbine Plant presented new products and developments for the modernization of power equipment, the experience of implementing modern projects was analyzed, new approaches to maintenance were discussed in detail separately.

В мае в г. Екатеринбурге на Уральском турбинном заводе» состоялась международная научно-техническая конференция «Устойчивое развитие энергетики на основе достижений и современных разработок российского энергомашиностроения». Она была посвящена 85-летию Уральского турбинного завода, которое отмечается в октябре этого года.

Конференция собрала более 150 специалистов – представителей промышленных предприятий, инжиниринговых компаний, научно-исследовательских институтов, эксплуатирующих энергетических организаций со всей России, из Белоруссии и Казахстана.

Основная тематика докладов:

- Новые продукты паротурбинного оборудования;
- Технические решения и разработки для модернизации существующего энергооборудования;
- Диалог энергетиков и энергомашиностроителей для совместного поиска лучших решений;
- Сервисное направление;
- Инновации в системах управления.

Уральский турбинный завод представил новые продукты и разработки по модернизации энергетического оборудования, был проанализирован опыт реализации современных проектов, отдельно подробно обсуждались новые подходы к техническому обслуживанию. Предметом обсуждения стали современные направления развития в области энергомашиностроения, в том числе паровые турбины малой мощности, турбины на сверхкритических параметрах, турбины для геотермальной энергетики, одноцилиндровая теплофикационная турбина 100 МВт и другие проекты. С докладами выступили ведущие специалисты

АО «УТЗ», АО «РОТЕК», АО «Невский завод», МЭИ, ОАО «НПО ЦКТИ», УРФУ партнеры и заказчики предприятия: АО «Ракурс», НПО «Элсиб», АО «СУЗМК Энерго» и многие другие.

Для участников конференции была проведена экскурсия на производственную площадку УТЗ, чтобы близко ознакомиться с одним из передовых энергомашиностроительных заводов России. На предприятии ведется активная модернизация, устанавливаются новые уникальные станки для обработки корпусных деталей, внедряются передовые технологии. В связи с необходимостью выполнять обязательства по стремительно растущему спросу на продукты в ближайшие годы число сотрудников УТЗ планируется увеличить вдвое. Расширяются конструкторское бюро, сервисная служба.

О новых продуктах АО «УТЗ», реализуемых проектах, достижениях предприятия рассказал технический директор *Т. Л. Шибяев*. На заводе трудится более 1500 высококвалифицированных специалистов, в год выпускается 16 комплектов турбин суммарной мощностью до 1,6 ГВт. Портфель заказов предприятия составляет более 60 млрд рублей. Специальное конструкторское бюро турбостроения осуществляет полный цикл разработки продукции, активно применяется технология нисходящего и модульного проектирования с использованием «Цифрового макета изделия» и «Единого расчетного комплекса». Уральский турбинный завод обладает 61 действующим патентом и 33 ноу-хау, непрерывно разрабатываются совершенно новые продукты и технологии. Особое внимание уделяется внедрению и развитию модульных подходов к проектированию.

Обеспечение предприятия квалифицированными кадрами – одна из ключевых задач на сегодня. УТЗ участвует в создании Уральской передовой инженерной школы для подготовки специалистов высокой квалификации.

Рассказывая о новой продукции предприятия, докладчик отметил основные новшества в конструкции турбин, использование современных материалов и высокотехнологичных компонентов. Среди перспективных новых продуктов УТЗ – турбина К-250 мощностью 250 МВт на давление 12,8 и 23,5 атм, одноцилиндровая турбина на 100 МВт, высокоскоростные турбины малой мощности, турбина малой мощности на суперсверхкритические параметры (ССКД).

О технологических возможностях предприятия доложил Д. В. Ларин (АО «УТЗ»). Предприятие выполняет механическую обработку всех деталей и узлов турбин, сварку корпусов цилиндров и теплообменного оборудования, необходимые виды контроля материалов и геометрии, разгонно-балансирующие испытания роторов, сборку турбины на стенде. Производятся разные виды ремонта оборудования в заводских условиях.

Динамическая балансировка роторов выполняется во всем рабочем диапазоне частот вращения – до 18 000 об/мин. Разгонные испытания роторов проходят в соответствии с нормами ISO-1940-1-2007. Высокочастотная балансировка роторов проводится на уникальном модернизированном стенде Schenck – вакуумной балансировочной камере.

Осуществляется обработка деталей диаметром до 3,7 м и длиной до 10 м. На предприятии работают уникальные токарно-карусельные, горизонтально-расточные, порталные центры для обработки корпусов паровых турбин мощностью более 100 МВт.

Доклад «Реинжиниринг рабочих лопаток турбомашин. Усталостные испытания» представил С. Н. Гаврилов (НПО «ЦКТИ»). Реинжиниринг (реверс-инжиниринг), или обратное проектирование, – это дублирование изделия по готовому образцу, он нужен в случаях отсутствия документации или если изделие снято с производства. Детали могут изготавливаться в соответствии с аналогами, например, по программе импортозамещения.

В ходе выполнения реинжиниринга выполняется сканирование аналога, поверочные прочностные расчеты. Усталостные испытания на предел прочности поставляемых лопаток осуществляются на стенде института. Длина испытываемых лопаток составляет 100...2 100 мм, частота возбуждения – 10...1 000 Гц.



В. Г. Рубцов (АО «УТЗ») ознакомил участников с предложениями по восстановлению энергетического оборудования ТЭС на примере турбин типа Т-250/300-240. Производство данных турбин осуществлялось с 1975 по 1992 гг., была изготовлена 31 турбина. ПТУ установлены и работают в странах СНГ. Взамен турбины Т-250 в 2022 году на ТЭЦ-22 «Мосэнерго» введена в эксплуатацию турбина типа Т-295/305-23,5.

Модернизация ПТУ в условиях завода позволяет не только произвести замену выработавшего свой ресурс оборудования, но и выполнить ремонт крупных сохраняемых узлов – роторов, диафрагм и др. Восстанавливается ресурс, увеличивается мощность турбины, тепловая нагрузка, повышаются техникоэкономические и эксплуатационные показатели оборудования. Специалисты УТЗ осуществляют техническое сопровождение модернизированного оборудования в эксплуатации.

В ходе комплектной модернизации устанавливаются современный лопаточный аппарат, высокоэффективные уплотнения, усовершенствованные маслозащитные уплотнения, токосъемное устройство новой конструкции. В новом опорно-упорном подшипнике достигается снижение тепловых и силовых деформаций, повышение несущей способности.

О новых продуктах АО «УТЗ», реализуемых проектах, достижениях предприятия рассказал технический директор Т. Л. Шибяев.

Сборка ротора паровой турбины на Уральском турбинном заводе





🕒 Конференция собрала более 150 специалистов – представителей промышленных предприятий, инжиниринговых компаний, научно-исследовательских институтов, эксплуатирующих энергетических организаций со всей России, из Белоруссии и Казахстана.

Блоки клапанов ВД и СД имеют улучшенные газодинамические показатели, снижаются потери давления.

К преимуществам ремонта на заводе относится отлаженная схема проведения ремонтов, учет «истории» ротора и профессиональный контроль всех его элементов, установка запасных частей улучшенной конструкции. Выпускается полный комплект документации, необходимый для дальнейшего обслуживания ротора. В результате восстановленный ресурс турбины может достигать до 50 лет, а ресурс деталей и элементов – до 250 тыс. часов.

Доклад Д. С. Кшесинского (НПП «Уральская лаборатория вибрации») был посвящен актуализации подходов и целей диагностического сопровождения и наладки турбоагрегатов. Основная цель сопровождения – обеспечение бесперебойной, эффективной и надежной эксплуатации оборудования на всем жизненном цикле. Докладчик представил структуру комплексного обслуживания, рассмотрев сопровождение в рамках организации ремонта, а также в рамках выявления и устранения неисправностей.

Представлен анализ логических ошибок типовых моделей технического обслуживания. Предложен комплексный подход, включающий

🕒 Обработка корпуса паровой турбины на горизонтально-расточном станке



интеграцию методик статистических подходов мониторинга оборудования, совершенствование и расширение оснащения турбоагрегатов, расширение методов и подходов диагностирования и обработки результатов, разработку современных систем подготовки специалистов и управления процессами.

О применении сварочных технологий для ремонта роторов паровых турбин предприятием «Уралэнергоремонт» рассказал В. Л. Мазуровский. Докладчик проанализировал различные виды повреждений, возникающих в ходе эксплуатации паровых турбин, дефекты, обнаруженные при разборке роторов и проведении одного или нескольких ремонтов. Альтернативным решением для ремонта слесарным способом является применение сварочных технологий. Однако существует мнение о недопустимости использования сварки при ремонте элементов роторов в связи с появлением зон механической, химической и структурной неоднородности, вызванных влиянием термомеханического цикла сварки. В течение последних трех десятилетий в АО «Уралэнергоремонт» и ОАО «НПО ЦКТИ» проводились глубокие исследования по применению сварочных технологий для изготовления и ремонта роторов паровых турбин.

Феноменологическая модель неравновесной кристаллизации металлического расплава сварочной ванны и математическое описание структурной диаграммы матрицы наплавленного металла, разработанные предприятием «Уралэнергоремонт» и объединенные в единую феноменологическую модель формирования сварного соединения, позволили успешно решить данную задачу. Этому способствовало широкое внедрение компьютерных технологий и применение системного подхода и структурного анализа к решению данной проблемы.

О современных решениях Группы «Газпром энергохолдинг индустриальные активы» для энергетики рассказал А. Ю. Култышев. Предприятия, входящие в Группу, предлагают широкий спектр продукции и оказываемых услуг. Это паровые и газовые турбины, компрессоры, газоперекачивающие агрегаты, котельное оборудование, запчасти для ГТУ и ПТУ, комплексные САУ, системы магнитного подвеса, теплоизоляционные материалы для предприятий энергетического комплекса и многое другое. Выполняется ремонт, обслуживание и техническое сопровождение ГТД, а также диагностика, ремонт и обслуживание оборудования электростанций в процессе эксплуатации.

В следующем году на Невском заводе будет полностью завершена локализация газопере-

качивающего агрегата ГПА-32 «Ладога». Предприятие предлагает замену зарубежного газодожимного компрессорного оборудования производства Borsig, Atlas Copco, Camercon и др. на базе унифицированной линейки компрессоров. Завершена локализация блока управления газовой турбиной на элементной базе ПТК ТЕКОН. В 2019 г. начал работать ситуационный центр на базе собственного программного обеспечения, сегодня 30 единиц ГТУ подключены к центру онлайн мониторинга.

На Невском заводе успешно применяется в конструкции опорных и упорных подшипников антифрикционный полимерный композитный материал К30ПТ вместо традиционного баббита Б-83, с сохранением конструктивных размеров деталей. На предприятиях компании выпускается система магнитных подвесов для ротационного оборудования. Типоразмеры магнитов покрывают основной модельный ряд энергетического и нефтегазового оборудования.

На предприятиях Группы «Газпром энергохолдинг индустриальные активы» при разработке оборудования используются новые принципы модульного и блочно-модульного проектирования, что позволяет снижать затраты на сопровождение его жизненного цикла и повышать конкурентоспособность продукции и предприятия.

Новые разработки турбогенераторов в диапазоне мощности 165...315 МВт для паровых и газовых турбин представил Д. С. Томилов (НПО «Элсиб»). На предприятии осуществляется полный технологический цикл изготовления электрических машин, имеется заготовительное, сборочное изоляционно-обмоточное, инструментальное производство. Выпускаемая продукция сертифицирована, технические решения и уникальные разработки закреплены соответствующими патентами, сертификатами и разрешениями. Докладчик остановился на модельном ряде различных типов генераторов, рассказал о проектах, реализованных в последние годы.

Новый турбогенератор ТФ-220-2У3 номинальной мощностью 220 МВт разработан предприятием для работы с газовыми турбинами. Турбогенератор имеет закрытое исполнение. Охлаждение осуществляется воздухом по замкнутому контуру под действием двух осевых вентиляторов, установленных на валу ротора. Воздух охлаждается водой, которая прокачивается через воздухоохладители. Изоляция обмотки статора – по классу нагревостойкости F. Многоструйная система охлаждения сердечника обеспечивает эффективный отвод тепла от обмотки и сердечника.

Решение для построения отечественной АСУ энергоустановки представил А. И. Макаревич (ООО «Прософт-Системы»). Для построения АСУ ТП используются ПЛК REGUL RX00, ПТК AstraRegul, датчики механических величин. AstraRegul – программно-аппаратная платформа для создания АСУ технологических процессов, используется для создания распределенных систем управления и систем противоаварийной автоматической защиты технологических процессов.

Платформа имеет четыре подсистемы: электрическая часть системы регулирования и защит, АСУ общетурбинного и вспомогательного оборудования, контроль вибрации, механических величин и диагностики, противоразгонная защита турбины. Подсистемы могут поставляться как в комплексе, так и по отдельности. ПЛК REGUL RX00, ПТК AstraRegul широко используются в атомной, тепловой энергетике, гидроэнергетике, в транспорте нефти и газа, нефтепереработке и других отраслях.

На конференции были представлены доклады по различным аспектам эксплуатации, модернизации, продления ресурса, диагностики турбин, различных элементов и систем паросиловых установок и котельного оборудования. Докладчики отвечали на большое количество вопросов коллег и специалистов эксплуатирующих организаций. Нужно отметить высокий уровень организации мероприятия, вовлеченность специалистов и актуальность обсуждаемых вопросов.

Проведение подобных научно-технических конференций, безусловно, способствует развитию российской инженерной школы энергетического машиностроения. Редакция планирует публикацию статей, подготовленных на базе докладов, прозвучавших на конференции. **Т**

Для участников конференции была проведена экскурсия по предприятию (сборка паровой турбины на стенде завода)



Установлена передвижная электростанция в с. Амга, Якутия.

Специалисты ПАО «Якутскэнерго» (входит в группу «РусГидро») поставили и ввели в эксплуатацию ГТЭС в Амгинском районе.

Газотурбинная электростанция ПАЭС-2500 мощностью 2,5 МВт поставлена с целью увеличения мощности ДЭС села Амга и бесперебойного электроснабжения потребителей Амгинского района. ГТЭС служит дополнительным резервным источником на период временных ограничений электроснабжения.

Mitsubishi Power заключила контракт на поставку газотурбинной электростанции на Тайвань.

Контракт на поставку оборудования заключен с компанией Chang Chun Plastics Co., Ltd. Газотурбинный энергоблок мощностью 30 МВт, созданный на базе газовой турбины H-25, будет работать в составе электростанции когенерационного цикла, которая строится на предприятии Dafa в г. Гаосюн. Это первый проект на базе газовых турбин H-25, который Mitsubishi Power реализует на Тайване. Производимые электроэнергия и пар будут использоваться для технологических нужд предприятия. Ввод ГТЭС в коммерческую эксплуатацию планируется в 2023 г.

Предприятие Dafa находится в индустриальном парке в г. Гаосюн, район Даляо. ГТЭС заменит существующую котельную, работающую на мазуте и угле, в рамках региональной программы по снижению потребления угля и сокращения уровней эмиссии CO₂, а также изменения энергетической политики Тайваня.

Mitsubishi Power поставит основное и вспомогательное оборудование станции, а также выполнит строительные-монтажные и пусконаладочные работы. В перспективе планируется поставить еще четыре энергоблока H-25 для строительства когенерационных электростанций на предприятиях группы компаний Chang Chun Group на Тайване.



На Юрубчено-Тохомском месторождении введена вторая очередь ГТЭС.

Электростанция собственных нужд обеспечит электроэнергией одно из крупнейших месторождений нефти Красноярского края. Предприятием «ОДК-Газовые турбины» поставлено и введено в эксплуатацию шесть газотурбинных агрегатов ГТА-6РМ номинальной мощностью по 6 МВт.

Агрегаты ГТА-6РМ имеют блочное исполнение, могут работать на двух видах топлива — на попутном газе и дизельном топливе. В качестве силовой установки используются газотурбинные приводы ГТД-6РМ разработки и производства ПАО «ОДК-Сатурн».

Ранее, в 2015–2016 гг., на месторождении было установлено оборудование первой очереди суммарной мощностью 36 МВт. Специалисты АО «ОДК-ГТ» выполнили шефмонтаж и пусконаладку агрегатов, провели инструктаж персонала и запуск оборудования в эксплуатацию.

Юрубчено-Тохомское нефтегазоконденсатное месторождение находится в Красноярском крае, в 280 км к юго-западу от поселка Тура.

ОБЗОРЫ РЫНКА энергетического оборудования

Самый полный массив данных в России

- Контракты и реализованные проекты
- Изготовители двигателей и генераторных установок
- Дилеры, поставщики оборудования
- Инжиниринговые и проектные организации
- Представительства зарубежных компаний

www.turbine-diesel.ru

РЕКЛАМА

АО «Уралтурбо» изготовило новый ротор турбины низкого давления ГТН-16.

Предприятие в марте завершило изготовление ротора ТНД для газотурбинной установки ГТН-16, эксплуатирующейся на Ново-Пельмской компрессорной станции (ООО «Газпром трансгаз Югорск»). Благодаря поставке нового ротора на КС, отремонтирована турбина низкого давления привода газоперекачивающего агрегата ГТН-16 производства Уральского турбинного завода.

В феврале предприятием при ремонте ротора осевого компрессора высокого давления ГТН-16 был заменен диск ступени «В» и рабочие лопатки. После завершения ремонта ротор прошел высокочастотную балансировку на заводе «Турборемонт» (АО «Газэнерго-сервис»). Ротор доставлен в Краснотурьинское ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Югорск».



- Системы зажигания
- Визуальные уровнемеры
- Системы контроля детонации
- Регуляторы оборотов и актуаторы
- Воздушные и газовые стартеры
- Компоненты системы зажигания
- Системы управления компрессорами
- Системы соотношения воздух/топливо
- Контроллеры и зарядные устройства
- Высоковольтные провода
- Регуляторы уровня масла
- Измерительные приборы
- Датчики уровня
- Свечи зажигания промышленной серии
- Каталитические нейтрализаторы и глушители



РЕКЛАМА

**Хатрако – ваш надежный и компетентный партнер
 по поставке запасных частей в России и Европе.**





ОБЪЕДИНЯЯ
СИЛЬНЕЙШИХ

ТЕХНОЛОГИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ВЕДУЩИХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ПРОИЗВОДСТВО И КОМПЛЕКСНЫЕ
ПОСТАВКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ

ИЗГОТОВЛЕНИЕ
ЗАПАСНЫХ
ЧАСТЕЙ

РЕМОНТ И СЕРВИСНОЕ
ОБСЛУЖИВАНИЕ
АГРЕГАТОВ

ГРУППА ПРОМЫШЛЕННЫХ, НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И СЕРВИСНЫХ КОМПАНИЙ.
КЛЮЧЕВОЙ ИГРОК НА РЫНКЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ОКАЗАНИЯ
СЕРВИСНЫХ УСЛУГ.

- Производство и комплексные поставки газотурбинного и компрессорного оборудования
- Ремонтно-сервисное обслуживание и инженерно-техническое сопровождение ГТД авиационного и судового типа
- Заводской ремонт и производство запасных частей для газоперекачивающих агрегатов, газотурбинных установок и двигателей
- Инженерно-конструкторское сопровождение
- Производство теплоизоляционных материалов для предприятий энергетического комплекса
- Модернизация и восстановительный ремонт
- Сервисное обслуживание и ремонт оборудования электростанций
- Экспертиза технического состояния оборудования с целью продления ресурса
- Удаленный мониторинг и диагностика энергетического оборудования

ПРОМЫШЛЕННЫЕ АКТИВЫ ГРУППЫ — КРУПНЫЕ РОССИЙСКИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ:

АО «Невский Завод»

ПАО «Тюменские моторостроители»

АО «Газэнергосервис»

ОАО «Уралтурбо»

ООО «ЦРМЗ»

ООО «ИТЦ»

ООО «ГЭХ Сервис газовых турбин»



РЕКЛАМА

www.gehia.ru