

ИЮЛЬ
АВГУСТ
2023

Турбины и Дизели

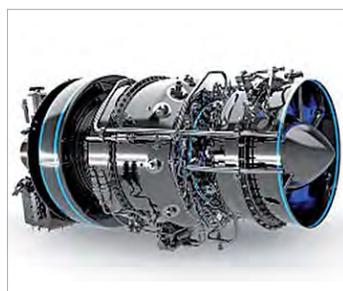
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№4 (109)



**АО «Газэнергосервис» – 30 лет
в авангарде ремонта и обслуживания
нефтегазового оборудования**

16+



**Разработка отечественной мобильной
компрессорной установки
с моторкомпрессором ICL Baker Hughes**

**Система управления жизненным
циклом изделия: какая нужна сегодня?**

На рынке с 2010 года

ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИЕ АГРЕГАТЫ, ГАЗОТУРБИННЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И КОМПРЕССОРНЫЕ УСТАНОВКИ



Компания входит в Перечень системообразующих организаций Российской экономики



ПКУ-005, мощность 630 кВт, 1 шт.
УКПГ м-я «Алибекмола», ТОО «Казах Ойл Актобе»



ГПА-6 МВт и ГПА-10 МВт «Иртыш», 1 шт. и 2 шт.
ДКС Уренгойского ЗПКТ, ООО «Газпром переработка»

www.ingc.ru

ГПА-16 МВт «Иртыш», 6 шт.
ДКС Южно-Русского НГКМ, ОАО «Севернефтегазпром»

ГТЭА-6 МВт, 2 шт.
Ичёдинское м-е, ООО «ИНК»

РЕКЛАМА



Главный редактор

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

Редакционная коллегия:

Барсков Виктор Валентинович, д.т.н.,
доцент Высшей школы энергетического машиностроения
Института энергетике, ФГАОУ ВО СПбПУ

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

Буров Валерий Дмитриевич, к.т.н.,
профессор кафедры Тепловых электрических станций
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Бычков Олег Витальевич,
генеральный директор ООО «ИНГК»

Гарибов Генрих Саркисович, д.т.н.,
профессор, академик Российской инженерной академии

Грибин Владимир Георгиевич, д.т.н.,
профессор, заведующий кафедрой паровых и газовых турбин
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Дроздов Александр Александрович, д.т.н.,
доцент Высшей школы энергетического машиностроения
Института энергетике, ФГАОУ ВО СПбПУ

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.,
доцент, профессор кафедры «Турбины и двигатели»
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
им. Б. Н. Ельцина» (УрФУ)

Рогалев Андрей Николаевич, д.т.н.
доцент, заведующий кафедрой Инновационных технологий
наукоемких отраслей, Национальный исследовательский
университет «МЭИ»

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, к.т.н.,
генеральный директор
ООО «Высокотехнологические разработки»

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

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

Юн Владимир Климентьевич, д.т.н.,
генеральный конструктор АО «Невский завод»

Editor in Chief

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

Editorial board:

Barskov Victor Valentinovich,
Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Higher School
of Power Engineering, Institute of Power Engineering, SPbPU

Blinov Vitaly Leonidovich,
PhD in Engineering,
Associate Professor of Turbines and Engines Department
Ural Federal University named after B. N. Yeltsin (UrFU)

Burov Valery Dmitrievich, PhD in Engineering,
Professor, Thermal Electric Power Stations Department,
National Research University MPEI

Bychkov Oleg Vitalievich,
General Director, INGC LLC

Garibov Genrikh Sarkisovich, Doctor of Engineering Science
Professor, Academician of the Russian Engineering Academy

Gribin Vladimir Georgievich, Doctor of Engineering Science,
Professor, Head of Steam and Gas Turbines Department,
National Research University MPEI

Drozдов Alexander Alexandrovich,
Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Higher School
of Power Engineering, Institute of Power Engineering, SPbPU

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

Rogalev Andrey Nikolaevich, Doctor of Engineering Science,
Associate Professor, Head of Innovative Technologies of High-tech Industries
Department, National Research University MPEI

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, PhD in Engineering,
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 Work JSC

Yun Vladimir Klimentievich,
Doctor of Engineering Science, General Designer, Nevsky zavod JSC

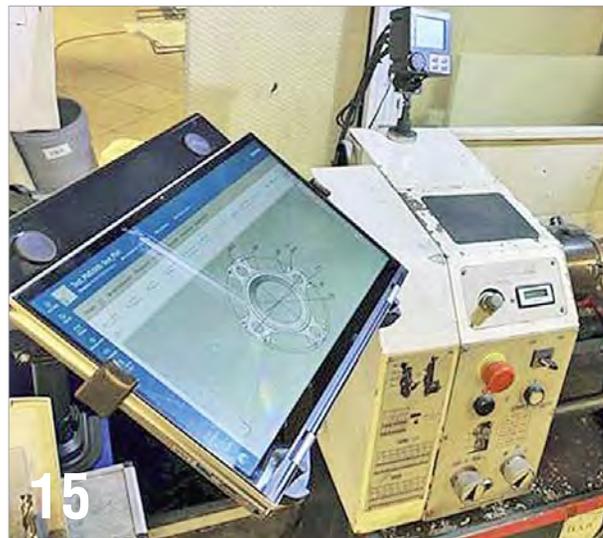
Содержание

июль-август 2023, № 4 (109)

80



Фото на обложке:
Филиал АО «Газэнергосервис» – завод «Турборемонт»



15

4 От редактора
Вперед в будущее!
А.Ю. Култышев, к.т.н. – журнал «Турбины и Дизели»

6 Новые разработки
**Применение современных подшипниковых опор
в конструкции центробежных компрессоров**
*И.Ю. Кляйнрок¹ (к. т. н.), Д.В. Кравцов² (к. т. н.), Р.О. Юдин¹ –
ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»¹, АО «Невский завод»²*

12 Новые разработки
**Система управления жизненным циклом изделия:
какая нужна сегодня?**
Н.О. Тюльпа – АО «ЛАНИТ»

16 Новые разработки
**Технический прогресс в разработке новых
подшипниковых материалов узлов трения**
*Н.Ю. Овчаренко, С.В. Ладенко – АО «НПК «Промышленные технологии»
М.Ю. Егорушков – ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»*

20 Новые разработки
**Основы методики проектирования турбодетандеров
для объектов ПАО «Газпром»**
В.К. Юн, (д.т.н.), М.М. Ленцман, А.В. Скороходов – АО «Невский завод»

26 Новые разработки
**Разработка отечественной мобильной компрессорной установки
с моторкомпрессором ICL Baker Hughes**
*О.В. Бычков, И.В. Травкина, С.В. Кудрявцев, И.А. Странкалс, В.Е. Щавлев (к.т.н.) –
ООО «ИНГК-Промтех»*

32 Эксплуатация, сервис
**Опыт эксплуатации газоперекачивающих агрегатов
ГПА-32 «Ладога»**
*Ю.В. Зуева, И.Ю. Кляйнрок (к. т. н.), А.Ю. Култышев (к. т. н.) –
ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»*

38 Эксплуатация, сервис
**Выбор отечественного жаропрочного сплава
для камеры сгорания газовой турбины Т32**
*В.В. Клепалов¹, М.Ю. Егорушков¹, Ф.М. Андреев², В.М. Дручок² –
ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»¹, АО «Невский завод»²*



16



26



48

- 44** Эксплуатация, сервис
Турбинные масла Taif Rave: успешная эксплуатация в зарубежных ГТУ
И.А. Степанков – ООО «С-Техник»
- 46** Эксплуатация, сервис
Производственные возможности АО «Газэнергосервис» по ремонту и изготовлению составных частей ГТД и ГПА
*Р.В. Алдохин – ООО «Газпром энергохолдинг промышленные активы»
П.Е. Дрягин – АО «Газэнергосервис»*
- 54** Эксплуатация, сервис
Мониторинг ГТУ как инструмент обеспечения надежности эксплуатации. В АО «ОДК-Авиадвигатель» завершен проект управления эксплуатацией газотурбинных установок
А.В. Лядов – ГК «ЛАНИТ»
- 58** Двигатели внутреннего сгорания
Исследование рабочего процесса газодизельного двигателя, работающего на аммиаке
*О.В. Абызов (к.т.н.), Ю.В. Галышев (д.т.н.), А.А. Метелев –
Высшая школа энергетического машиностроения,
Институт энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ*
- 64** Двигатели внутреннего сгорания
Влияние конфигурации впускной системы на мощность дизельного двигателя размерности 7,5/6,0
*Л.В. Плотников (д.т.н.), В.А. Шурупов, Д.А. Давыдов, В.А. Следнев, Д.Н. Красильников,
А.Д. Лаптев – «Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»*
- 70** Двигатели внутреннего сгорания
Многофункциональные присадки к дизельному топливу: механизм действия, эффективность, проблемы
*А.Ю. Шабанов (к.т.н.), А.С. Алешина (к.т.н.), А.А. Сидоров (к.т.н.), А.Б. Зайцев (к.т.н.),
О.В. Абызов (к.т.н.) – Высшая школа энергетического машиностроения,
Институт энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ*
- 78** Двигатели внутреннего сгорания
Независимое программное обеспечение для газопоршневых электростанций
Д.С. Колесов – ООО «НПО ТЕХ»
- 80** Представление компании
АО «Газэнергосервис» – главная ремонтная база страны
*Р.В. Алдохин, К.В. Симутин – ООО «Газпром энергохолдинг промышленные активы»
П.Е. Дрягин – АО «Газэнергосервис»*
- 84** Паротурбинные установки
Модульные подходы и алгоритмы при создании паровых турбин
А.Ю. Култышев, к.т.н. – ООО «Газпром энергохолдинг промышленные активы»

Издатель ООО «Турбомашинь»

Главный редактор
Култышев А.Ю., к.т.н.

Литературный редактор
Зинченко Г.М., к.ф.н.

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
промышленные 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

Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов публикации.

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов.

Дата выхода номера в свет 31.08.2023 г.

Электронные версии журнала (2018-2023 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) и включены в Российский индекс научного цитирования.



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»



Вперед в будущее!

А. Ю. Култышев, к. т. н. — главный редактор

In brief

Forward to the future!

Dear readers!

We are pleased to present you a new stage in the development of our professional magazine. We have already noted earlier that today our country, like the whole world, lives and works in a new reality.

It is necessary to transform the magazine in covering the development of scientific and technical potential of Russia, presenting new developments in power engineering, allowing us to achieve technological sovereignty of our Russia. We plan to create an open professional platform for communication between scientific, educational, production organizations and communities in the field of power engineering, transport and aircraft engine building, energy, oil and gas industry. The platform should form a scientific and engineering debate and expand the audience by attracting specialists from related industries, owners of high-tech technologies: computer-aided design and production, modern materials, additive technologies, robotics, artificial intelligence and machine learning, the Internet of things, etc.



Дорогие читатели!

Мы рады представить вам новый этап в развитии нашего профессионального журнала.

Ранее мы уже отмечали, что сегодня наша страна, как и весь мир, живет и работает в новой реальности. Необходима трансформация журнала в освещении развития научно-технического потенциала России, представлении новых разработок в энергетическом машиностроении, позволяющих добиться технологического суверенитета нашей страны.

Для развития журнала в новых условиях мы планируем создать открытую профессиональную площадку для коммуникации между научными, учебно-образовательными, производственными организациями и сообществами в области энергомашиностроения, транспортного и авиационного двигателестроения, энергетики, нефтегаза.

Площадка должна сформировать научную и инженерную полемику и расширить аудиторию, в том числе за счет привлечения специалистов из смежных отраслей, обладателей наукоемких технологий: автоматизированное проектирование и производство, современные материалы, аддитивные технологии, робототехника, искусственный интеллект и машинное обучение, интернет вещей и др.

С этой целью мы будем осваивать цифровое пространство и готовы пригласить вас к сотрудничеству.

Сегодня мы объявляем о создании нашего официального канала в Telegram. Такое решение позволит нам быть ближе к вам, читателям журнала, предоставляя возможность получать актуальную информацию по профессиональной тематике со всего мира непосредственно на вашем смартфоне или планшете. Мы будем знакомить вас с новостями, интересными статьями, аналитическими материалами, предлагать видеointервью с ведущими специалистами профильных и смежных отраслей.

Мы всегда стремились быть на переднем крае технологических инноваций, и цифровые технологии являются важным шагом для развития нашего журнала. Но освоение нового цифрового ресурса вовсе не означает, что мы отказываемся от бумажного формата. Более того, понимая, что у каждого из вас есть свои предпочтения, мы будем продолжать издавать и печатную версию журнала, чтобы вы всегда могли иметь бумажный экземпляр.

В печатной версии также появятся зарисовки и резюме из цифрового пространства, и от бумажного экземпляра вы без труда сможете переходить в «цифру» и получать быстрый доступ к свежим визуальным материалам.

Создавая в Telegram свой канал, мы стремимся предоставить вам больше гибкости и удобства в освоении информации. Отдельные статьи будут переработаны в более удобный и легко усваиваемый цифровой формат. Кроме того, будут создаваться видеоматериалы, чтобы визуализировать профессиональные темы, делая их более доступными и интересными.

Наша цель в том, чтобы журнал стал не только источником информации, но и местом, где вы можете общаться с нами и с другими читателями. В Telegram-канале вы сможете задавать вопросы, делиться своим мнением, обсуждать актуальные темы и получать ответы от специалистов, таким образом, будет обеспечено интерактивное получение информации.

Мы благодарим вас, наших верных читателей, за поддержку и интерес к нашей работе. Следите за обновлениями, присоединяйтесь к нашему Telegram-каналу и будьте в курсе самых свежих событий и материалов! 



В ПАО «Силловые машины» внедрили технологию нанесения термобарьерного покрытия турбинных лопаток.

На предприятии ввели в опытно-промышленную эксплуатацию участок газотермического напыления покрытий на рабочие и направляющие лопатки газовых турбин. Новый производственный участок укомплектован установками высокоскоростного напыления и вакуумными печами. Нанесение покрытий выполняется в несколько слоев – это защищает детали от эрозийного износа и высокотемпературной коррозии, позволяет обеспечить требуемый ресурс эксплуатации.

Компания «Силловые машины» создает мощности для выпуска 8 газовых турбин в год, на эти объемы она намерена выйти с 2025 года. Также предприятие обеспечит обслуживание ГТУ, в том числе и стороннего производства, включая изготовление и поставку запасных частей. В изготовлении газовых турбин задействованы три производственные площадки Ленинградского металлургического завода.

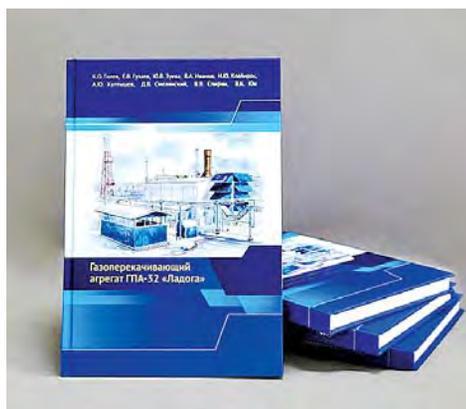
Продолжается оснащение оборудованием, необходимым для организации полного производственного цикла турбин. Создается производственная база для изготовления отливок лопаток ГТУ. Проводимая предприятием работа по модернизации обеспечит полный цикл изготовления газотурбинных двигателей.

Doosan Enerbility построит электростанцию комбинированного цикла в Казахстане.

Контракт на строительство Туркестанской ПГУ заключен с ТОО «Туркестан» – дочерней компанией казахстанского фонда национального благосостояния «Самрук-Казына». Тендер на строительство электростанции Doosan Enerbility выиграла в консорциуме со строительной компанией Bazis (Казахстан).

Электростанция мощностью 1000 МВт будет построена в г. Шымкенте, крупном промышленном центре на юге Казахстана. В состав ПГУ войдут две газотурбинные установки DGT6-300H S2 мощностью по 380 МВт и паровая турбина DST-S30. В рамках контракта под ключ Doosan Enerbility выполнит проектирование, поставку оборудования, строительно-монтажные и пусконаладочные работы. Ввод станции в коммерческую эксплуатацию запланирован на 2026 год.

Ранее, в 2020 г. Doosan Enerbility построила Карабатанскую ПГУ мощностью 310 МВт.



Газоперекачивающий агрегат ГПА-32 «Ладоба»

Авторы:

К.О. Гилев
 Е.В. Гузаев
 Ю.В. Зуева
 В.А. Иванов
 И.Ю. Кляйнрок
 А.Ю. Култышев
 Д.В. Смелянский
 В.В. Спирин
 В.К. Юн

В Санкт-Петербурге вышла в свет коллективная монография «Газоперекачивающий агрегат ГПА-32 «Ладоба», посвященная истории создания, освоения производства и эксплуатации самого мощного отечественного газоперекачивающего агрегата. Книга подготовлена группой авторов – сотрудников АО «Невский завод» и ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы» под общей редакцией директора Института энергетики ФГАОУ ВО СПбПУ, д.ф.-м.н., профессора, члена-корреспондента РАН – Ю.К. Петрени.

В книге дано описание конструкции современного газоперекачивающего агрегата, включая информацию по всем основным элементам установки, а также по выявленным в процессе эксплуатации отклонениям и техническим решениям по их устранению, организации ремонтных работ. Описан опыт освоения производства газотурбинной установки в АО «Невский завод».

Газоперекачивающий агрегат «Ладоба» отличает высокий для российских агрегатов промышленного типа КПД, низкий уровень выбросов и значительный ресурс работы. Для реализации проекта по производству ГПА была проведена полная реконструкция производственных мощностей АО «Невский завод», осуществлено переоснащение всех технологических процессов новейшим современным оборудованием, подготовлены и обучены специалисты, построен уникальный испытательный стенд.

Благодаря проведенной модернизации и грамотной программе трансфера западных технологий, в настоящее время АО «Невский завод» является безусловным национальным лидером в сегменте промышленных газовых турбин и единственным в России производителем стационарных турбин мощностью 32 МВт. ГПА-32 «Ладоба» с приводом Т32 уже доказали на деле свою надежность и эффективность.

Рецензентами издания выступили д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Паровые и газовые турбины» ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», В.Г. Грибин и генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» В.Г. Никитин.

Печатное издание вышло тиражом 500 экземпляров. Книга содержит большое количество иллюстраций, в ней обобщен многолетний опыт освоения производства и эксплуатации агрегата ГПА-32 «Ладоба», собраны статистические и аналитические материалы, имеющие большое научно-практическое значение для развития технологии изготовления сложного энергетического оборудования.

Монография может быть рекомендована студентам и аспирантам, слушателям курсов повышения квалификации и эксплуатирующему персоналу для изучения конструкции и особенностей эксплуатации современной газотурбинной и компрессорной техники.

По вопросам получения подарочного экземпляра или приобретения дополнительного комплекта монографий можно обращаться по адресу электронной почты: kniga_ladoga@gehia.ru

Применение современных подшипниковых опор в конструкции центробежных компрессоров

И. Ю. Кляйнрок¹, к.т.н. – начальник управления по развитию производства, i.kleinrock@gehia.ru

Д. В. Кравцов², к.т.н. – начальник управления систем магнитного подвеса, d.kravtsov@reph.ru

Р. О. Юдин¹ – специалист отдела развития конструкторской подготовки производства, ro.yudin@gehia.ru

**ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»¹
АО «Невский завод»²**

Ключевые слова:

центробежный компрессор, подшипник скольжения, полимерные материалы, система магнитного подвеса, антифрикционные материалы

Аннотация

Рассмотрены основные типы подшипниковых опор, применяемых в конструкции центробежных компрессоров (ЦБК) производства АО «Невский завод». В типовых конструкциях преимущественно применяются подшипники с покрытием вкладыша баббитом. В связи с технологическим развитием в энергомашиностроении в настоящее время на замену ему пришли покрытия из полимерных материалов, позволяющие без конструктивных изменений опор повысить эффективность и ресурс подшипника, активные электромагнитные подшипники.

Помимо подшипников скольжения, в качестве опор Невский завод применяет также систему магнитных подвесов (СМП) собственного производства. Данная система удерживает ротор машины в центральном положении относительно статора за счет электромагнитных сил. В статье проанализированы основные преимущества и недостатки различных типов подшипниковых опор. Выполнена оценка целесообразности применения подшипниковых опор разных типов в конструкции ЦБК газоперекачивающих агрегатов.

Usage of the modern bearing supports in the design of centrifugal compressors

I.Y. Kleinrock¹, Ph.D. in Engineering Science – Head of the Production Development Department, i.kleinrock@gehia.ru

D.V. Kravtsov², Ph.D. in Engineering Science – Head of the Magnetic Bearing Systems Department, d.kravtsov@reph.ru

**R.O. Yudin¹ – Specialist of Design Preproduction Development Department, ro.yudin@gehia.ru
Gazprom energo holding industrial assets LLC¹
Nevsky zavod JSC²**

Key words:

centrifugal compressor, journal bearing, polymer materials, magnetic bearing system, anti-friction materials

Abstract

The article describes the main types of bearing supports used in the design of centrifugal compressors manufactured by Nevsky zavod JSC. Babbit coated bearing liners are usually implemented in typical centrifugal compressor design. Due to technological development in power engineering they are currently ready to be replaced with polymeric material coatings, which allow to increase the efficiency and service life of the bearing without any changes in its design.

Along with the journal bearings in a production of centrifugal compressors, Nevsky zavod uses a magnetic bearing system (MBS) of own production. This system holds a rotor in a central position relative to stator due to electromagnetic forces. Main advantages and disadvantages of different types of bearing supports are analyzed in the article. An expediency of using bearing supports of different types in the design of gas pumping units is assessed.

К подшипниковым опорам центробежных компрессоров предъявляются высокие требования в части надежности и долговечности их работы, малых потерь на трение, точности установки при монтаже и ремонтпригодности. Повреждение подшипников может привести к серьезной аварии, а неточность их установки – к ухудшению вибрационного состояния ЦБК.

В типовой конструкции ЦБК, как правило, предусматриваются подшипники скольжения с антифрикционным покрытием – баббитовой заливкой. В таких подшипниках между вкладышем и шейкой вала компрессора подается масло, которое при вращении ротора с большой частотой образует масляный клин, имеющий большую гидродинамическую подъемную силу, за счет которой вал всплывает в смазочном материале. Пример конструкции опорного подшипника с баббитовой заливкой представлен на *рис. 1, 2* [1].

Баббит, используемый в ЦБК представляет собой сплав на основе олова, обладающий высокими антифрикционными свойствами, имеет хорошую прирабатываемость к детали и низкий показатель линейного расширения. Преимуществом применения баббитовых вкладышей является относительно доступная технология ремонта заливки при небольших повреждениях (задирах, сколах и царапинах), а также возможность перезаливки вкладыша, доступная на многих ремонтно-сервисных и эксплуатирующих предприятиях.

В то же время данная технология имеет ряд следующих недостатков:

- выкрашивание покрытия;
- работа при невысоких температурах (до 80 °С);
- повышенные требования к расходу масла на смазку для обеспечения теплоотвода и чувствительность к типу смазки;
- повреждение от попадания инородных частиц;
- низкое сопротивление вибрации;
- коррозия от продуктов окисления масла в процессе эксплуатации и разложения определенных масляных присадок, а также при попадании в смазочное масло воды или охлаждающей жидкости;
- электроэрозия от накопленного на валу электрического заряда.

С развитием композитных технологий в качестве замены традиционному баббитовому покрытию используются подшипники с полимерным покрытием вкладыша. Полимерные покрытия не уступают по механическим свойствам стали, латуни и другим материалам и сочетают в себе высокую прочность при повышенных рабочих температурах [2].

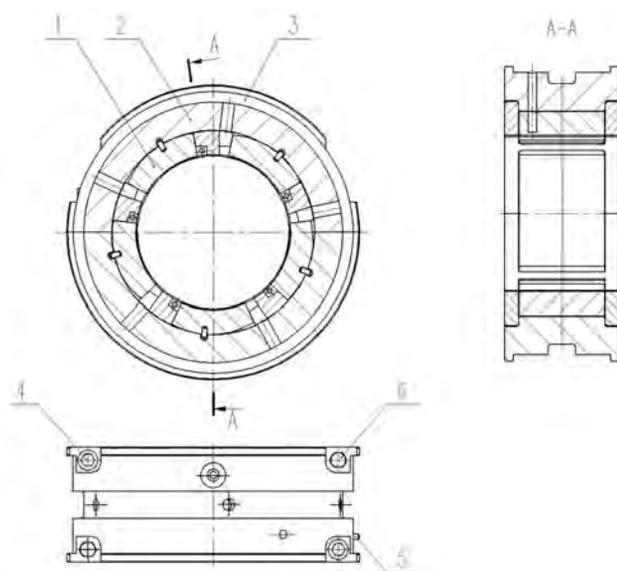


Рис. 1.

Подшипник скольжения опорный:

- 1 – колодка опорная;
- 2 – вкладыш;
- 3 – корпус вкладыша;
- 4 – винт;
- 5 – штифт;
- 6 – штифт установочный

Конструктивно подшипники скольжения с полимерным покрытием также представляют собой металлический разъемный корпус, состоящий из нижней и верхней половин, которые соединяются болтами или шпильками, и двух металлических вкладышей в качестве элементов скольжения. На эти вкладыши впоследствии и наносится антифрикционное полимерное покрытие толщиной 3 мм. На *рис. 3* представлена трехмерная модель вкладыша упорного подшипника, применяемого на компрессорах Невского завода, а на *рис. 4* – вкладыш опорного подшипника части высокого давления (ЧВД) ЦБК 320 с применением полимерного антифрикционного материала.

Полимерные материалы отличают следующие преимущества по сравнению с «традиционной» баббитовой заливкой:

- повышенная несущая способность и надежность для вращающегося оборудования, что позволяет уменьшить габариты подшипника или повысить нагрузку на него;
- повышенная прочность, позволяющая уменьшить толщину слоя покрытия;
- возможность работы при более высоких температурах (до 250 °С; выдерживает кратковременные повышения до 300 °С) и сниженный коэффициент трения способствуют сокращению расхода смазочного масла;

Рис. 2.

Опорные подшипники



Рис. 3. Модель вкладыша упорного подшипника



Рис. 3.

Рис. 4. Вкладыш опорного подшипника ЧВД типа ЦБК 320 с полимерным покрытием

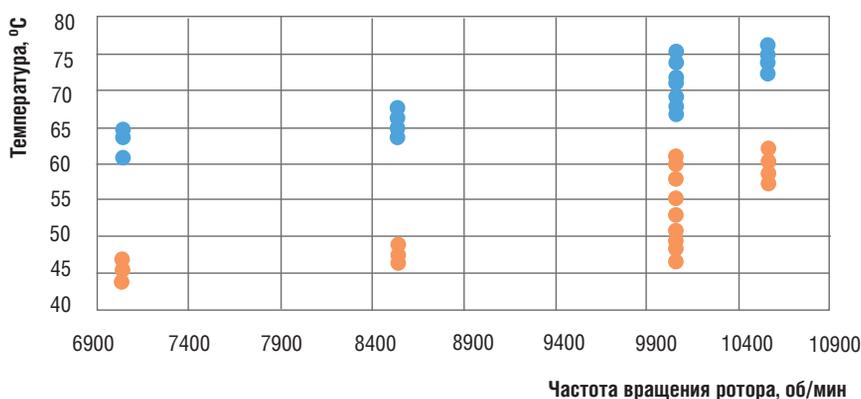


Рис. 4.

- возможность работы со смазкой низкой вязкости, с более тонким смазочным и несущим слоем уменьшает жидкостное трение и позволяет снизить потери мощности в подшипнике;
- способность поглощать инородные абразивные частицы, попадающие в подшипник через смазку, из внешних источников или в результате износа других компонентов во время эксплуатации, без изменения коэффициента трения;
- демпфирование, характерное для полимерного материала, позволяет снизить вибрацию ротора ЦБК;
- пониженный крутящий момент при пусках и остановках устраняет необходимость в системах гидростатического подъема;
- устойчивость к химическому воздействию рабочей жидкости и, как следствие, возможность применения различных синтетических смазок и работы в условиях агрессивных сред;
- отсутствие риска возникновения электроэрозии.

Основным недостатком полимерных подшипников, в отличие от подшипников с баббитовой заливкой, является невозможность их замены и ремонта в условиях эксплуатирующей организации. В случае выхода из строя

Рис. 5. Результаты измерений температуры вкладышей с баббитовой и полимерной заливкой



● Температура колодок – баббит, °C ● Температура колодок – полимер, °C

полимерного покрытия необходимо выполнить его повторное напыление в условиях специализированной организации или завода-изготовителя.

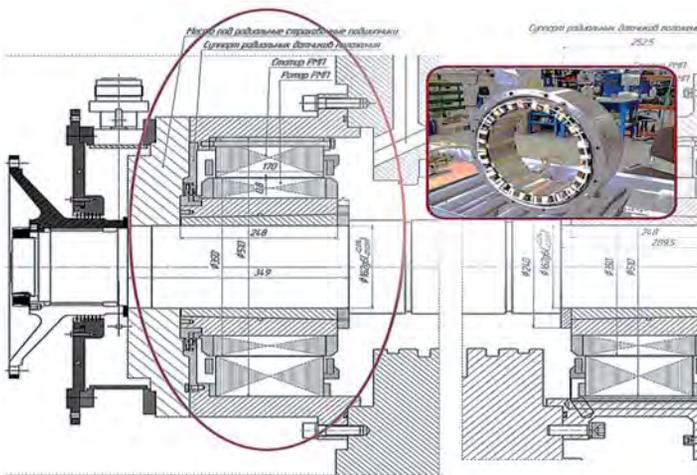
На рис. 5 представлены результаты сравнительных испытаний подшипниковых опор с баббитовым антифрикционным покрытием и покрытием из полимера в составе центробежного компрессора попутного нефтяного газа ЦБК 320 на стенде Невского завода. Испытания проводились на рабочей частоте вращения компрессора 10056 об/мин при температуре масла на входе в подшипник 35, 40, 45, 50 °C и давлении на входе в подшипник 0,20; 0,15; 0,11 и 0,09 МПа соответственно. Для всех значений проводились измерения расхода масла через подшипник, температуры рабочих колодок, температуры масла на сливе подшипника, относительного виброперемещения ротора и виброскорости подшипниковых опор и др.

Результаты испытаний подтвердили возможность применения полимерных технологий в подшипниковых опорах ЦБК. Так, во всех отслеживаемых диапазонах работы значения температуры вкладыша из полимерного покрытия оказались ниже, чем у вкладыша с баббитовой заливкой, при сопоставимом уровне вибрации ротора и опор.

В настоящее время Невский завод выполнил внедрение подшипников с полимерным покрытием на следующих центробежных агрегатах:

- ЦБК220-8,42/183-5300/18С на ДКС Ярудейского НГКМ – упорные колодки;
- ЦБК165-4,2/106-7100/6,0С на ДКС Стерхового месторождения – опорный и упорный подшипники на ЦВД;
- ЦБК320-14,1/101-5300/16С на Чайандинском НГКМ – опорный и упорный подшипники на ЦНД и ЦВД;
- ЦБК75-3,2/30-3000/2С-Э на Адлерской ТЭС – опорный и упорный подшипники.

По результатам анализа работы системы смазки подшипников, их температурного состояния



и вибросостояния опор отклонений не выявлено. На всех режимах испытаний подшипники показали надежную, устойчивую работу компрессора. Все контролируемые параметры, характеризующие работу опор компрессора, находились в пределах допустимых норм.

Кроме подшипников скольжения, в конструкции центробежных компрессоров в качестве подшипников опор Невский завод применяет СМП собственного производства.

Система магнитного подвеса представляет собой управляемые электромагнитные устройства, в которых для стабилизации ротора в пространстве используются силы притяжения ферромагнитных элементов ротора магнитных подшипников к электромагнитам статора. По сигналам регулятора, которые вырабатываются по сигналам от датчиков положения ротора, токи в электромагнитах, расположенных по осям регулирования, изменяются таким образом, чтобы отклонение ротора от заданного центрального положения в пространстве было равно нулю.

Для обеспечения безопасности при полной потере питания или повреждении элементов системы магнитного подвеса обычно предусматриваются страховочные подшипники, гарантирующие защиту роторной системы от разрушений [3].

Система вырабатывает и передает на САУ ГПА группу аналоговых, цифровых и дискретных (аварийных и предупредительных) сигналов.

В комплект поставки СМП производства Невского завода входят узлы осевых и радиальных магнитных подшипников (рис. 6), а также система управления ими (рис. 7), обеспечивающая функции контроля и управления положением ротора ЦБК. Важнейшим компонентом СМП также являются страховочные подшипники, которые выступают в качестве резервных опор на случай выхода из строя средств автоматики.

Принципиальная схема состава узлов комплекта магнитных подшипников представлена на рис. 8.

Комплект магнитных подшипников, включая датчики положения ротора, размещаемые в корпусе ЦБК, устойчивы к воздействию температуры окружающей среды от минус 40 до 70 °С и к воздействию влажности до 95 % при температуре 35 °С и ниже, без конденсации влаги. Система управления устойчива к воздействию температуры окружающей среды от плюс 5 до 45 °С и к воздействию влажности до 80 % при температуре 35 °С и ниже, без конденсации влаги.

При изготовлении СМП применяются только отечественные материалы, а типоразмеры магнитов покрывают основной модельный ряд энергетического и нефтегазового оборудования: для применения в турбодетандерах – 70, 110, 150, 200 мм, для применения в ЦБК – 188,8; 298,6; 350; 400; 510 мм.

Система магнитного подвеса имеет следующие преимущества перед конструкцией с подшипниками скольжения:

- отсутствие линий маслопроводов и вспомогательного оборудования очистки масла;
- отсутствие трения поверхностей, что приводит к снижению потерь на трение в 100–200 раз по сравнению с гидродинамическими подшипниками и повышает эффективность машины;

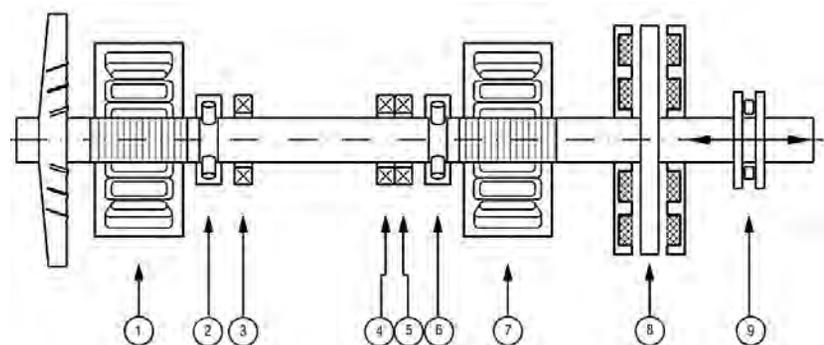


Рис. 6. Конструкция радиального магнитного подшипника

Рис. 7. Система автоматического управления электромагнитным подвесом

Рис. 8. Схема состава узлов комплекта магнитных подшипников: 1, 7 – радиальные магнитные подшипники; 8 – осевой магнитный подшипник; 2, 6 – радиальные датчики положения ротора; 9 – осевой датчик положения ротора; 3, 4, 5 – страховочные подшипники

- повышенная виброненадежность;
- возможность демпфировать колебания при прохождении ротора через критические резонансные частоты;
- отсутствие необходимости технического обслуживания маслосистемы и замены изношенных частей, что дает большой экономический эффект при использовании на агрегатах газотранспортной системы в труднодоступных для проведения обслуживания районах.

Одним из основных недостатков СМП являются сравнительно большие размеры подшипника в связи с необходимостью обеспечить большую площадь несущей поверхности для поддержания достаточной магнитной силы. Для СМП необходимо применение вспомогательных страховочных подшипников качения, которые выдерживают не менее 10 выбегов, после чего требуется их замена. При высоких и сверхвысоких нагрузках на ротор возрастают токи в обмотках магнитного подшипника, что, в свою очередь, может потребовать дополнительного охлаждения.

К особенностям СМП можно отнести необходимость внешнего источника электроэнергии, относительную сложность электронного блока.

Целесообразность применения подшипниковых опор с полимерным покрытием или СМП в конструкции ЦБК необходимо определять с учетом особенностей конструкции конкретного агрегата, условий его эксплуатации, а также пожеланий эксплуатирующей организации.

В зависимости от особенностей конструкции конкретного ЦБК, условий его эксплуатации, а также требований эксплуатирующего персонала Невским заводом могут применяться любые типы подшипниковых опор. Предлагаемая в общем случае схема применения подшипниковых опор в конструкции ЦБК дана в таблице.

Так, при поставке или реконструкции ЦБК, применяемых в агрегатах с газотурбинными приводами, в конструкции компрессора предлагается использовать в качестве основного варианта подшипники с полимерным покрытием, что позволяет применить (сохранить) единую систему маслоснабжения для всего газоперекачивающего агрегата.

Табл.
Схема применения
подшипниковых опор
в конструкции ЦБК

Тип оборудования	Подшипник с полимерным покрытием	Система магнитного подвеса
ЦБК с газотурбинным приводом 16...32 МВт	Х	Х
ЦБК с электроприводом		Х
Замена сменной проточной части ЦБК	Х	Х

Применение СМП для всего газоперекачивающего агрегата и отказ от традиционной системы маслоснабжения в настоящее время не представляется возможным. Трудность реализации данной технологии обусловлена более высокими рабочими температурами двух- и трехвальных газовых турбин и необходимостью в связи с этим разработки и испытаний жаростойких и стойких к агрессивным средам компаундов (полимерных смол), используемых при изготовлении обмотки магнитных подвесов.

В случае поставки газоперекачивающего агрегата с электроприводом весь агрегат, включая ЦБК, целесообразно комплектовать системой магнитного подвеса. В этом случае поставляется «сухой» агрегат, полностью исключается система маслоснабжения (насосы, фильтры, маслоохладители), ресурс агрегата увеличивается в два раза, эксплуатационные затраты снижаются на 10 %, а также повышается надежность и пожаробезопасность.

При реконструкции сменных проточных частей ЦБК в зависимости от агрегата, в котором он применяется, и условий эксплуатации можно использовать как подшипники скольжения с полимерным покрытием, так и систему магнитного подвеса.

Выводы

1. Невским заводом разработаны и апробированы на промышленных объектах подшипники скольжения с полимерным покрытием, а также система магнитного подвеса. По результатам эксплуатации нарекания к их работе отсутствуют.
2. Проанализированы основные достоинства и недостатки современных подшипниковых опор.
3. Предложена типовая схема выбора подшипниковых опор ЦБК в зависимости от типа газоперекачивающего агрегата. **□**

Список литературы

1. Юн В. К., Рейдер А. С., Скорик М. С. Центробежные компрессоры природного газа производства АО «РЭП Холдинг» для дожимных компрессорных станций ПАО «Газпром» // Газотурбинные технологии. – 2016. – №4(139). – С. 18–23.
2. Серкова Е. А., Хмельницкий В. В., Застрогина О. Б. Полимерные материалы для антифрикционных покрытий // Труды ВИАМ. – 2021. – № 5 (99). – С. 56–63.
3. Кочетов Д. А., Кравцова Е. В. Электромагнитные подшипники – возможности промышленного внедрения // Конверсия в машиностроении. – 1993. – № 2. – С. 22–28.

Мощность ГТЭС для предприятия «Арктик СПГ-2» будет увеличена.

Проект реализуется компанией «ОДК–Авиадвигатель» по контракту с ПАО «НОВАТЭК» и его дочерним предприятием – «Арктик СПГ-2». ГТЭС включает 6 энергоблоков, созданных на базе ГТУ-12ПГ-2. Разработчиком и изготовителем энергоблоков ЭГЭС-12СА является АО «ОДК–Авиадвигатель».

В составе электростанции применяются турбогенераторы ТС-12-2РУХЛЗ (Г) производства «Электротяжмаш-Привод». ГТЭС будет работать в составе локальной энергосистемы.

ГТУ размещаются в легкосборном здании – по две установки в двух машинных залах. В настоящее время 4 энергоблока введены в эксплуатацию и работают в базовом режиме. Ввод второй очереди станции в составе двух газотурбинных установок запланирован на 2024 год.

Ресурсной базой проекта «Арктик СПГ-2» является месторождение «Утреннее», расположенное на полуострове Гыдан в ЯНАО, примерно в 70 км от площадки «Ямал СПГ», на восточном берегу Обской губы. Месторождение было открыто в 1979 г.

Специалисты компании «ИНГК» посетили международную выставку CIPPE-2023 в Пекине.

В начале июня в Пекине прошла выставка нефтяного и нефтехимического оборудования и технологий, ставшая самым большим в мире ежегодным мероприятием для встреч производителей и поставщиков с потенциальными заказчиками.

В рамках выставки прошли деловые встречи специалистов ООО «ИНГК» с представителями производственных предприятий Китая. На встречах обсуждались варианты сотрудничества и партнерства по поставке крупных узлов технологического оборудования для применения в проектах «ИНГК» на территории РФ.

По результатам переговоров на третий квартал 2023 года запланированы поездки российских инженеров на производственные площадки китайских компаний с целью проведения аудита технологических возможностей и качества выпускаемой продукции.

Компания «ИНГК» представила на выставке производственно-технологические и конструкторские разработки в области современного компрессорного и энергетического оборудования, а также газоперекачивающих агрегатов.

22 августа исполнилось 70 лет Валерию Дмитриевичу Бурову – профессору, ведущему российскому специалисту в области создания электростанций комбинированного цикла на базе газовых турбин, члену редакционного совета нашего журнала с начала его основания.



В 1976 году В. Д. Буров окончил Московский энергетический институт (МЭИ) по специальности «тепловые электрические станции», и с тех пор трудовая деятельность Валерия Дмитриевича неразрывно связана с МЭИ, где он прошел путь от инженера до профессора, заведующего кафедрой ТЭС (2008–2014 гг.).

В 1987 г. Буров стоял у истоков создания дисциплины «газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций» для специальности «тепловые электрические станции» в МЭИ, которая стала обязательной при переходе на многоуровневую подготовку студентов. За время преподавательской деятельности под руководством В. Д. Булова более 170 студентов подготовили выпускные работы – бакалавры, магистры. Он соавтор более 30 учебных и методических пособий, справочников и учебников. Учебно-научные пособия (в соавторстве) «Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций» с 2002 г. и «Газотурбинные энергетические установки» с 2011 г. выдержали по 4 издания общим тиражом более 10 тыс. экземпляров – они были первыми в России пособиями по современным ГТУ и ПГУ с учетом российского и зарубежного опыта.

Нельзя не отметить активное участие Валерия Дмитриевича в выполнении хозяйственных и госбюджетных работ. В 1993 г. он создал первую в российских вузах хозяйственную НИЛ «Газотурбинные и парогазовые ТЭС» и руководил ею до 2016 г. В коллективе НИЛ было подготовлено более 20 кандидатов технических наук. В. Д. Буров – автор более 350 печатных трудов, под его руководством выполнено свыше 120 госбюджетных и хозяйственных работ, в том числе для таких компаний, как «Мосэнерго», ОГК-2, ОГК-1,-3,-5, ТГК-3,-4,-6, «Смоленскэнерго», АBB, Siemens, Alstom, General Electric и многих других. Результаты этих работ внедрены на ТЭС России, а также в проектных и инженеринговых организациях. Буров В. Д. регулярно приглашается в качестве эксперта в Главгосэкспертизу России, ПАО «Мосэнерго» и другие организации по проектам ТЭС.

Валерий Дмитриевич и в настоящее время активно участвует в реализации различных энергетических проектов, оказывая консультационные услуги. Он более 20 лет член комиссии РАН по газовым турбинам, член НТС ПАО «Интер РАО» и НТС «ЕЭС России», член экспертного совета Минпромторга РФ, член секции по проблемам надежности и безопасности больших систем в энергетике Научного совета РАН, первый заместитель главного редактора журнала «Новое в российской электроэнергетике».

Трудовая деятельность В. Д. Булова неоднократно отмечалась государственными и ведомственными наградами: он лауреат Премии Правительства РФ, Заслуженный работник ЕЭС России, Почетный энергетик РФ, награжден Почетным серебряным знаком МЭИ.

Коллектив журнала желает Валерию Дмитриевичу крепкого здоровья, дальнейших творческих успехов и плодотворной работы!

Система управления жизненным циклом изделия: какая нужна сегодня?

Н. О. Тюльпа – АО «ЛАНИТ»

Какова взаимосвязь современных цифровых подходов конструкторско-технологической подготовки производства и системы управления жизненным циклом изделия PLM? Что предпочтительнее – традиционные чертежи или подлинник электронного макета изделия? Издержки или выгода? Эти вопросы являются основной темой данной статьи.

In brief

What kind of product lifecycle management system is necessary today?

What is the relationship between modern digital approaches of design and technological preparation of production and the product PLM lifecycle management system? Which is preferable – traditional drawings or an original electronic product layout, costs or benefits? These questions are the main topic of this article.

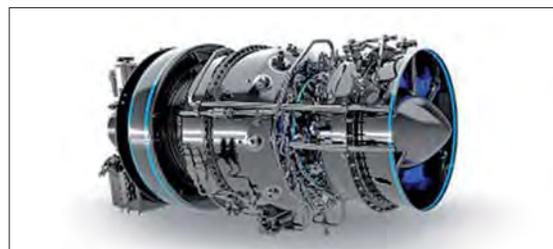
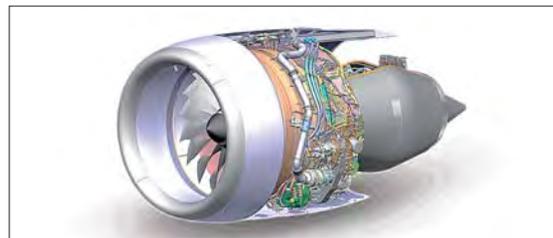
Today, the IT market is witnessing the departure of foreign software suppliers and the consequence of this is an increase in the import dependence of industry solutions. Enterprises face a difficult task, which control systems of design and technological preparation of production to switch to. A huge number of forums are organized where the possibility of developing their own «heavy systems» is discussed, etc.

Сегодня на рынке ИТ наблюдается уход зарубежных поставщиков программного обеспечения, и следствием этого является усиление импортонезависимости отраслевых решений. Перед предприятиями стоит нелегкая задача: на какие системы управления конструкторско-технологической подготовкой производства переходить. Организуется огромное количество форумов, на которых обсуждается возможность разработки собственных «тяжелых систем» и т.д. Выбор и внедрение системы управления жизненным циклом изделия, как правило, поручают службе информационных технологий и рассматривают этот процесс как сравнение программного обеспечения, существующего на рынке. Составляются опросные листы и критерии сравнения: на каких операционных системах работает, сколько нужно оперативной памяти, где больше различных функций, заявленных разработчиками. Но попытаемся разобраться в вопросе глубже, а именно, с какой целью проводятся работы по внедрению PLM.

Если цель в самом процессе приобретения и настройке некой системы, то результат и вложенные ресурсы не важны. Результат всегда

лежит вне сферы самой активности; так, основная задача системы PLM не просто существовать и являться складом файлов формата pdf, а обеспечивать протекание процессов КТПП в цифровом виде. Можно пойти по очевидному пути, пытаться автоматизировать существующие сложившиеся процессы на предприятии. Как показывает практика, просто закупка и настройка системы приносят только затраты предприятию, а пользователи, не получающие эффекта, всячески сопротивляются дополнительной нагрузке.

Система PLM выполняет сервисную функцию для КТПП – исходя из этого на первый план выходит комплексное изменение подходов и методов, применяемых при КТПП, так как именно здесь заложен потенциал роста и получения выгоды для предприятия: сокращение трудозатрат при разработке изделия и его дальнейших модификациях, сокращение ошибок и времени проведения изменений и т.д. Так, цикл выхода на рынок нового изделия можно сократить практически на 30 %, что подтверждено фактами успешно реализованных проектов. Этот путь уже прошли многие российские предприятия – отраслевые и технологические лидеры, на практике доказавшие



Примеры реализованных проектов системы управления жизненным циклом изделия на различных предприятиях



Цифровая трансформация процессов проектирования, конструкторско-технологической подготовки производства, планирования и отслеживания производства для перехода предприятия на качественно новый уровень.



С Модель цифрового предприятия

эффективность цифровизации процессов КТПП. К ним относятся: «Силовые машины», «ОДК–Авиадвигатель», «ОДК–Пермские моторы», Московский вертолетный завод имени М. Л. Милая, «ОДК–Климов».

Автоматизация оформления документации КТПП

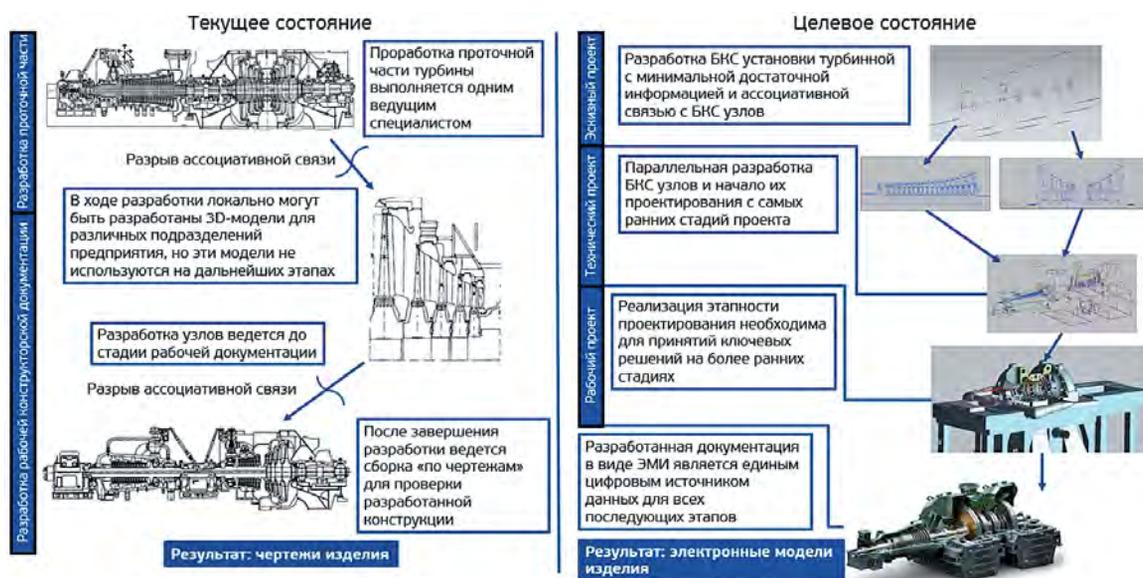
С появлением вычислительной техники, а в дальнейшем и персональных компьютеров, многие процессы и подходы КТПП были автоматизированы с помощью специального программного обеспечения. Но суть при этом принципиально не изменилась: вычислительная техника использовалась как «электронный кульман», который снимал рутинные операции ручного построения видов и разрезов на чертежах, помогал в ручном составлении спецификаций и прочих документов. Юридически значимыми документами оставались бумажные подлинники.

Эволюция подходов к КТПП

Традиционный подход

Первоначально процессы концептуального проектирования, все стадии конструкторско-технологической подготовки производства и т.д. имели единственную на то время возможность выражения идей – оформление и выпуск документации на бумажном носителе. Технологии, применяемые в промышленности, также диктовали существенные ограничения для предоставления информации в производство. Юридически значимыми подлинниками были бумажные документы, которые применялись для обмена информацией между участниками процессов.

С появлением станков с ЧПУ возникла необходимость в 3D-моделях, как основном источнике геометрической информации для разработки управляющих программ. Это стимулировало повсеместное развитие САД-программ, направленных на построение 3D-геометрии, что позволило разрабатывать



С Сравнение традиционного и нового подхода к проектированию изделий на примере турбинной установки

➤ Примеры ассоциативно спроектированных промежуточных состояний, объектов оснащения и разработанных программ для станков с ЧПУ



всё более сложные изделия, сокращая время на создание проекционных видов и разрезов 3D-геометрии автоматизированным способом, искать ошибки по пересечению тел после моделирования и т.д.

Но в дальнейшем создание сдаваемой документации сводилось к оформлению чертежей по традиционной технологии и выводу документации на бумагу. Подлинником оставался чертеж, что приводило к «двойному» разрыву информации: 3D-геометрия – чертеж в электронном виде – бумажный чертеж, так как на каждом шаге информация могла быть изменена и изменялась без обновления источника.

Цифровизация процессов КТПП

На данном этапе характерна трансформация процессов КТПП, она направлена на получение электронного макета изделия, определяющего необходимый облик и полностью соответствующего будущему физическому образцу, с возможностью влияния на его параметры с целью симуляции и оптимизации конструкции в целом на всех жизненных стадиях. Помимо осознанной оптимизации технических характеристик под целевые показатели, например *КПД*, возможно применение принципиально новых технологий, например аддитивных, которые направлены на получение новых потребительских качеств изделий, а также стоимостных характеристик. При применении упомянутых технологий конструкционные решения могут не ограничиваться формами, пригодными для отображения традиционными способами вывода информации на чертеж.

Для этого этапа характерны следующие технологии:

- подлинником является электронный макет изделия (бесчертежные технологии);
- сквозное нисходящее ассоциативное проектирование;

- системная инженерия и управление требованиями;
- развитие инженерных расчетов до стадии виртуальных испытаний;
- многокритериальная оптимизация конструкции;
- протекающие процессы в цифровом виде.

Подлинник электронного макета изделия (ЭМИ)

Развитие процессов проектирования заключается в освоении и применении новых подходов в части ассоциативного нисходящего проектирования в контексте всего изделия в целом. Выстраивание сквозного, неразрывного процесса проектирования изделия – начиная от замысла и заканчивая передачей документации на этап подготовки производства в среде системы управления жизненным циклом изделия. При этом на начальных этапах разработки изделия используются подходы системной инженерии и системного моделирования.

Результатом такого подхода является конструкторская и технологическая документация, выполненная в электронном виде, по бумажной технологии, которая может быть доведена до рабочего места в цехе.

Разработка концепции АО «Невский завод»

Цифровая трансформация меняет продукт, процессы компании, ее позиционирование – это отличает ее от «автоматизации», которая что-то улучшает, но сохраняет способ ведения дел.

Для определения вектора развития предприятия в 2022 году под руководством А. Ю. Култышева в сотрудничестве с департаментом цифровой трансформации машиностроения АО «ЛАНИТ» был осуществлен проект по разработке концепции «Постановка цифрового процесса жизненного цикла изделия в АО «РЭПХ». Целью концепции было

построение новой модели процессов проектирования, КТПП и управления жизненным циклом изделия и подтверждение работоспособности модели в ходе поэтапного реинжиниринга проектирования и КТПП выбранного заказчиком изделия, проведения его тестирования и передачи документации в производство.

В рамках данного проекта разработано техническое задание, содержащее требования к выполнению работ, их последовательность, охватываемые бизнес-процессы, участвующие подразделения, а также перечень результатов, необходимых для формирования концепции.

Вследствие анализа сквозных бизнес-процессов, помимо подразделений, непосредственно участвующих в блоках КТПП, в процесс были вовлечены смежные подразделения: отдел информационной безопасности, служба ИТ, проектный отдел и т.д. В общей сложности проект затронул порядка 40 структурных подразделений.

Обследование проводилось путем интервьюирования ключевых сотрудников, сбора информации с помощью опросных листов, анализа стандартов предприятий, а также непосредственно рабочей документации. По итогам обследования сформирован отчет, включающий анализ текущего состояния и перечень основных сложностей.

Далее разработана концепция с горизонтом планирования 10 лет, которая включала:

- SWOT-анализ, оценку существующего уровня цифровой зрелости процессов КТПП заказчика (as-is);
- описание основных проблем, позиционирование к отраслевым лидерам, вектор стратегического развития;
- описание целевой модели и применяемых подходов (to-be), дорожную карту перехода к целевой модели, анализ и сравнение трех сценариев перехода к целевой модели;
- описание рисков, предложения по оптимизации ПО, оценку экономического эффекта от перехода к целевой модели жизненного цикла изделия, а также проект технического задания на реализацию работ.

Инструментарий системы PLM

Таким образом, после определения стратегии развития предприятия на извлечение выгоды от трансформации подходов и применения новых методик становится очевидным вывод, что PLM должна содержать не формальные признаки «тяжелых систем», а обладать необходимым инструментарием для поддержки внедряемых новых подходов.

Этот перечень включает:

- инструменты управления ассоциативными связями для построения контекстного нисходящего ассоциативного проектирования;
- последовательность создания электронного макета изделия (ЭТ, ТП, РП) с сохранением ассоциативных связей между этапами разработки;
- оформление ЭМИ в качестве подлинника со всей необходимой информацией для изготовления с помощью 3D-аннотаций (технология PMI);
- объектно-ориентированный подход к автоматизированному проектированию моделей сварных соединений и покрытий;
- инструменты для работы со сложными поверхностями;
- функционал автоматизированного создания сложных типовых элементов конструкции;
- технологию синхронного моделирования для ассоциативного проектирования 3D-аннотированных технологических эскизов с функцией наследования PMI;
- функционал АРМ производственного персонала для перехода к работе с интерактивной конструкторско-технологической документацией в цехах.

Выводы

1. Основными при выборе системы PLM становятся функции, необходимые для реализации принятых методологий, которые закладываются в концепцию развития предприятия.

2. Выбор и внедрение системы PLM является подпроектом цифровизации процессов КТПП, главными владельцами которых являются конструкторы и технологи предприятия.

3. Данные работы должны нести выгоду предприятию и изменять процессы проектирования и подготовки производства. 

 АРМ производственного персонала



Технический прогресс в разработке новых подшипниковых материалов узлов трения

**Н. Ю. Овчаренко, С. В. Ладенко – АО «НПК «Промышленные технологии»
М. Ю. Егорушков – ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»**

Развивающееся партнерство АО «Невский завод» и НПК «Промышленные технологии», как производителя эффективных ЦБК, ГТУ и высокотехнологичных полимеров, направлено на усиление взаимодействия с целью повышения эффективности использования выпускаемой предприятиями продукции.

In brief

Technical progress in the development of new bearing materials of friction units.

It is surprising to realize that today, despite the active development of technological progress, some important areas of production or individual processes remain at the level of development more than 100 years ago, although existing competencies and experience in this area allow you to make a significant technological breakthrough without much effort. This applies, for example, to the technology of manufacturing and repairing plain bearings in rotary equipment.

The most common bearing material in this industry are the so-called babbits.

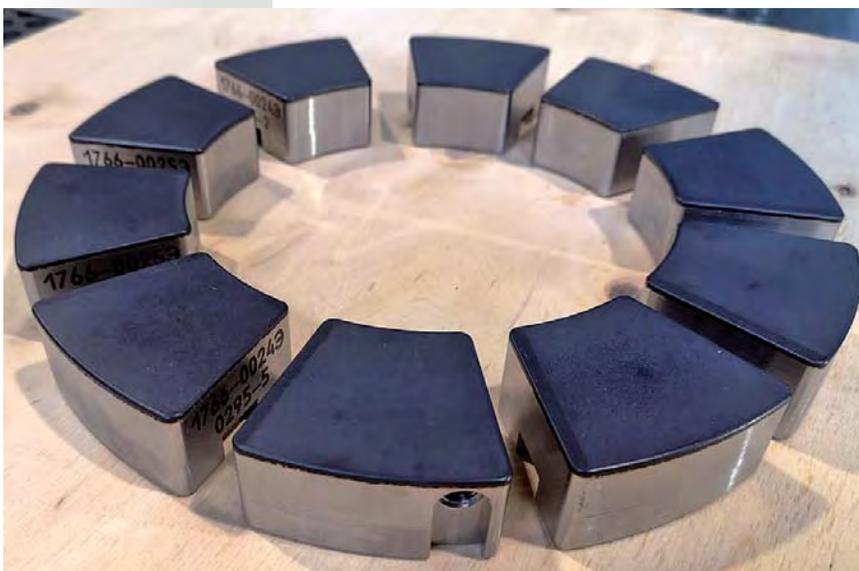
Как ни удивительно сознавать, но сегодня, несмотря на активное развитие технического прогресса, некоторые важные сферы производства или отдельные процессы остаются на уровне развития более чем 100-летней давности, хотя существующие компетенции и опыт в данной области позволяют сделать значительный технологический рывок без особых усилий. Это относится, например, к технологии изготовления и ремонта подшипников скольжения в роторном оборудовании. Наиболее распространенным подшипниковым материалом в данной отрасли являются так называемые баббиты (ГОСТ 1320-74).

Технология заливки подшипников баббитом широко известна и подробно описана. Первый подшипниковый сплав под этим названием разработан американцем Исааком Бэббитом в 1839 году, и с 1847 года до настоящего времени баббит разного химического состава применяется в промышленном производстве России.

Вместе с тем, использование баббита в качестве подшипникового материала имеет большое количество негативных факторов: низкие механические и трибологические параметры, сложность и опасность выполнения работ, высокая себестоимость изделия при расчете на жизненный цикл и др. (<https://nobabbit.ru/>). И данные факторы значительно «перевешивают» обычно приводимые доводы механиков-практиков о том, что с баббитом просто и удобно работать, ремонт обходится дешево и быстро, многие специалисты владеют этой технологией, материал несложно купить и т.д. Но постоянно повышающиеся требования к нагрузкам, производительности, надежности и эксплуатационному ресурсу роторного оборудования заставляют конструкторов и инженеров искать альтернативу традиционным подшипниковым материалам.

Использование в качестве подшипниковых материалов новых сплавов, более износостойких материалов и композиций имеет многолетнюю историю как успехов, так и неудач на этом пути. Сейчас можно найти на рынке многочисленные предложения в этой области: фторопласты (Ф-4 ГОСТ 10007-80 и др.), графито-фторопласты, углеграфиты, алюминий-оловянные сплавы, бронзу, латунь, фенопласты (текстолит), поликарбонаты, полиамиды (капрон, нейлон), резину, карбиды, металлокерамику и др. Однако все эти материалы не приобрели масштабного применения на практике в связи со сложностью технологий, нестабильным качеством, высокой стоимостью и т.д. Поэтому продолжение поиска универсальных, высокоэффективных и пригодных к промышленному применению новых подшипниковых материалов можно считать мировой тенденцией.

Одно из самых перспективных направлений разработки подшипниковых материалов –



Упорные сегменты подшипника центробежного компрессора



создание композиций на основе матриц из высокомолекулярных полимеров группы кетонов, полимеров линейного строения, ароматических гетероциклических соединений и др. (ГОСТ 33366.12015; ISO 1043-1:2011. «Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Часть 1. Основные полимеры и их специальные характеристики»). В настоящее время в России единственной компанией, имеющей большой практический опыт промышленного применения полимерных антифрикционных материалов в узлах трения, является тульское предприятие «НПК «Промышленные технологии» (<https://npkpt.ru>).

Компания обладает патентованной технологией создания комбинированных конструкционных материалов из передовых инженерных полимеров, произвела и внедрила более 1500 подшипников из полимерных антифрикционных материалов в промышленную эксплуатацию газо-, паро-, гидротурбинного, компрессорного, электроприводного, насосного, редукторного и другого оборудования [2, 3]. Совместно с партнерами компании («Газпром», «Невский завод», «Газпром энергохолдинг индустриальные активы», «Силовые машины», «Лукойл», «Сибур», «Русэлпром» и др.) получены перспективные результаты, демонстрирующие рост производительности, КПД и межремонтного периода роторного оборудования, снижение ремонтных и эксплуатационных расходов.

Ряд наиболее применяемых материалов включает в себя композиции К30ПТ, М30ПТ, Н30ПТ (ТУ 22.29.29-003-49348341-2020), имеющие наиболее высокие эксплуатационные характеристики в сравнении с другими антифрикционными материалами отечественного и иностранного производства.

Сокращения

PBI – полибензимидазол
PI – полиимид
PAI – полиамидимид
PEI – полиэфиримид

PAEK – полиарилэфиркетон
PEEK – полиэфирэфиркетон

PSU – полисульфон
PESU – полиэфирсульфон

LCP – жидкокристаллический полимер
PTFE – политетрафторэтилен
PFA – перфторо (алкил винил эфир)-тетрафторо-этилен
PPS – поли (фенилен сульфид)
PPA – полифаламид
PVDF – поли (винилиден фторид)

PMMA – поли (метил метакрилат)
PC – поликарбонат
ABS – акрилонитрил-бутадиен-стирол

PA66 – полиамид 66
PET – поли (этилен терефталат)
PBT – поли (бутилен терефталат)
UHMWPE – сверхвысокомолекулярный полиэтилен
POM – полисиметелен, полиацеталь, полиформальдегид

PS – полистирол
PVC – поли (винил хлорид)

PP – полипропилен
HDPE – полимер высокой плотности
LDPE – полимер низкой плотности



Упорные сегменты подшипника центробежного компрессора в процессе производства

➤ Радиальный подшипник из композиционного антифрикционного материала, установленный на редукторе компрессора



Акционерное общество «НПК «Промышленные технологии» осуществляет разработку, инжиниринг и производство гидродинамических подшипников скольжения, уплотнений и других узлов трения любой сложности на основе инновационного антифрикционного покрытия; готовых изделий, запасных частей, а также их ремонт и модернизацию.

Акционерное общество «Невский завод» (АО «НЗЛ») выпускает газоперекачивающие агрегаты нового поколения мощностью до 32 МВт (ГПА и ЭГПА); паротурбинные агрегаты мощностью до 25 МВт; электроприводные нагнетатели до 32 МВт; генерирующие энергоблоки на базе паровых и газовых турбин мощностью до 32 МВт; системы комплексной автоматизации промышленных объектов; продукцию собственного металлургического производства.



➤ Импортозамещение – улучшенный аналог подшипников компании Renk AG (ФРГ) серии SC, WG, HG, LA, Zollern AG (ФРГ) серии Z для электродвигателей, разработанный и изготовленный НПК «Промышленные технологии»

Заключение

В настоящее время в мировой практике разработаны новые перспективные материалы на основе высокомолекулярных полимеров с антифрикционными наполнителями (композиционные материалы). Они обладают возможностью «программирования» их свойств для применения в подшипниках скольжения роторного оборудования с учетом конкретных данных о нагрузке, маслоснабжении, температурном режиме, требований к вибрационной стойкости и износостойкости и другим характеристикам в эксплуатации.

Трудно объяснить продолжающуюся приверженность многих механиков и инженеров к морально устаревшей технологии и материалам, в то время как уже есть примеры применения гораздо лучших решений. Становится очевидным, что применение современных материалов и замена неэффективных технологий является необратимой тенденцией.

Производители оборудования, ремонтные и эксплуатирующие компании, работающие с устаревшими технологиями узлов трения, неизбежно будут вытеснены более эффективными конкурентами. Задача квалифицированного специалиста – сделать правильный выбор и постараться занять лидерство в этом движении.

В цикле последующих статей в журнале будут представлены некоторые результаты научных исследований и практического применения подшипников производства НПК «Промышленные технологии», представляющие наибольший интерес для конструкторов, инженерных и эксплуатационных служб – подписчиков и читателей журнала. **Д**

Список литературы

1. Friedrich K./ *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2018. – №1. – pp. 3–39.

2. Патент № 2691356 «Способ нанесения антифрикционного слоя на металлическую деталь», дата начала отчета срока действия патента: 31.01.2018, государственная регистрация отчуждения исключительного права по договору проведена 16.01.2020 № РД0322264. Приобретатель исключительного права АО «НПК «Промышленные технологии».

3. Патент № 2671779 «Способ нанесения антифрикционного слоя (варианты)», дата начала отчета срока действия патента: 31.01.2018, государственная регистрация отчуждения исключительного права по договору проведена 16.01.2020 № РД0322264. Приобретатель исключительного права АО «НПК «Промышленные технологии».



В Самаре открыт новый центр конструкторских разработок в области двигателестроения.

На предприятии «ОДК–Кузнецов» начал работать центр конструкторских разработок и научных исследований – это современная научно-исследовательская база, где будут создаваться перспективные силовые установки для авиации, космоса и энергетики. Конструкторское бюро оснащено современной техникой для проектирования.

В создание комплекса площадью более 10 тыс. м² инвестировано свыше 1,5 млрд рублей. В новом здании КБ организовано 500 рабочих мест для инженеров-конструкторов и работников технических служб. Центр оборудован системами инженерного анализа и проектирования, а также собственными системами хранения и обработки данных. Это позволит разрабатывать газотурбинные двигатели полностью в виртуальной среде, с применением «цифровых двойников», что сократит сроки создания новой техники.

Центр имеет двухуровневый конференц-зал с системой защищенной видео-конференц-связи для обучающих мероприятий, семинаров и работы над совместными проектами. Специальный учебный класс предназначен для студентов проекта «Крылья Ростеха».

«ОДК–Кузнецов» – одно из самых высокотехнологичных предприятий страны, имеющее современную производственную базу. В модернизацию мощностей компании в последние годы вложено более 40 млрд рублей, открыто 12 новых инфраструктурных объектов. Современный научно-исследовательский центр позволит привлечь молодых специалистов, продолжить развитие Объединенной двигателестроительной корпорации.

Компания «ИНГК» выполнит капитальный ремонт газовой турбины для Харьягинского месторождения.

Компания активно развивает новое направление деятельности – проведение технического обслуживания, ремонта, реконструкции, сервиса и поставку запасных частей для динамического оборудования (газотурбинные и компрессорные установки, газопоршневые двигатели и т.д.) зарубежных производителей, в том числе с использованием концепции модульных ремонтов.

Для ООО «Зарубежнефть-добыча Харьяга», осуществляющего эксплуатацию Харьягинского месторождения, предприятие «ИНГК» выполнит капитальный ремонт и поставит на объект эксплуатации газогенератор и силовую турбину для ГТУ SGT-200-1S мощностью 6,5 МВт производства Siemens. Энергоблоки эксплуатируются на месторождении с 2002 года.



Издательский дом МЭИ

idmei.ru



Выпущено новое издание книги

Газотурбинные энергетические установки

учебное пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осыка; под ред. проф. В.Д. Булова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2022. – 428 с. : ил.

Изложены основы теории энергетических газотурбинных установок электростанций. Значительное внимание уделено особенностям их конструкций и составу тепловых схем, методам повышения КПД производства электроэнергии и экономии топлива. Приведены методики расчета показателей их экономичности. Особое внимание уделено факторам, влияющим на режимы и характеристики ГТУ, способам регулирования отпуска электроэнергии. Рассмотрены вопросы улучшения экологических показателей установок.

Предназначено для студентов энергетических вузов, может быть полезно научным сотрудникам, инженерам, персоналу электростанций.

Приобрести указанную книгу можно через сайт <https://www.idmei.ru>

Контактная информация: АО «Издательский дом МЭИ», 111024, Москва, ул. 2-я Кабельная, д. 2, тел: (495) 280-12-46, электронная почта: info@idmei.ru

РЕКЛАМА

Основы методики проектирования турбодетандеров для объектов ПАО «Газпром»

В. К. Юн, д.т.н. – генеральный конструктор, v.yun@reph.ru

М. М. Ленцман – ведущий конструктор, m.lentsman@reph.ru

**А. В. Скороходов – заместитель генерального конструктора, a.skorohodov@reph.ru
АО «Невский завод»**

Ключевые слова:

турбодетандер, радиальный турбодетандер, турбодетандер центростремительного типа, осевой турбодетандер

Аннотация

Вопросы и проблемы энергоэффективности оборудования, эксплуатирующегося на предприятиях ПАО «Газпром», в последнее десятилетие приобретают всё более важный характер, широко обсуждаются на международных форумах и конференциях.

Наличие неиспользованной энергии и дополнительных затрат мощности для вспомогательных систем при дросселировании газа на станциях охлаждения газа (СОГ) и на газораспределительных станциях (ГРС) свидетельствуют о недостаточно эффективном использовании оборудования. Одним из решений данной проблемы является применение турбодетандерной техники [1].

В статье представлена классификация турбодетандеров, наиболее широко распространенных в отечественной газовой промышленности. Приведены зависимости, позволяющие оценить энергоэффективность различных конструктивных решений, и требования к минимальному набору исходных данных. Рассмотрены характерные геометрические и кинематические зависимости как для осевых, так и центростремительных детандеров. Отмечена прямая взаимосвязь технологического процесса и конструктивного решения. Изложены наиболее типичные недостатки, встречающиеся в эксплуатируемых изделиях. Даны основные подходы проектирования и доводки новой продукции.

Fundamentals of the design methodology of turbo expanders for Gazprom PJSC facilities

V.K. Yun, Doctor of Engineering Science – General Designer, v.yun@reph.ru

M.M. Lentsman - Leading Designer, m.lentsman@reph.ru

**A.V. Skorokhodov – Deputy General Designer, a.skorohodov@reph.ru
Nevsky zavod JSC**

Key words:

turbo expander, radial turbo expander, centripetal type turbo expander, axial turbo expander

Abstract

The issues and problems of energy efficiency of equipment operated at the enterprises of Gazprom PJSC in the last decade have become increasingly important and are widely discussed at international forums and conferences. The presence of unused energy and additional power costs for auxiliary systems during gas throttling at gas cooling stations and gas distribution stations indicate insufficient efficient use of equipment. One of the solutions to this problem is the use of turbo-expander technology.

The article presents the classification of turbo expanders, the most widely used in the domestic gas industry. Dependencies are given that allow us to evaluate the energy efficiency of various

design solutions and requirements for a minimum set of initial data. The characteristic geometric and kinematic dependences for both axial and centripetal expanders are considered. The direct relationship between the technological process and the constructive solution is noted. The most typical disadvantages encountered in the operated products are described. The basic approaches of designing and fine-tuning new products are given. The method of turbo expanders designing, the basics of which are described in the article, allows to design the equipment, following the calculation algorithm from processing the initial data to testing the first pilot sample on the stand.

Турбодетандер – это не что иное, как газовая турбина, работающая при низких температурах [2]. По принципу действия турбодетандеры можно разделить на два класса:

1. объемного типа действия, в которых расширение происходит в замкнутой полости изменяющегося объема (поршневые, ротационные, спиральные);
2. динамического принципа действия, процессы расширения в которых происходят непрерывно, а их работа основывается на преобразовании энергии давления газа сначала в кинетическую, а затем в механическую или электрическую энергию.

На объектах ПАО «Газпром» преимущественно применяются турбодетандеры динамического принципа действия. К ним относятся радиальные и осевые детандеры, схемы которых показаны на рис. 1 и 2 соответственно. В радиальных турбодетандерах газ движется в радиальном направлении, они могут быть как центробежного, так и центростремительного типа. В осевых турбодетандерах газ движется по проточной части в осевом направлении, они обычно используются для холодильных установок большой производительности. Но чаще используются центростремительные турбодетандеры, которые также подразделяются на радиально-осевые и диагональные.

Проведем небольшой анализ энергоэффективности и надежности проточных частей осевых и центростремительных турбодетандеров [3]. При проектировании должны быть известны исходные требования, в которых указываются: G – массовый расход, кг/с; P_H^* – полное давление на входе в турбодетандер, Па; T_H^* – полная температура перед детандером, К; P_K – статическое давление на выходе из турбодетандера, Па.

По исходным данным определяется удельная изоэнтальная работа расширения или изоэнтальный перепад энтальпий:

$$h_{sp} = \Delta i_s = c_p T_H^* \left[1 - \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} \right] \quad (1)$$

где h_{sp} – удельная изоэнтальная работа расширения газа, Дж/кг; Δi_s – изоэнтальный перепад энтальпий, Дж/кг; c_p – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); ε – степень понижения давления, безразмерная величина; k – показатель изоэнтропы рабочего вещества, безразмерная величина (для воздуха $k = 1,4$).

На этом этапе расчета никаких различий в определении удельной работы расширения как для осевого, так и для центростремительного типа турбодетандеров нет. По вычисленному полному перепаду энтальпий опреде-

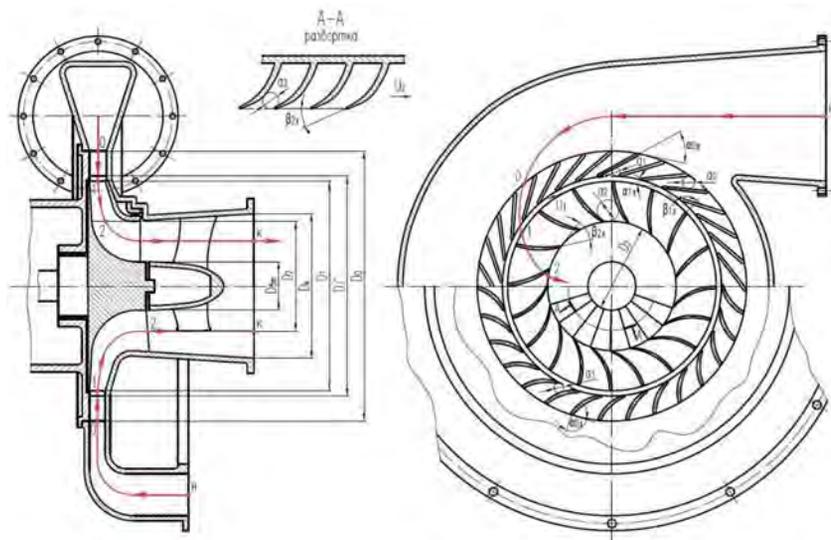


Рис. 1.

Схема турбодетандера центростремительного типа: верхняя половина с закрытым радиальным колесом, нижняя – с полукрытым радиально-осевым колесом

ляются геометрические и кинематические параметры проточной части. При проектировании турбодетандеров в зависимости от постановки задачи возможны два варианта расчета: когда частота вращения ротора неизвестна и когда она задана в исходных данных. Первый вариант используется при проектировании силовой турбины или детандера газовой холодильной машины, при этом частота вращения определяется по рассчитанной окружной скорости и диаметру колеса:

■ для осевых турбодетандеров

$$n = \frac{60 u_{1cp}}{\pi D_{1cp}}, \quad (2)$$

где n – частота вращения ротора, об/мин; u_{1cp} – окружная скорость на среднем диаметре D_{1cp} , м/с; D_{1cp} – средний диаметр при входе в рабочее колесо (РК), м;

■ для центростремительных турбодетандеров

$$n = \frac{60 u_1}{\pi D_1}, \quad (3)$$

где u_1 – окружная скорость на диаметре D_1 , м/с; D_1 – диаметр при входе в РК, м.

Характерным геометрическим параметром для турбодетандеров является наружный диаметр рабочего колеса: для осевых – это $D_{1н}$, для центростремительных – D_1 .

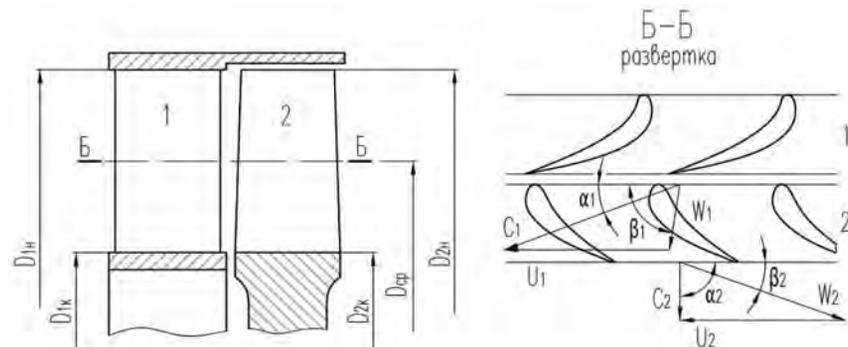


Рис. 2.

Схема проточной части и треугольники скоростей осевого турбодетандера: 1 – направляющая лопатка; 2 – лопатка рабочего колеса

Характерной скоростью для осевых турбодетандеров является скорость u_{1cp} на среднем диаметре D_{1cp} при входе в РК, для центростремительных – u_1 на диаметре D_1 .

Для простоты и удобства расчетов обычно вводят безразмерные коэффициенты, характеризующие геометрические и кинематические параметры. Важным безразмерным параметром рабочих колес является коэффициент радиальности [4]:

- для осевых турбодетандеров

$$\mu = \frac{D_{2cp}}{D_{1cp}}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент радиальности, безразмерная величина; D_{2cp} – средний диаметр при выходе из рабочего колеса, м.

- для центростремительных турбодетандеров

$$\mu = \frac{D_2}{D_1}, \quad (5)$$

где D_2 – на при выходе из рабочего колеса, м.

Средние диаметры определяются по формулам:

$$D_{1cp} = \frac{D_{1н} + D_{1вт}}{2} = \frac{D_{1н}}{2} (1 + v_1), \quad (6)$$

$$D_{2cp} = \frac{D_{2н} + D_{2вт}}{2} = \frac{D_{2н}}{2} (1 + v_2), \quad (7)$$

где $D_{1н}$ и $D_{1вт}$ – наружный диаметр и диаметр втулки входного сечения, м; $D_{2н}$ и $D_{2вт}$ – наружный диаметр и диаметр втулки выходного сечения, м; v_1 – относительный диаметр входного сечения рабочего колеса, безразмерная величина; v_2 – относительный диаметр выходного сечения рабочего колеса, безразмерная величина.

$$v_1 = \frac{D_{1вт}}{D_{1н}}, \quad (8)$$

$$v_2 = \frac{D_{2вт}}{D_{2н}}, \quad (9)$$

Используемые в расчетах турбодетандеров коэффициенты расхода:

- для осевых турбодетандеров

$$\varphi_1 = \frac{c_{1z}}{u_{cp}}, \quad (10)$$

$$\varphi_2 = \frac{c_{2z}}{u_{cp}}, \quad (11)$$

где φ_1 – коэффициент расхода на входе в РК, безразмерная величина; φ_2 – коэффициент расхода на выходе из РК, безразмерная величина; c_{1z} – осевая составляющая скорости на входе в РК, м/с; c_{2z} – осевая составляющая скорости на выходе из РК, м/с; u_{cp} – окружная скорость на среднем диаметре, м/с;

- для центростремительных турбодетандеров

$$\varphi_1 = \frac{c_{1r}}{u_1}, \quad (12)$$

$$\varphi_2 = \frac{c_{2r}}{u_2}, \quad (13)$$

где c_{1r} – расходная составляющая скорости на входе в РК, м/с; c_{1r} – расходная составляющая скорости на выходе из РК, м/с.

Как правило, осевые турбодетандеры считаются более расходными по сравнению с центростремительными – коэффициенты их расхода на 20...30 % больше [5].

Работа расширения определяется следующим образом:

$$l_3 = c_{1u}u_1 - c_{2u}u_2 = \left(\varphi_{1u} - \varphi_{2u} \frac{u_2}{u_1} \right) u_1^2 = \psi_3 u_1^2, \quad (14)$$

где l_3 – работа расширения (Эйлерова работа), Дж; φ_{1u} – безразмерная окружная составляющая абсолютной скорости на входе в РК, безразмерная величина; φ_{2u} – безразмерная окружная составляющая абсолютной скорости на выходе из РК, безразмерная величина; c_{1u} – окружная составляющая скорости (закрутка потока) на входе, м/с; c_{2u} – окружная составляющая скорости (закрутка потока) на выходе, м/с; ψ_3 – коэффициент Эйлеровой работы ступени; u_2 – окружная скорость на выходе, м/с.

$$\psi_3 = \varphi_{1u} - \mu \varphi_{2u} \quad (15)$$

$$\varphi_{1u} = \frac{c_{1u}}{u_1}, \quad (16)$$

$$\varphi_{2u} = \frac{c_{2u}}{u_2}, \quad (17)$$

Внутренняя мощность турбодетандера представляет собой разность Эйлеровой мощности и мощности, затрачиваемой на преодоление сил трения колес о газ:

$$N_i = N_3 - N_{тр}, \quad (18)$$

где N_i – внутренняя мощность турбодетандера, Вт; N_3 – Эйлерова мощность, которая создается газом, Вт; $N_{тр}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения колес о газ, Вт.

$$N_3 = (G - \Delta G)(\varphi_{1u} - \mu \varphi_{2u}) u_1^2 = (G - \Delta G) \psi_3 u_1^2, \quad (19)$$

где ΔG – протечки рабочего вещества через зазоры, кг/с.

Для удобства применяется безразмерный коэффициент мощности:

$$\alpha = (1 - \beta_{пр} - \beta_{тр})(\varphi_{1u} - \mu \varphi_{2u}) = (1 + \beta_{пр} - \beta_{тр}) \psi_3, \quad (20)$$

где α – безразмерный коэффициент мощности, безразмерная величина; $\beta_{пр}$ – коэффициент потерь на протечки, безразмерная величина;

$\beta_{тр}$ – коэффициент потерь на трение, безразмерная величина.

Таким образом, по приведенным выше формулам определяются основные параметры турбодетандера и оценивается геометрия прочной части.

Приведем общие понятия и процессы расширения в турбодетандере на тепловой диаграмме.

Газ поступает во входной патрубок турбодетандера, что соответствует точке Н на тепловой диаграмме. Далее газ поступает во входной направляющий аппарат либо в сопловой аппарат (точка О), что сопровождается ускорением потока и увеличением энтропии. Процесс в сопловом аппарате 0-1 сопровождается также увеличением скорости и энтропии. Поток со скоростью c_1 попадает на лопатки рабочего колеса, которое вращается с угловой скоростью ω .

Основным элементом турбодетандеров является рабочее колесо, в котором газ с кинетической энергией преобразуется в механическую либо электрическую энергию (процесс 1-2 на рис. 3), при этом поток в относительном движении ускоряется от w_1 на входе до w_2 на выходе из колеса, а давление уменьшается с p_1 на входе до p_2 на выходе из колеса.

В зависимости от срабатывания части работы расширения (теплоперепада) в рабочем колесе и направляющем аппарате ступени разделяют на реактивные и активные. В реактивных ступенях часть теплоперепада срабатывает в рабочем колесе, а часть – в направляющем аппарате. В активных ступенях весь теплоперепад срабатывает в направляющем аппарате, а в колесе лишь происходит преобразование кинетической энергии в механическую.

После выхода из РК газ направляется (процесс 2-К на рис. 3) в выходное устройство, в котором уменьшается скорость и немного повышается давление, при этом происходит увеличение энтропии S_k из-за диффузорного характера течения.

Таким образом, полезная удельная работа турбодетандера будет равна разности $h_n - h_k$, при этом принят в расчетах не политропный КПД как у компрессоров, а изоэнтروпный.

Рассмотрев процесс расширения турбодетандера на тепловой диаграмме T-S, можно понять, как в технологической схеме используется турбодетандер [6]. На рис. 4 представлена одна из технологических схем сепарации товарного газа.

Газ из промежуточных сепараторов 20С-1 поступает в детандерную часть, где охлаждается за счет расширения. Далее газ направляется в низкотемпературный сепаратор 20С-2, после чего поступает в затрубное пространство теплообменников 20Т-2, где нагревается за счет

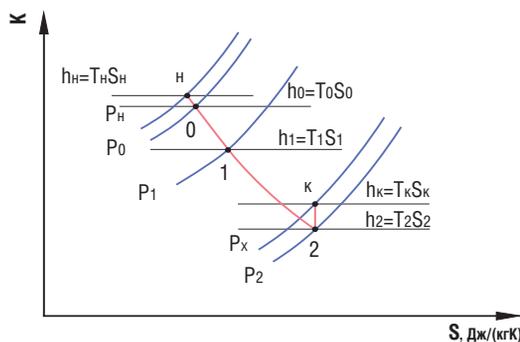


Рис. 3.

Тепловая диаграмма:

- h – напор в сечениях н, 0, 1, 2, к, Дж/кг;
- P – давление в сечениях н, 0, 1, 2, к, Па;
- T – температура в сечениях н, 0, 1, 2, к, К;
- S – энтропия в сечениях н, 0, 1, 2, к, Дж/(кгК)

рекуперации тепла встречного потока. Подогретый товарный газ поступает в компрессорную часть, где происходит его сжатие, и направляется через узел замера газа в газопровод подключения установки комплексной подготовки газа (УКПГ).

Для выполнения тех или иных технологических процессов охлаждения и сепарации газа применяются различные типы турбодетандерного оборудования (рис. 5).

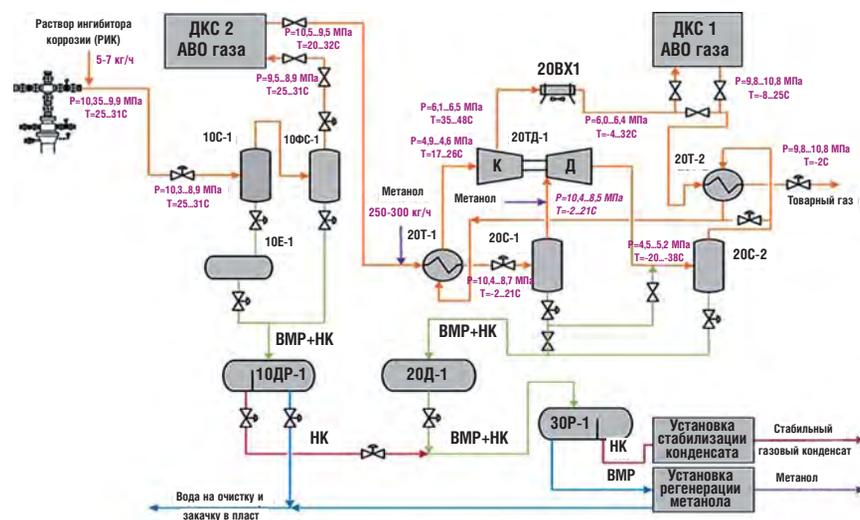
В настоящее время на объектах ПАО «Газпром» эксплуатируются свыше 200 турбодетандеров. Все они имеют ряд недостатков, среди которых:

- вибрация роторов;
- низкое качество материалов;
- невыполнение номинальных параметров;
- недостаточная защита от попадания влаги в магнитный подвес.

Необходимо также решать проблемы, связанные с износостойкостью, очисткой газа от пыли и влаги, с увеличением осевой нагрузки. Каждая индивидуальная проблема должна решаться, прежде всего, на предприятии-изготовителе и на месте эксплуатации. Часть проблем (вибрация ротора, надежность) должны быть устранены в условиях завода на специальных стендах и станках.

Рис. 4.

Технологическая схема сепарации товарного газа



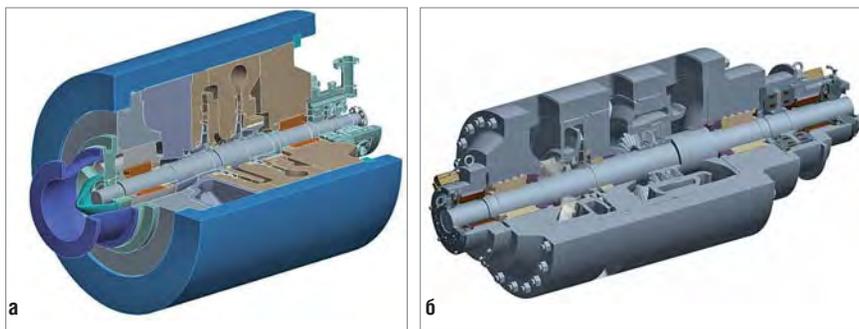


Рис. 5.

Типы турбодетандерного оборудования:

а) центробежный турбодетандер;

б) компрессорный агрегат с двухступенчатым осевым турбодетандером

и одноступенчатым центробежным компрессором

Проблемы, связанные с низким качеством технологического газа или с нарушениями технологии должны решаться совместно с проектными организациями и при участии заказчика.

Основными принципами, которыми должны руководствоваться поставщики турбодетандерного оборудования, являются:

- требования технологических схем к турбодетандерам;
- изменение условий эксплуатации УКПГ;
- согласование характеристик работы турбодетандера и всей технологической установки УКПГ;
- объем гарантийных обязательств.

Особое внимание должно уделяться испытаниям турбодетандеров на предприятии-изготовителе. Если для компрессоров достаточно иметь электродвигатель, мультипликатор и трубопроводы, нет необходимости в замкнутом контуре, то для турбодетандеров обязательным является наличие газа высокого давления и соответствующей температуры. Кроме газа с определенными параметрами, должен быть генератор для потребления энергии, получаемой после процес-

са расширения, а также измерительная техника. Все испытания проводятся в замкнутом контуре с компрессорной установкой для восстановления давления перед турбодетандером.

Таким образом, методика проектирования турбодетандеров, основы которой изложены выше, позволяет проектировать детандерные машины, следуя алгоритму расчета от проработки исходных данных, получения геометрических размеров и выбора основного принципиального решения до испытания первого головного образца на стенде. **Д**

Список литературы

1. Куличихин В.В., Лазарева О.О. / Современное состояние применения турбодетандеров на газопотребляющих промышленных объектах. *Новости теплоснабжения*. – 2010 – № 10 (122).

2. Холодильные машины: Под общей редакцией Л.С. Тимофеевского. – СПб: Политехника, 2006. – 944 с. ил.

3. Давыдов А.Б., Кобулашвили А.Ш., Шерстюк А.Н. *Расчет и конструирование турбодетандеров* – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.: ил.

4. Епифанова В.И. *Низкотемпературные радиальные турбодетандеры*. М.: Машгиз, 1961. – 400 с.

5. Страхович К.И., Кондряков И.К., Епифанова В.И., Буткевич К.С., Новотельнов В.Н. *Расширительные машины*. М.-Л.: «Машиностроение», 1966

6. *Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин* / Под ред. И.А. Сакуна. Л.: Машиностроение, 1987–423 с.

Новости

НПО «Искра» изготовило и ввело в эксплуатацию ГПА на Уренгойском НГКМ (ЯНО).

Компания изготовила 15 агрегатов ГПА-10ДКС-09 Урал для эксплуатации на Уренгойском месторождении: по три агрегата для второй очереди ДКС на УКПГ-2В, УКПГ-5В, УКПГ-8В и шесть ГПА для ДКС на УКПГ-11В (1- и 2-я очередь) Ен-Яхинского месторождения.

Вторая очередь ДКС на УКПГ-2В и на УКПГ-5В Уренгойского НГКМ введена в эксплуатацию. На остальных агрегатах проводятся пусконаладочные работы. Заказчиком оборудования выступает ООО «Газпром добыча Уренгой». Для ГПА каждой ДКС разработаны индивидуальные технические решения, обусловленные особенностями объекта (сейсмические нагрузки и резко континентальный климат с суровой зимой).

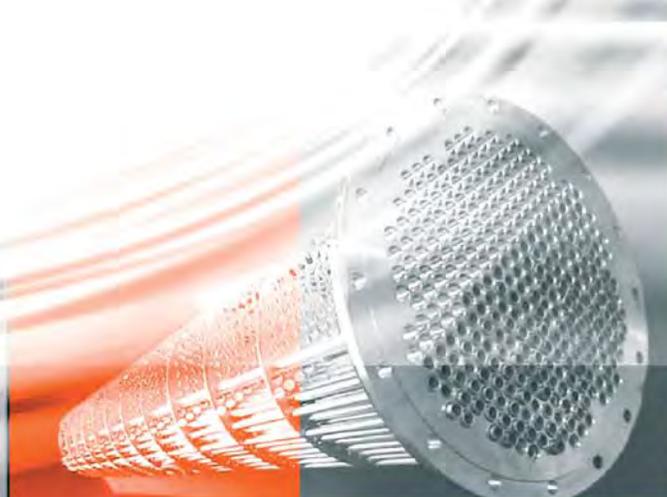
ГПА серии «Урал» размещаются в индивидуальных легкосборных укрытиях ангарного типа. Агрегаты созданы на базе ГПУ-16П с электрозапуском («ОДК-Пермские моторы») и центробежного компрессора ЦБК255 производства АО «Невский завод». Все оборудование поставлено в виде блоков высокой заводской готовности в транспортных габаритах, что облегчило монтаж с применением универсальных грузоподъемных средств.

Особенностью агрегатов является использование компрессоров с масляными уплотнениями и масляными подшипниками. Невский завод (входит в Группу «Газпром энергохолдинг индустриальные активы») изготовил для данных ГПА центробежные компрессоры ЦБК255-2,2/41-9000/10; ЦБК 255-3,0/30-9000/10 и ЦБК 255-2,2/76-9000/10. Новые ГПА обеспечат требуемые параметры работы фонда скважин, проектные уровни добычи газа и газового конденсата, а также поддержание давления добываемого газа для осуществления технологического процесса низкотемпературной сепарации.

Уренгойское месторождение было открыто в 1966 г. на севере Тюменской области, в Пуровском районе ЯНО. Ен-Яхинское месторождение – это нефтегазоконденсатный участок на севере Пуровского района, является частью Уренгойского НГКМ.

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

HEAT&POWER



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



Организатор



Международная
Выставочная
Компания

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



ЗАБРОНИРУЙТЕ СТЕНД
heatpower-expo.ru

РЕКЛАМА

Разработка отечественной мобильной компрессорной установки с моторкомпрессором ICL Baker Hughes

О. В. Бычков, И. В. Травкина, С. В. Кудрявцев, И. А. Странкалс, В. Е. Щавлев (к.т.н.) – ООО «ИНГК-Промтех»

Активная разработка российскими компаниями передового, технически сложного оборудования, приобретаемого ранее за рубежом, позволит нефтегазовому комплексу всерьез опереться на отечественного производителя во всех сложных ситуациях. Именно такие разработки могут восстановить национальный научно-технический суверенитет во всех отраслях промышленности.

In brief
Development of a domestic mobile compressor plant with ICL Baker Hughes motor compressor.
The active development by Russian companies of advanced, technically sophisticated equipment purchased earlier abroad will allow the oil and gas complex to rely seriously on the domestic manufacturer in all difficult situations. It is precisely such developments that will restore national scientific and technical sovereignty in all industries. In 2020, INGK started creating a mobile compressor unit for trial operation under a contract with Gazpromneft-Noyabrskneftegaz JSC and under a license agreement with Gazpromneft STC LLC.

В 2006 году компанией Baker Hughes был разработан моторкомпрессор ICL с нулевым уровнем выбросов (рис. 1). Он представляет собой центробежный компрессор, приводимый в действие непосредственно высокоскоростным синхронным электрическим двигателем. Компрессор может иметь несколько исполнений: одно рабочее колесо, консольно подвешенное на валу двигателя, или несколько рабочих колес в одном корпусе, расположенных в одной или двух технологических секциях (рядно или по схеме «спина к спине»). При этом и компрессор, и двигатель размещены в общем корпусе. Такая архитектура обеспечивает герметичность и позволяет избежать выбросов углеводородного газа.

Безредукторный привод и левитация вала на магнитных подшипниках (SKF) устраняют необходимость в смазке – экономия, по оценкам разработчика ICL, составляет 5000 литров масла за каждые пять лет. Ротор электрического двигателя и магнитный подвес в качестве охлаждающей среды используют перекачиваемый компрессором газ. Частотно-регулируемый привод позволяет изменять скорость с максимальной эффективностью и точностью во всем рабочем диапазоне для регулирования

степени повышения давления и расхода на входе, сокращая при этом энергопотребление. Малые массоинерционные характеристики ротора моторкомпрессора и характеристики магнитного подвеса обеспечивают рабочую частоту вращения менее чем за три минуты. В эксплуатации уровень шума моторкомпрессора ICL значительно ниже, чем у обычных компрессоров, – это обусловлено отсутствием трения, малыми размерами рабочих колес, точностью изготовления и конструкцией корпуса высокого давления. Еще одно преимущество моторкомпрессора ICL – компактные размеры, которые на 60 % меньше, чем у обычных вариантов машин для сжатия.

Таким образом, применение моторкомпрессора ICL особенно выгодно там, где важны высокая эффективность и экологические показатели (низкий уровень шума, отсутствие выбросов газа и масла) в сочетании с мобильностью и компактностью, при использовании для сжатия в широком диапазоне давлений чистого коммерческого природного газа или неочищенных слабосернистых газов. Простота конструкции значительно сокращает время монтажа, моторкомпрессор не имеет изнашиваемых деталей и критически важных вспомогательных систем и обеспечивает, по заявлению разработчика, 10 лет работы без технического обслуживания при компримировании чистого газа. Выгоды от применения моторкомпрессора ICL были подтверждены положительным опытом эксплуатации агрегатов на морских платформах с 2015 года.

Эти преимущества послужили причиной использования моторкомпрессора научно-техническим центром компании «Газпромнефть» (ООО «Газпромнефть НТЦ») в разработке технологической схемы модульной компрессорной установки и способа для сжатия



Рис. 1.

Моторкомпрессор ICL производства Baker Hughes

углеводородного газа. Целью разработки было создание мобильной, компактной и безопасной системы для сжатия газа, оптимизация эксплуатационных затрат и повышение автономности оборудования.

В предложенной модульной компрессорной установке поддерживается постоянное избыточное давление на входе в моторкомпрессор ICL путем организации линии рециркуляции газа в составе обвязки агрегата. Регулирование перепуска части газа на всасывание определяется соотношением расходов газа в магистраль и через байпас по прямой связи с линиями сбора газа с площадки. Незначительные пульсации давления в линиях сбора компенсируются объемом входного сепаратора.

Распределение газовых потоков между оборудованием модульной компрессорной установки осуществляется с частичным понижением давления сжатого газа. Газ с давлением нагнетания направляется на дроссель с целью снижения температуры газа с одновременным отделением из состава сконденсированной жидкой фазы. Часть очищенного от жидкой дисперсной фазы газа байпасируется и обеспечивает стабилизацию давления на входе в моторкомпрессор ICL. Другая часть отборов используется для поддержания автономной работы компрессорного агрегата: дросселированный и очищенный газ поступает в контур охлаждения моторкомпрессора, где снимает тепловую нагрузку от подшипников и ротора. Причем отборы газа не являются безвозвратными потерями, поскольку «отработанный» газ в итоге возвращается в газовый тракт моторкомпрессора.

Резюмируя изложенное, необходимо отметить, что применение в составе модульной компрессорной установки центробежного компрессора в герметичном закрытом корпусе с высокооборотным двигателем с частотным регулированием на магнитных подвесах позволило значительно повысить безопасность и эффективность КУ, снизить ее массогабаритные характеристики по сравнению с известными техническими решениями. При этом безопасность обеспечивается герметичной конструкцией компрессорного агрегата и поддержанием постоянного избыточного давления в газовых линиях путем перепуска газа, что исключает риск вакуумирования и подмешивания кислорода к взрывоопасной перекачиваемой среде.

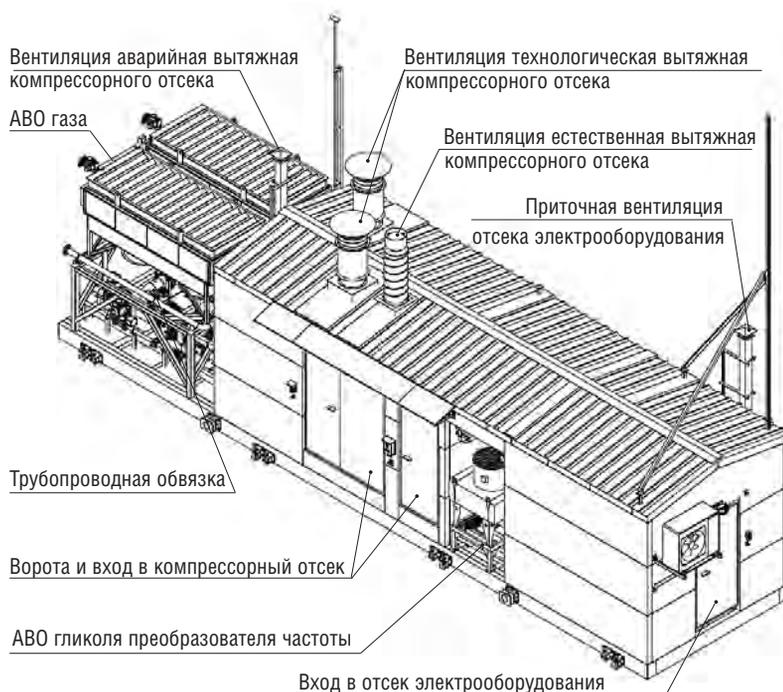
Предполагаемые эксплуатационные затраты должны быть снижены за счет простоты конструкции компрессорного агрегата, упрощения монтажа, отсутствия необходимости в смазке. Не требовалось сложного технического обслу-

живания и ремонта в процессе эксплуатации благодаря отсутствию контактных уплотнений и трущихся частей в компрессорном агрегате. В 2019 году ООО «Газпромнефть НТЦ» по итогам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ получило патент на изобретение RU 2 692 859 «Способ использования углеводородного газа и модульная компрессорная установка для его осуществления».

В 2020 году компания «ИНГК» приступила к созданию мобильной компрессорной установки для опытной эксплуатации по договору с АО «Газпромнефть–Ноябрьскнефтегаз» и по лицензионному соглашению с ООО «Газпромнефть НТЦ». За основу была принята технологическая схема по патенту «Газпромнефть НТЦ» и использовался моторкомпрессор ICL с двухсекционным центробежным компрессором с двумя рабочими колесами в каждой секции. Мобильная компрессорная установка разработки «ИНГК» представлена на *рис. 2*.

Для охлаждения моторкомпрессора и его продувки с целью удаления воздуха и обеспечения взрывобезопасной концентрации газа внутри корпуса электродвигателя применялась система продувки. Технологический газ для охлаждения моторкомпрессора сначала очищается от примесей, затем по показаниям датчика температуры (при необходимости в холодное время года, для предотвращения переохлаждения) подогревается и подается на продувку зазора между ротором и статором двигателя и на подшипники центробежного компрессора и двигателя.

Рис. 2.
Мобильная компрессорная установка МКУ001 разработки ООО «ИНГК»



После моторкомпрессора газ, использованный для охлаждения, поступает в линию нагнетания первой ступени.

Часть очищенного газа для охлаждения поступает во входной сепаратор перед моторкомпрессором для быстрого заполнения газовой системы продувочным газом при предпусковой подготовке. Для охлаждения статора двигателя дополнительно применена жидкостная система охлаждения с замкнутым контуром, содержащим насос и АВО гликоля. Аналогичная система применена для охлаждения преобразователя частоты двигателя моторкомпрессора.

Все оборудование мобильной компрессорной установки, включающее (помимо уже перечисленного) промежуточный и выходной сепараторы, двухсекционный АВО газа, а также шкафы системы автоматического управления и силового электрооборудования, скомпоновано на общей транспортируемой раме. Для обеспечения транспортных габаритов АВО гликоля двигателя моторкомпрессора было размещено под АВО газа, а АВО гликоля преобразователя частоты – в нише блока-контейнера между компрессорным отсеком и отсеком электрооборудования.

Компания «ИНГК» разработала и изготовила мобильную компрессорную установку исполнения МКУ001 в феврале 2021 года. Одновременно с заводскими испытаниями были проведены сертификационные испытания на соответствие требованиям технического регламента ТР ТС 012/2011, и в начале марта 2021 года получен сертификат, подтверждающий безопасность КУ для работы во взрывоопасной среде. В ноябре 2021 года установка МКУ001 была поставлена на месторождение, в феврале 2022-го специалисты ООО «ИНГК» начали ее эксплуатационные испытания

при участии специалистов компаний Baker Hughes и SKF.

Нужно иметь в виду, что перечисленные выше технические достоинства мобильной компрессорной установки с моторкомпрессором ICL обусловлены высокой точностью изготовления ее компонентов и результатом их сложного взаимодействия. Все заявленные характеристики могут быть достигнуты только при строгом соблюдении всех технологических параметров процесса, которые закладываются при проектировании машины. Опыт первого запуска МКУ001 показал, на что следует обращать особое внимание при проектировании вспомогательных систем.

1. Расход продувочного газа, используемого для охлаждения подшипников и ротора двигателя

В технологической схеме нужно обязательно предусматривать устройство регулирования расхода газа (клапан), т.к. рабочий диапазон скорости вращения для моторкомпрессоров ICL довольно широк (для использованного в МКУ001 – 15 000...30 000 об/мин), и по мере разгона значительно возрастает расход продувочного газа. Поскольку вращающаяся часть всегда находится в состоянии левитации на магнитном подвесе, то поток газа для охлаждения на номинальной скорости вращения, при отсутствии регулирования, динамически воздействует на ротор и смещает его за пределы допустимого диапазона для начальных рабочих скоростей.

2. Регулирование системы защиты от помпажа при запуске

Следует обязательно учитывать тот факт, что газ, проходя через компрессор, меняет свой состав. Газ, используемый для охлаждения вращающихся частей, возвращается в линию нагнетания между ступенями. Таким образом, при запуске, когда компрессор работает в режиме полной рециркуляции, состав газа значительно отличается от перекачиваемого, и, как следствие, система защиты от помпажа неправильно идентифицирует положение помпажной кривой и рабочей точки.

3. Надежность системы электроснабжения

Данный параметр является критически важным для любых агрегатов с магнитными подвесами, т.к. кратковременное прерывание питания блоков управления магнитными подшипниками может приводить к прекращению левитации с задействованием страховочных подшипников, имеющих ограниченный ресурс. Высокие скорости вращения требуют еще большего внимания

Рис. 3.
Поврежденный ротор



к данному параметру. Производитель моторкомпрессора ICL решает данную проблему, используя эффект возбуждения в обмотках при вращении ротора на выбеге ЭДС, достаточный для поддержания режима левитации после отключения питания вплоть до относительно безопасной для посадки на страховочные подшипники скорости вращения.

При эксплуатационных испытаниях МКУ001 решался ряд технических проблем, которые были следствием изначально жестких исходных требований: компрессор должен был перекачивать газ с давлением на всасывании, равным атмосферному, при ограниченном объеме контура рециркуляции из-за требований к габаритам блока-укрытия компрессора. Поскольку запуск любого центробежного компрессора всегда выполняется с полной рециркуляцией для недопущения явлений помпажа, появлялись определенные сложности с переходом компрессора на магистральный входной трубопровод по причине повышенного давления на всасывании, а также из-за повышенной нагрузки на двигатель при работе на линии рециркуляции. Тонкая настройка системы защиты от помпажа и регулятора подачи продувочного газа позволили компенсировать данные негативные явления.

В ходе испытаний произошла нештатная ситуация, которая привела к критической поломке двигателя моторкомпрессора: при работе разрушились магниты ротора, что далее вызвало повреждение карбонового банджа ротора (рис. 3). Наиболее вероятно, данный отказ стал следствием работы агрегата на режиме с повышенной нагрузкой и повышенной температурой подвижных узлов (хотя заложенные заводом-изготовителем предельные значения превышены не были) во время настройки технологического процесса для устранения негативных явлений, описанных выше, но также не исключалась вероятность заводского брака при изготовлении ротора.

Несмотря на действующий договор, компания Baker Hughes на фоне санкций, принятых западными странами против Российской Федерации, отказалась от своих гарантийных обязательств. В этой ситуации компании «ИНГК» пришлось самостоятельно искать выход из сложившейся ситуации. В результате кооперации с российской компанией «ЭРГА», обладающей необходимыми компетенциями, а также всей требуемой материально-технической базой в г. Калуге для ремонта роторов синхронных двигателей с высокой скоростью вращения, в достаточно сжатые сроки были изготовлены новые магниты и бандаж с более высокими прочностными характеристиками. Была также выполнена сборка двигателя и пробный запуск, при котором для

управления магнитными подшипниками SKF использовалась система управления производства ООО «ЭРГА» (компания применяет ее в двигателях с магнитными подшипниками собственной разработки).

В январе 2023 г. восстановленный двигатель моторкомпрессора ICL был доставлен на объект, смонтирован, и испытания установки продолжились. Первые запуски на малых и средних оборотах (15 000 об/мин) показали значительное улучшение температурных параметров после ремонта, но дальнейшее увеличение скорости вращения в итоге приводило к аварийному останову по параметру дисбаланса ротора двигателя, который контролируется комплектной системой управления магнитными подшипниками SKF (предельное значение 45 мкм). Данная величина двойной амплитуды достигалась при частоте вращения 20 000 об/мин. Мобильная компрессорная установка производства ООО «ИНГК» представлена на рис. 4.

Конструктив моторкомпрессора ICL не предусматривает штатных плоскостей коррекции для выполнения тонкой подбалансировки движущихся частей в сборе, а также не рассчитан для выполнения данных манипуляций на объекте. Поскольку доступ к приводной стороне ограничен кожухом, а с неприводной стороны физически невозможен, единственным элементом, с помощью которого можно изменить баланс, стала часть муфты, жестко соединенная с валом двигателя. Методом внесения дополнительного дисбаланса была предпринята попытка определения вектора и корректировки баланса ротора. В ходе нескольких итераций (разборка-сборка-запуск) с размещением калибровочных грузов в технологических отверстиях полумуфты были достигнуты показатели, которые согласно методике наиболее близки к оптимальным при данных ограничениях.

Рис. 4.
Мобильная компрессорная установка производства ООО «ИНГК»



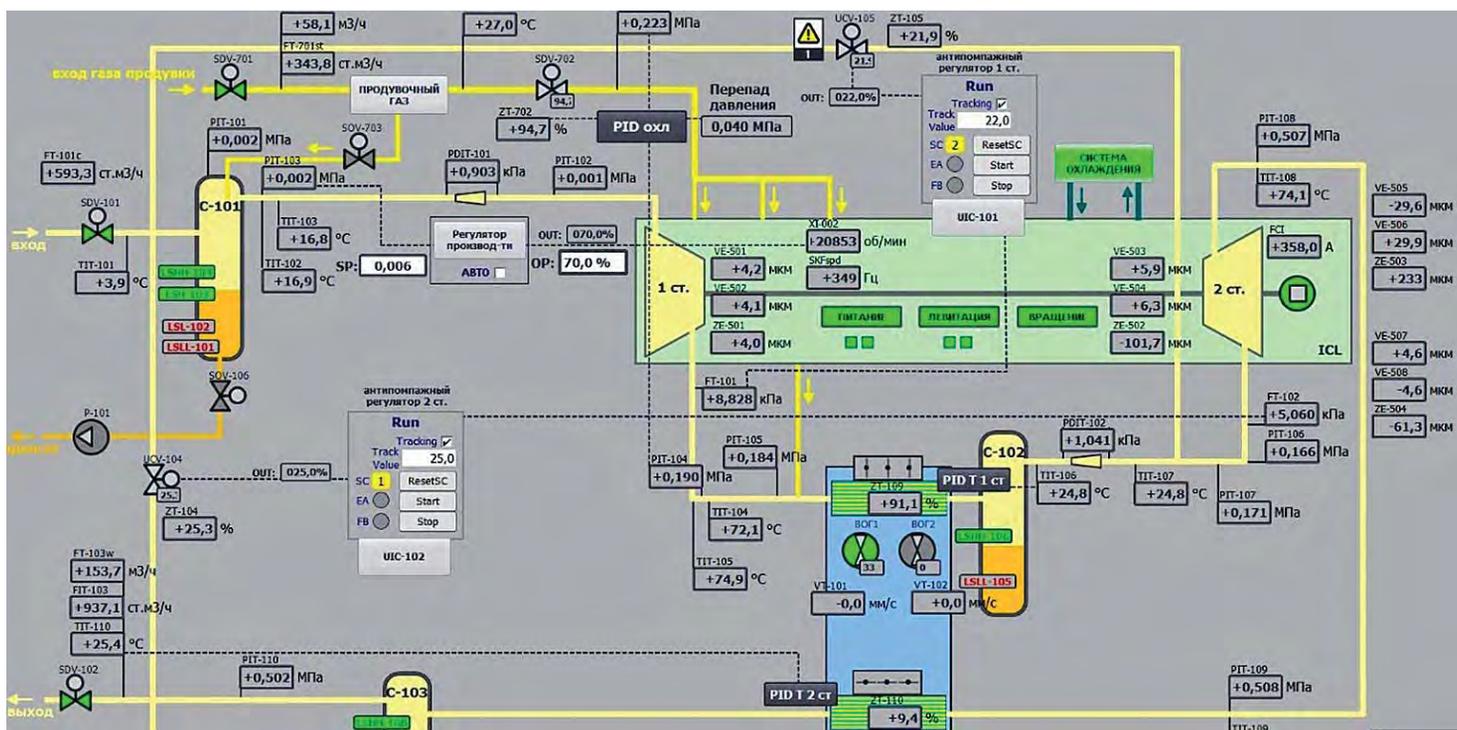


Рис. 5. Мнемосхема с параметрами рабочего режима

После проведенных работ система контроля параметров магнитных подшипников позволяла увеличивать частоту вращения до 26 000 об/мин.

Совместно с представителями заказчика было принято решение продолжить испытания характеристик компрессора. Результатом испытаний стало полное выполнение требований технического задания – перекачка объема 2 тыс. ст. м³/ч при давлении на всасывании, близком к атмосферному, избыточном давлении на нагнетании 0,8 МПа. Установка передана в эксплуатацию и в настоящий момент используется для перекачивания попутного нефтяного газа, поступающего в объеме 500 ст. м³/ч. Мнемосхема с параметрами рабочего режима представлена на рис. 5.

Специалисты ООО «ИНГК» уверены, что дополнительная повторная балансировка ротора могла бы позволить увеличить частоту вращения до максимального значения для использованного в МКУ001 моторкомпрессора ICL – 30 000 об/мин.

Результаты проектирования и изготовления компанией «ИНГК» мобильной компрессорной установки МКУ001 показали возможности создания оборудования с техническими характеристиками, соответствующими мировому уровню. Опыт кооперации с российскими предприятиями выявил высокий технический потенциал не только по ремонту импортного оборудования, но и по разработке и изготовлению аналогичной продукции. **Д**

Новости

ООО «ИНГК» приступило к монтажу двух ГПА-1604 на Сузунском месторождении.

Предприятие ведет монтаж ГПА-16 на УПГ Сузунского месторождения в Туруханском районе Красноярского края для АО «Сузун». Агрегаты предназначены для сжатия попутного нефтяного газа, подачи на установку подготовки газа и дальнейшего транспорта на центральный пункт сбора Ванкорского месторождения. Генеральный проектировщик – ООО «НК «Роснефть» – НТЦ, г. Краснодар.

В составе ГПА-1604 разработки и поставки «ИНГК» входят КШТ ГТУ открытого исполнения, системы всасывания и выхлопа, укрытия легкосборного типа компрессора с системами жизнеобеспечения, блоки электроснабжения и САУ. В составе полнокомплектных ГПА-1604 используются компрессоры Thermodyn (Baker Hughes) 2BCL456, приводы ГТУ НК-16-18СТ изготовления Казанского моторостроительного производственного объединения, САУ – НПФ «Система Сервис».





Повышение эффективности работы КВОУ газовых турбин

- Проектирование
- Инжиниринг
- Сервис



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

Опыт эксплуатации газоперекачивающих агрегатов ГПА-32 «Ладога»

Ю. В. Зуева – главный специалист отдела развития конструкторской подготовки производства, j.zueva@gehia.ru

И. Ю. Кляйнрок, к.т.н. – начальник управления по развитию производства, i.kleinrock@gehia.ru

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

Ключевые слова:

газоперекачивающий агрегат, газотурбинная установка, центробежный компрессор, эксплуатация, устранение неисправностей

Аннотация

Агрегат ГПА-32 «Ладога» производства АО «Невский завод» – газоперекачивающий агрегат для объектов добычи и транспортировки природного газа. Заложенные в конструкцию агрегата технические решения отрабатывались в ходе эксплуатации. На основе опыта эксплуатации и технического обслуживания ГПА проведен анализ неисправностей, внедрены мероприятия по повышению надежности и улучшению конструкции агрегатов.

Систематизация и анализ неисправностей систем агрегата выполнены на основе актов

дефектации, отчетов, замечаний от эксплуатирующих организаций, а также результатов планового технического обслуживания. В итоге были определены основные узлы ГПА-32 «Ладога», наиболее подверженные отказам в процессе эксплуатации агрегата на газотранспортных объектах РФ.

Для всех неисправностей разработан и реализован ряд мероприятий по совершенствованию конструкции и повышению надежности работы ГПА-32 «Ладога», включая переход на применение компонентов собственного изготовления.

Operational experience of gas pumping unit GPU-32 Ladoga

Y.V. Zueva – Main Specialist of Design Preproduction Development Department, j.zueva@gehia.ru

I.Y. Kleinrock, Ph.D. in Engineering Science – Head of the Production Development Department, i.kleinrock@gehia.ru

**A.Y. Kultyshev, Ph.D. in Engineering Science – Deputy of Chief Executive Officer – Chief Technical Officer, al.kultyshev@gehia.ru
Gazprom energoholding industrial assets LLC**

Key words:

gas pumping unit, gas turbine plant, centrifugal compressor, operation, fault repair

Abstract

GPU-32 Ladoga is a gas pumping unit manufactured by JSC Nevskiy zavod for natural gas production and transportation facilities. Technical solutions implemented in a unit design were worked out during operation. Based on the GPU operational and maintenance experience a malfunction analysis was performed and measures to improve the design and reliability of the units are implemented.

The GPU malfunction analysis and systematization were made based on fault detection statements, reports and letters from operating

organizations as well as on results of scheduled maintenance. The assembly units of GPU-32 Ladoga which are the mostly affected by failures during the operation on domestic gas transportation facilities were determined based on analysis results.

A number of measures to improve the design and to increase the operational reliability of GPU-32 Ladoga, including replacement with the components of own production, have been developed and realized considering all of the revealed malfunction.

Агрегат ГПА-32 «Ладога» производства АО «Невский завод» (далее НЗЛ) – это современный высокоэффективный агрегат, разработанный для объектов добычи и транспортировки природного газа по магистральному газопроводу. ГПА создан на основе газотурбинной установки типа Т32 (локализованная ГТУ типа MS5002E итальянской компании Nuovo Pignone) и линейки отечественных нагнетателей природного газа [1].

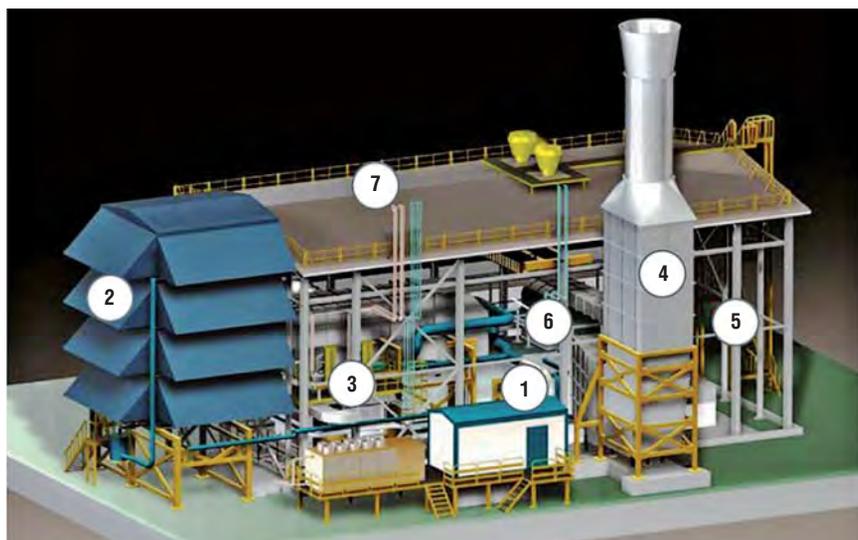
Основное оборудование ГПА размещено в индивидуальном укрытии ангарного типа, часть систем и оборудования выполнены в виде отдельно стоящих блоков наружного размещения. Состав агрегата показан на *рис. 1*.

Первый газоперекачивающий агрегат ГПА-32 «Ладога» с газовой турбиной мощностью 32 МВт введен в эксплуатацию в 2011 году. На тот момент на зарубежных объектах в эксплуатации находилась всего одна ГТУ такого типа, поэтому технические решения, заложенные в ее конструкцию, предстояло отработать в ходе эксплуатации агрегатов.

В последующий период 2012–22 гг. Невский завод довел серийное производство агрегатов до 10 единиц в год. Была расширена доля применяемых отечественных компонентов и вспомогательного оборудования, а также внедрены мероприятия по повышению надежности и улучшению конструкции агрегатов на основе опыта, полученного в ходе эксплуатации и технического обслуживания ГПА на газотранспортных объектах РФ [2].

В настоящее время предприятием изготовлено и поставлено на объекты газотранспортной сети России более 80 газоперекачивающих агрегатов ГПА-32 «Ладога». Суммарная наработка парка установленного оборудования превышает 900 тыс. часов. Значительное количество установленного оборудования, с одной стороны, характеризует ГПА-32 «Ладога» как надежный и востребованный агрегат, с другой стороны – позволяет НЗЛ проводить систематизацию и статистический анализ неисправностей, на основе чего разрабатывать дальнейшие мероприятия по совершенствованию конструкции и повышению надежности агрегата.

Систематизация и анализ неисправностей с целью совершенствования конструкции выполняются на основе актов дефектации, отчетов, замечаний от эксплуатирующих организаций, а также результатов планового технического обслуживания агрегатов. Под неисправностями понимаются не только отказы, приведшие к вынужденному (аварийному) останову агрегата, но и любые другие несоответствия конструкции, выявленные в ходе



планового технического обслуживания или нормальной эксплуатации агрегата.

Всего за период с 2017 по 2022 гг. предприятием проработано более 1300 несоответствий конструкции ГПА-32 «Ладога». По каждой неисправности НЗЛ разрабатывал мероприятия по их предотвращению, вносились изменения в конструкцию, технологию изготовления и эксплуатации агрегата, проводилась замена поставщиков материалов и вспомогательного оборудования в случае неудовлетворительного качества поставляемой продукции. На *рис. 2* показано распределение неисправностей по системам ГПА за период с 2017 года по 2022-й.

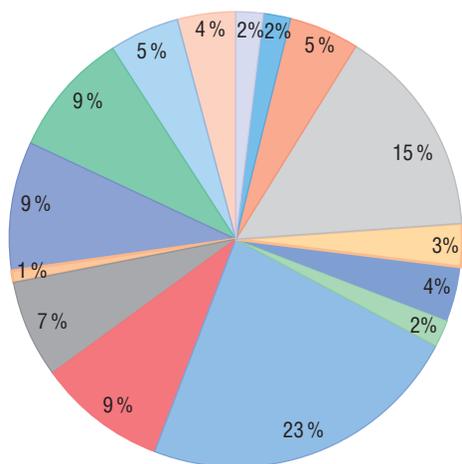
Анализ неисправностей ГПА-32 «Ладога» показал, что наибольшее количество несоответствий приходится на самый технологически сложный компонент – газотурбинную установку (44 % от общего числа). Неисправности в системах ГТУ устранялись путем изменений в конструкции и заменой поставщиков.

На втором месте по доле отказов находятся вспомогательные агрегатные системы (25 % от общего числа), большое количество которых приобретает у сторонних производителей, с отсутствием возможности достоверного входного контроля на всех этапах их производства.



Рис. 1.
ГПА-32 «Ладога» в ангарном укрытии:
1 – газотурбинная установка типа Т32;
2 – система всасывания в составе воздухозаборной системы;
3 – система вентиляции и охлаждения ГТУ в составе воздухозаборной системы;
4 – система выхлопа;
5 – нагнетатель природного газа;
6 – комплексная система автоматического управления;
7 – индивидуальное укрытие ангарного типа

Рис. 2.
Распределение отказов по системам ГПА за 2017-2022 гг.



- Пусковая система
- Осевой компрессор
- Кожух шумотеплоизолирующий
- Маслосистема гидравлического масла
- Пожаротушение и загазованность
- Цикловой воздух
- Турбина ВД
- КИП и регулирование
- Топливный газ
- Выхлопная система
- Камера сгорания
- Турбина НД
- Маслосистема смазки
- Продувочный воздух
- Вентиляция турбоблока

Рис. 3.
Распределение отказов по системам ГТУ

В таких случаях либо заменяют поставщика, либо повышают требования к входному контролю, в том числе с проведением дополнительных испытаний.

На комплексную систему автоматизированного управления (КСАУ) ГПА приходится 16 % отказов. Отказы по системе управления, как правило, обусловлены потерей или искажением передаваемых сигналов, вызванных сбоем оборудования (платы, шины передачи данных) или программы. С целью повышения надежности работы КСАУ предприятие разработало собственную систему управления на отечественной элементной базе ГК «Текон». Применение КСАУ собственного изготовления позволяет уменьшить число неисправностей за счет повышенного контроля всех этапов разработки программного обеспечения и производства оборудования.

На работу центробежных компрессоров (ЦБК) в составе ГПА приходится 15 % всех отказов. При этом неисправности обычно проявляются после существенной наработки компрессора и устраняются в ходе планового технического обслуживания.

На ежегодную статистику неисправностей существенно влияет наработка оборудования, поскольку некоторые неисправности начинают проявляться лишь с течением времени (наработку свыше 24 000 часов имеют только 24 агрегата). Дополнительно на статистику оказывает влияние применение нового локализованного оборудования, особенности эксплуатации конкретного ГПА, а также индивидуальные технические решения, внедряемые по требованию заказчика. На рис. 3 представлено распределение учетных отказов по системам газотурбинной установки. Наибольший процент неисправностей ГТУ приходится на выхлопную систему (23 %) и камеру сгорания (15 %). Причинами неисправностей выхлопной системы, как правило, являются:

- продувы через фланцы выхлопного патрубка, которые вызывают аварийный подъем температуры в отсеке муфты и локальный перегрев трасс кабелей КИП (рис. 4);
 - коробление (деформация) стенок патрубка после 6 000 часов эксплуатации (рис. 5);
 - обрыв кабелей термопар (рис. 6), нарушение кабельных вводов и контактов в клеммных коробках, установленных на выхлопном патрубке, отказ самих датчиков.
- С целью снижения случаев отказов по неисправностям выхлопной системы ГТУ реализован комплекс мероприятий, включающий:
- перепротяжку и замену крепежа фланцев выхлопного патрубка;
 - установку дополнительной изоляции на фланцы выхлопного патрубка в местах возможных продувов;
 - увеличение количества крепежа фланцевого разъема выхлопного патрубка для устранения продувов горячих газов;
 - изменение закрепления клеммных коробок для снижения вибрации с применением специальных кронштейнов с полками для укладки кабелей термопар;
 - установку заводских распорок в боковой и верхней частях патрубка;

Рис. 4.
Схема выдува изоляции из патрубка

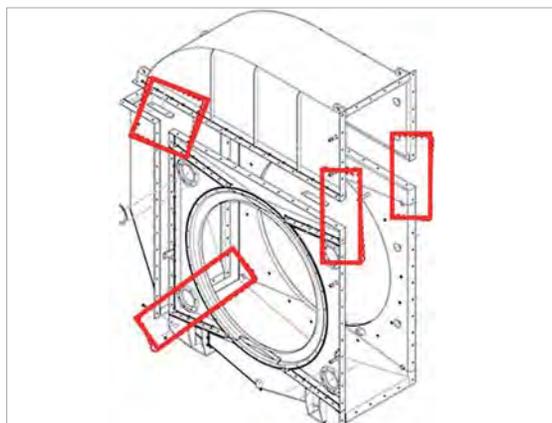


Рис. 5.
Коробление в верхней части выхлопного патрубка





Рис. 6.
Обрыв термопары
на выхлопе ГТУ



Рис. 7.
Засорение форсунки
картриджного типа

■ замену термопар иностранного производства на отечественные, с изменением их длины для уменьшения скруток.

Большая часть отказов камеры сгорания связана с остановами, вызванными аномально высоким разбросом температур на выхлопе, и с выявленными при последующих бороскопических осмотрах дефектами.

Аварийный останов по причине неравномерности температур на выхлопе газовой турбины обычно происходит при переходе из диффузионного режима работы камеры сгорания в режим «премикс» и обратно. Кроме указанных причин, на ранних этапах эксплуатации парка газоперекачивающих агрегатов ГПА-32 «Ладога» часть остановов была вызвана некорректной работой алгоритмов управления турбины. В дальнейшем такие случаи учтены при корректировке и обновлении программного обеспечения.

Неравномерность температуры газа на выхлопе является следствием неравномерного расхода топливной смеси через отдельные форсунки. В ранних модификациях газовой турбины применялись форсунки с картриджем пассивной продувки. В них изменение расхода происходило из-за изменения зазора между наконечником картриджа и центральным отверстием в торце форсунки вследствие механического износа или деформации (рис. 7).

Неравномерные зазоры в наконечнике с картриджем приводили к трению, износу стенок и конечному разрушению (обрыву) картриджа и повреждениям форсунки. Восстановление штатного зазора обеспечивалось путем подбора и замены изношенных картриджей и форсунок.

С целью предотвращения данных неисправностей разработана новая форсунка – без центрального отверстия под картридж продувки, с фланцем, выполненным цельным с частью ее корпуса. С применением форсунок без картриджа отказы камер сгорания из-за неравномерности температуры выхлопа значительно сократились.

Наибольшая доля неисправностей по системам нагнетателя приходится непосредственно на ЦБК (35%), его систему регулирования и КИПиА (34%) и сухие газодинамические уплотнения (20%). На рис. 8 представлено распределение неисправностей по системам нагнетателей природного газа.

Причины отказов данных систем:

- неисправности системы регулирования и КИПиА (неисправности в работе противопомпажной системы, дефекты датчиков давления и температуры газа, вибрации, осевого сдвига, скорости вращения и температуры подшипников);
- неисправности сухих газодинамических уплотнений (отказы самих уплотнений и их обвязки по причине загрязнения и износа);
- повреждения сменной проточной части ЦБК: трещины в местах сварки лопаток диффузора, обрыв крепежа элементов проточной части (рис. 9, 10).

Устранение неисправностей по системе управления, КИПиА и СГУ осуществлялось за счет корректировки цепочки поставщиков покупных изделий, а также путем перехода на СГУ собственного изготовления.

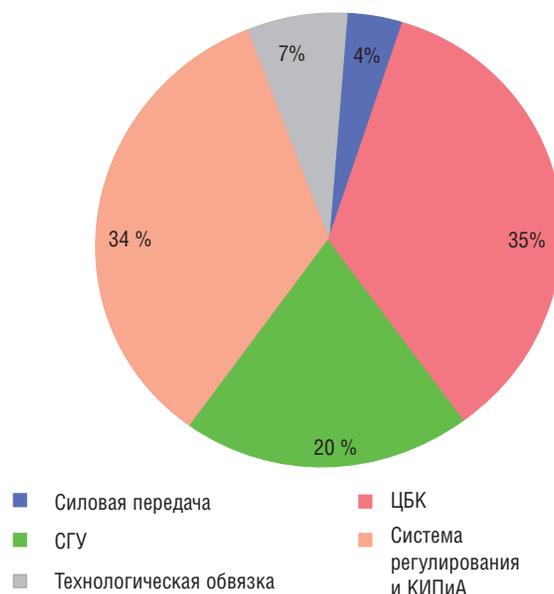


Рис. 8.
Распределение отказов
по системам нагнетателя

Рис. 9.
Трещина на лопатке
диффузора 1-й ступени



Рис. 10.
Места обрыва крепежа
диффузора 2-й ступени



Ремонт трещин и отрывов лопаток диффузора производится сваркой согласно ремонтной документации. Для новых диффузоров и запасных частей изменена разделка под сварной шов, увеличен катет шва до 5 мм и его протяженность. Дополнительно внесены изменения в технологию сборки и разборки пакета ЦБК с исключением крепежа нагнетательной части и диффузора 2-й ступени между собой.

В части распределения отказов по КСАУ ГПА наибольшая доля неисправностей (59 %) приходится на электропитание собственных нужд, что главным образом вызвано дефектами оборудования НКУ. На долю системы управления приходится 41 % всех неисправностей, они связаны с потерей или искажением передаваемых сигналов, вызванных сбоем оборудования (платы САУ, шины передачи данных) или программы. Большая часть аппаратных сбоев приходится на электронное коммутационное оборудование, обеспечивающее передачу и обмен данными. Распределение неисправностей по КСАУ ГПА представлено на рис. 11.

Для устранения данных проблем были приняты следующие решения:

- смена поставщика элементной базы шкафа бесперебойного питания;
- ужесточение процедуры контроля и обоснование принятых изготовителем конструктивных решений, согласование применяемой элементной базы НКУ;
- разработка и применение собственной КСАУ на отечественной элементной базе.

Распределение неисправностей по агрегатным системам ГПА представлено на рис. 12 – из приведенной диаграммы видно, что наибольшее их число возникает в системе подготовки буферного и топливного газа. Среди основных неисправностей можно выделить отказы регулирующих и стравливающих (свечных) клапанов топливного газа. В связи с этим для устранения несоответствий были применены:

- точная настройка ПИД-регулятора и привода клапана в случае необходимости большого снижения давления топливного газа;
- корректировка технического задания и замена клапанов.

Большое количество несоответствий по системам жизнеобеспечения ангара связано с неисправностями и отказами системы вентиляции вследствие применения упрощенных конструктивных решений, не обеспечивающих надежность эксплуатации. Для предотвращения подобных неисправностей на Невском заводе проводились тщательные проверки документации поставщиков на предмет надежности используемых конструктивных решений до ее согласования и запуска в производство.

Рис. 11.
Распределение отказов
по КСАУ ГПА

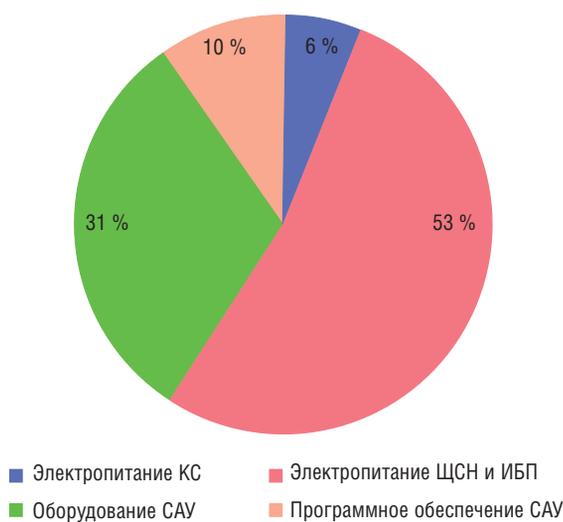


Рис. 12.
Распределение отказов
по агрегатным системам ГПА



Также можно выделить единичные нарекания к работе одного из маслоохладителей системы маслоснабжения ЦБК. В летнее время температура на выходе была больше предупредительной уставки +55 °С. В качестве технического решения, на основании проведенных расчетов, было предложено заменить установленный аппарат аппаратом с повышенной тепловой мощностью.

Несоответствия в системе подготовки воздуха, в первую очередь, были связаны с разработкой и некачественным изготовлением оборудования блочных компрессорных установок. Сокращение числа несоответствий в последующих ГПА достигнуто путем корректировки технического задания на систему инструментального воздуха и усилением контроля выполнения требований поставщиком.

Кроме мероприятий по совершенствованию конструкции ГПА-32 «Ладога», Невский завод завершает работу по локализации основного и вспомогательного оборудования газовой турбины Т32. На сегодня использование отечественных технологий, изделий и материалов превышает 75 % – до конца 2024 года планируется достичь 100 %-й локализации [3, 4].

Выводы

1. Определены основные узлы ГПА-32 «Ладога», наиболее подверженные отказам в процессе его эксплуатации на газотранспортных объектах РФ.

2. Реализован ряд мероприятий по совершенствованию конструкции и повышению надежности работы ГПА-32 «Ладога». **□**

Список литературы

1. Леонтьев Р. А., Прыгаев И. Ю., Спиринов В. В., Яковлев А. В. Новая разработка ЗАО «РЭП Холдинг» – модернизированная установка ГТ 32РП «Ладога» // Турбины и дизели. – СПб.: 2010. – ноябрь-декабрь 2010 – С. 34-38.

2. Култышев А. Ю., Симутин К. В. Долгосрочное техническое обслуживание агрегатов ГПА-32 «Ладога» // Турбины и дизели. – СПб.: 2022. – май-июнь 2022 – С. 18-20.

3. Кляйнрок И. Ю., Гилев К. О., Юн В. К. Состояние и развитие газотурбинных технологий Невского завода // Научно-технические проблемы полной локализации производства и технического обслуживания стационарных газотурбинных установок в РФ. – СПб.: 2022. – С. 7-12.

4. Попков А. Н., Ильин С. Б., Прыгаев И. Ю. Локализация производства газотурбинной установки MS5002E по лицензии General Electric // Газотурбинные технологии. – СПб.: 2013. – сентябрь 2013 – С. 2-7.

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

Выбор отечественного жаропрочного сплава для камеры сгорания газовой турбины Т32

В. В. Клепалов¹ – специалист, slava.klepalov841@mail.ru
М. Ю. Егорушков¹ – главный эксперт, egorushkovm@rambler.ru
Ф. М. Андреев² – главный специалист, f.andreev@reph.ru
В. М. Дручок² – руководитель группы, v.druchok@reph.ru
ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»¹
АО «Невский завод»²

Ключевые слова:

локализация,
термоциклическая
усталость,
малоцикловая
усталость,
камера сгорания,
газовая турбина

Аннотация

Статья посвящена определению критериев при выборе материалов, освоенных в производстве отечественной металлургии, для применения в конструкции локализуемой камеры сгорания газовой турбины Т32 взамен оригинального сплава марки AMS 5872. Оценка материалов и критериев для замены выполнялась на теплонапряженных частях КС – жаровая труба и переходная секция от жаровой трубы к турбине высокого давления. От объективно обоснованного выбора материала зависит надежность и длительность эксплуатации камеры сгорания, что напрямую влияет на ресурсные показатели ГТУ Т32 в целом. Зарождение трещин, их развитие и последующее разрушение деталей из жаропрочных сплавов в КС чаще всего происходит под

воздействием термоциклических нагрузок. Появление термоциклических трещин в элементах КС является основной причиной возникновения очагов начала разрушения, инициирующих дальнейшее развитие трещин от воздействия статических или циклических усилий.

Проведен анализ механических свойств и сортамента отечественных жаропрочных сплавов для замены оригинального сплава AMS 5872. Выполнены итерационные расчеты с помощью уравнений Мэнсона и Коффина для определения термоциклической устойчивости жаропрочных сплавов. По итогам исследования определены критерии прочностной оценки и выбран оптимальный отечественный жаропрочный сплав в качестве альтернативы оригинальному сплаву.

Choice of domestic heat-resistant alloy for the T32 gas turbine combustion chamber

V. V. Klepalov¹ – Specialist, slava.klepalov841@mail.ru
M. I. Egorushkov¹ – Chief Expert, egorushkovm@rambler.ru
F. M. Andreev² – Chief Specialist, f.andreev@reph.ru
V. M. Druchok² – Group Leader, v.druchok@reph.ru
Gazprom energoholding industrial assets LLC¹
Nevsky zavod JSC²

Key words:

localization,
thermal cycling
fatigue,
low-cycle fatigue,
combustion chamber,
gas turbine

Abstract

The article is devoted to the determination of evaluation criteria for the selection of materials mastered in the production of domestic metallurgy for use in the design of the localized combustion chamber of the T32 gas turbine instead of the original AMS 5872 grade alloy. The evaluation in the selection of materials and criteria for replacement was carried out on such heat-stressed parts combustion chambers as a combustion liner and a transition piece from the combustion chamber to the high-pressure turbine. The reliability and duration of operation of the combustion chamber depends on the objectively justified choice of material, which directly affects the resource indicators of the T32 gas turbine as a whole. The initiation of cracks, their development and subsequent destruction of parts

made of heat-resistant alloys in combustion chambers most often occurs under the influence of thermal cyclic loads. The appearance of thermal cracks is the main cause of the occurrence of centers of the onset of destruction, initiating further development of cracks from the impact of static or cyclic forces.

An analysis of the mechanical properties and assortment of domestic heat-resistant alloys was carried out to replace the original AMS 5872 grade alloy. Iterative calculations were performed using the Manson and Coffin equations to determine the thermocyclic stability of heat-resistant alloys. Based on the results of the study, the strength assessment criteria were determined and the optimal domestic heat-resistant alloy was selected as an alternative to the original grade alloy.

В газовых турбинах, использующих в своем рабочем цикле сжигание природного газа для получения полезной механической энергии независимо от ее дальнейшего использования, наиболее термически нагруженным узлом является камера сгорания, в которой протекают сложные процессы горения для получения потенциальной энергии, передаваемой на турбину. Камера сгорания представляет собой высоконагруженный компонент газовой турбины, работающий при температурах до 2000 °С и генерирующий температуру перед турбиной высокого давления более 1000 °С. Экономичность и долговечность камеры сгорания напрямую влияет на технико-экономические показатели газовой турбины в целом. Рост требований к экономичности, экологичности КС, развитие технологий требует постоянного увеличения параметров газа в рабочем цикле и, как следствие, совершенствования конструкции камер сгорания.

Один из значимых расчетных прочностных показателей горячих частей газовой турбины – это способность деталей сопротивляться переменным термоциклическим нагрузкам, возникающим в рабочем цикле в зависимости от режимов работы газовой турбины. Поэтому особое внимание при выборе материала уделяется расчетному исследованию на малоцикловую усталость (МЦУ).

В оригинальной конструкции камеры сгорания газовой турбины Т32 используется зарубежный жаропрочный сплав марки AMS 5872, который необходимо заменить отечественным аналогом, освоенным в производстве отечественной металлургической промышленности. Для расчетной оценки выбираются жаровая труба и переходная секция камеры сгорания, в конструкции которых используется сплав марки AMS 5872. Критерием для выбора замены послужит расчетная МЦУ с учетом эксплуатационных ограничений, температурного состояния, полученных прочностных запасов и механических свойств материалов.

Влияние малоцикловой усталости на элементы камеры сгорания

С ростом параметров рабочего тела в камере сгорания интенсифицируется процесс теплопередачи от рабочей среды к деталям и увеличивается теплонапряженность – это приводит к тому, что в общем числе повреждений деталей, вызываемых статическими, циклическими, ударными и другими видами усилий, возрастает относительная доля повреждений от термоциклических нагрузок [1].



Рис. 1.
Трещины жаровой части
камеры сгорания
под воздействием МЦУ

Риск развития дефектов деталей камеры сгорания увеличивается с ростом температур рабочего газа и эксплуатационных нагрузок, ухудшение технического состояния деталей возрастает от термоциклических нагрузок. На рис. 1 и 2 показано влияние малоцикловой усталости на элементы камеры сгорания [2].

Расчетная оценка термоциклической усталости

Жаропрочный сплав марки AMS 5872 на основе никеля известен своей уникальной прочностью, долговечностью и коррозионной стойкостью [4] – он широко используется в аэрокосмической, атомной и нефтегазовой промышленности в зарубежных странах. Сплав обладает следующими механическими свойствами: предел текучести 550 МПа, предел прочности на разрыв 930 МПа, относительное удлинение 35 % при рабочей температуре материала (без значительной потери прочности) до 1093 °С.

Выбор отечественного материала для использования в конструкции жаровой трубы и переходной секции камеры сгорания газовой турбины Т32 взамен сплава марки AMS 5872 должен обеспечивать эксплуатационные требования по положительной наработке и интервалам технического обслуживания не ниже, чем при использовании оригинального материала.



Рис. 2.
Трещины в зоне концентрации
напряжений переходного
патрубка стационарной ГТУ
под воздействием МЦУ

Интервал технического обслуживания					
Частота запусков	выше 0,1	0,0625	0,037	0,018519	ниже 0,005
Средний ремонт №1 ТО-12000					
Часы	600 запусков	7500	9000	10500	12000
Средний ремонт №2 ТО-24000					
Часы	1200 запусков	15000	18000	21000	24000
Капитальный ремонт блока газогенератора 1 ТО-48000					
Часы	2400 запусков	30000	36000	42000	48000
Капитальный ремонт силовой турбины ТО-72000					
Часы	2400 запусков	48000	54000	63000	72000

Табл. 1.

Интервал технического обслуживания газовой турбины Т32

Общий вид камеры сгорания с жаровой трубой и переходной секцией представлен на рис. 3. Для расчетов при выборе материала рабочие циклы N_n в первом приближении принимаются в количестве 2400, что соответствует интервалам технического обслуживания при максимальной частоте пусков (табл. 1) для первого и второго капитальных ремонтов.

Для решения поставленной задачи по замене сплава подбирались близкие по своему химическому составу и механическим свойствам отечественные жаропрочные сплавы. Варианты подбирались из возможных жаропрочных сплавов, имеющих в ассортименте металлургической промышленности, для дальнейшего выполнения расчетной оценки термоциклической прочности с учетом экономической целесообразности.

В качестве альтернативы сплаву марки AMS 5872, рассмотрены отечественные жаропрочные сплавы марок ХН77ТЮР, ХН62ВМКЮ, ХН60ВТ. Сплав марки ХН77ТЮР [5] используется для изготовления лопаток газовых турбин, колец, дисков, отводов и фланцев, пружинной проволоки для цилиндрических пружин расширения и сжатия, рабочая температура металла до 800 °С. На рис. 4–6 представлены изменения основных свойств сплава марки ХН77ТЮР в зависимости от температуры.

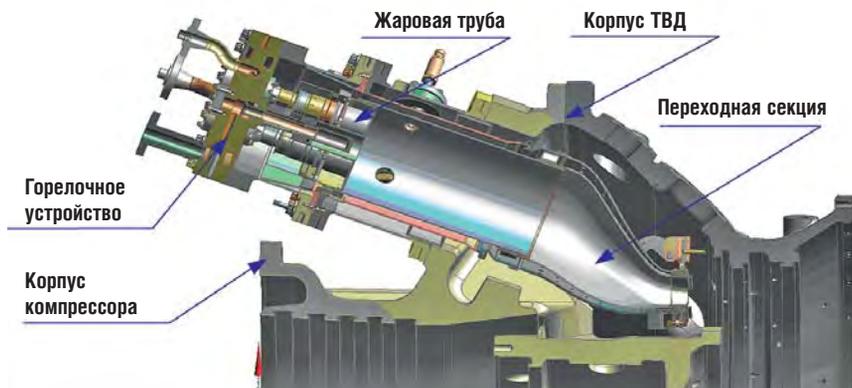


Рис. 3. Общий вид камеры сгорания ГТУ Т32

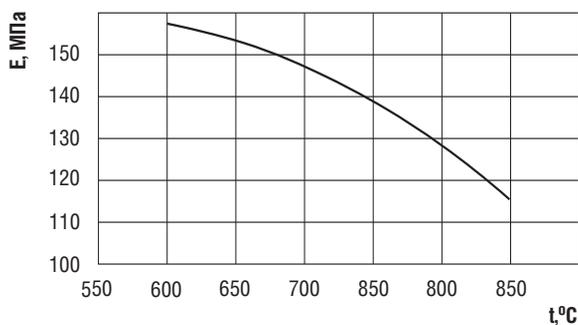


Рис. 4. Изменение модуля упругости сплава марки ХН77ТЮР в зависимости от температуры

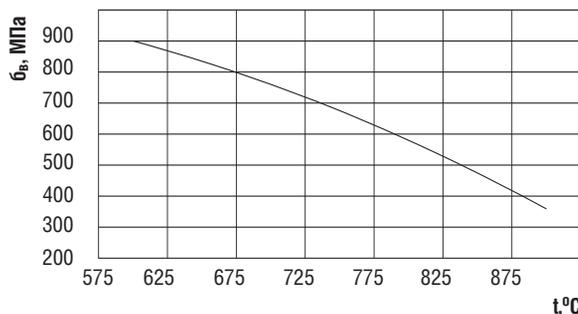


Рис. 6. Изменение предела прочности сплава марки ХН77ТЮР в зависимости от температуры

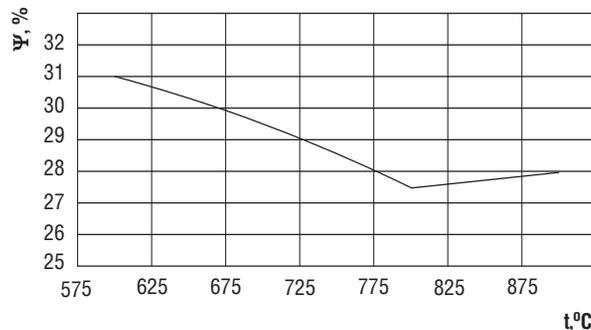


Рис. 5. Изменение относительного сужения сплава марки ХН77ТЮР в зависимости от температуры

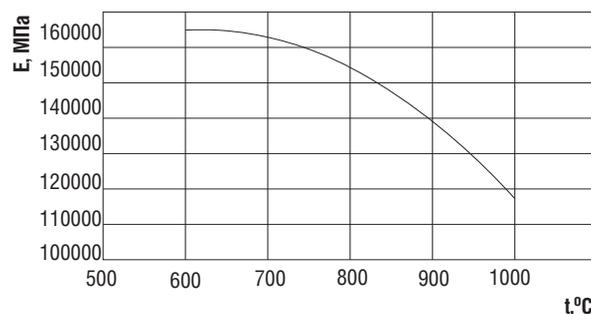


Рис. 7. Изменение модуля упругости сплава марки ХН62ВМКЮ в зависимости от температуры

Сплав марки ХН62ВМКЮ [6] применяется для производства деталей авиационного и энергетического машиностроения. Рабочая температура сплава до 900 °С. На рис. 7–9 показано изменение основных свойств сплава марки ХН62ВМКЮ в зависимости от температуры.

Сплав марки ХН60ВТ [7] относится к классу высоколегированных жаропрочных сплавов и широко применяется в различных отраслях промышленности, где требуются материалы, способные выдерживать высокие температуры и агрессивные среды. Рабочая температура сплава до 1100 °С. Изменение основных свойств сплава марки ХН60ВТ в зависимости от температуры показано на рис. 10–12.

Расчет термической усталости

Оценка термической усталости деталей жаровой трубы и переходной секции камеры сгорания выполнялась итерационным методом с использованием уравнения Мэнсона (1) и Коффина (3). Максимальное напряжение цикла σ_m [3] посчитано с помощью формулы (2). Количество циклов до начала развития трещин (N_n) принимается равным 2400 исходя из действующих ограничений инструкции по эксплуатации газовой турбины ТЗ2. Такое допущение обусловлено отсутствием базовых расчетных прочностных характеристик. Стоит отметить, что при расчете максимального напряжения в цикле мы пренебрегаем асимметричным напряжением и используем максимальное напряжение цикла, создаваемое газовым потоком на стенки камеры сгорания.

Несмотря на то что в камере сгорания имеют место несимметричные циклические нагрузки, о чем свидетельствует распределение скорости в переходной секции камеры сгорания, представленные на рис. 13, это не повлияет существенно на количество рабочих циклов. Несимметричное напряжение незначительно влияет на количество рабочих циклов, в случае если максимальное напряжение цикла невелико [1]:

$$\Delta \varepsilon = N_n^{-0.6} * \left[\left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0.6} + \frac{3,5(\sigma_b - \sigma_m)}{E} * N_n^{0.12} \right], \quad (1)$$

где N_n – принятое количество рабочих циклов до разрушения;

ψ – относительное сужение;

E – модуль упругости, МПа.

$$\sigma_m = \Delta p * \frac{d}{2 * h}, \quad (2)$$

где σ_m – максимальное напряжение цикла, МПа;

Δp – перепад давления, МПа;

d – диаметр, м;

h – толщина стенки, м.

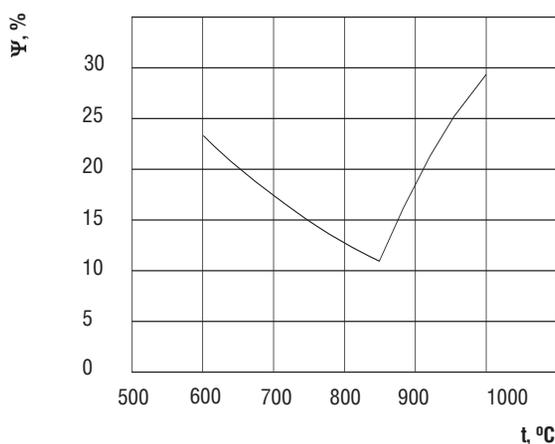


Рис. 8. Изменение относительного сужения сплава марки ХН62ВМКЮ в зависимости от температуры

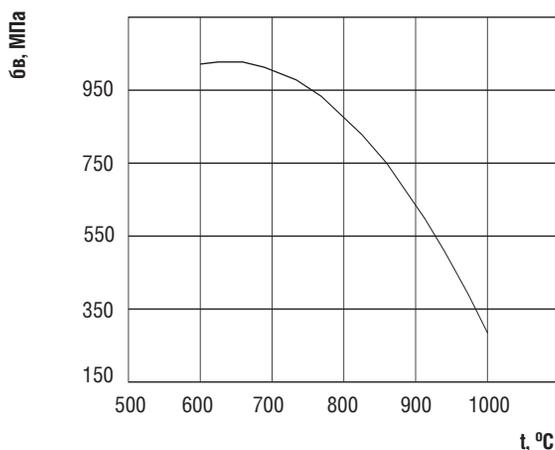


Рис. 9. Изменение предела прочности сплава марки ХН62ВМКЮ в зависимости от температуры

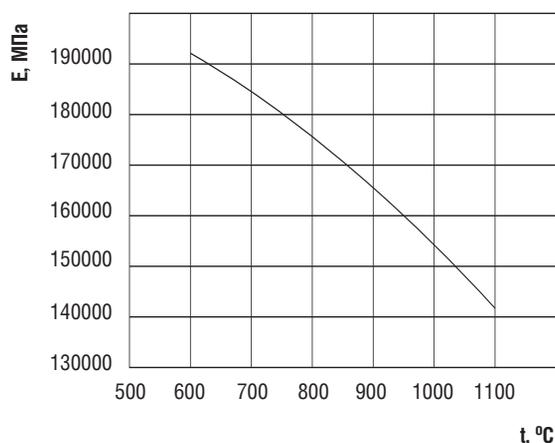


Рис. 10. Изменение модуля упругости сплава марки ХН60ВТ в зависимости от температуры

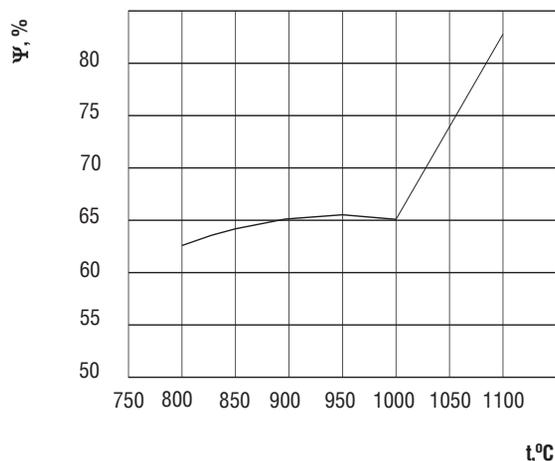
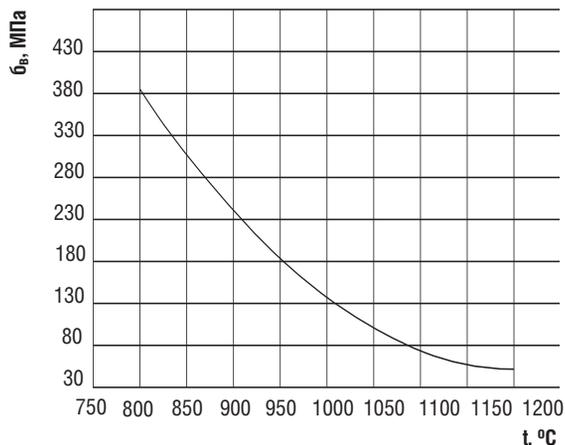


Рис. 11. Изменение относительного сужения сплава марки ХН60ВТ в зависимости от температуры

Рис. 12.
Изменение предела прочности сплава марки ХН60ВТ в зависимости от температуры



С использованием уравнения Коффина (3) построены графики (рис. 14–16), изменения размаха деформации от количества рабочих циклов с использованием эмпирических коэффициентов в зависимости от максимальной температуры [1].

$$\Delta \varepsilon * N^k = C, \quad (3)$$

где k, C — эмпирические коэффициенты; N — расчетное количество рабочих циклов до разрушения.

С использованием уравнения Мэнсона (1) получены расчетные величины максимально допустимого размаха деформации (табл. 2).

Рис. 13.
Распределение скорости в переходной секции камеры сгорания

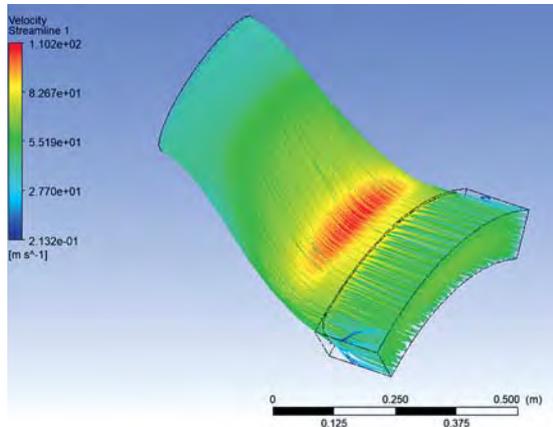
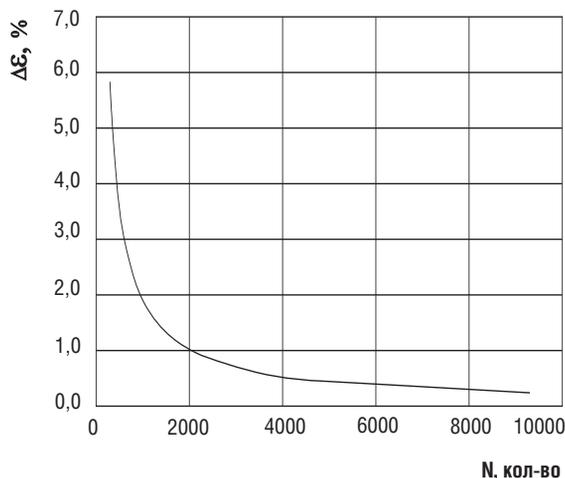


Рис. 14.
Изменение размаха деформации сплава марки ХН77ТЮР в зависимости от количества рабочих циклов



С использованием уравнения Коффина (3) получены расчетные значения термоциклической усталости (табл. 3) с определением количества максимально допустимых циклов для соответствующего материала.

Выполненные расчетные оценки размаха деформации и термоциклической усталости показывают, что каждый из рассматриваемых жаропрочных сплавов имеет коэффициент запаса 4. Это значение принимаем как достаточное для использования этих сплавов в качестве замены сплава марки AMS 5872. Для замены оригинального жаропрочного сплава принимаем сплав марки ХН60ВТ, рабочая температура которого составляет 1000...1100 °С, что соответствует допустимой рабочей температуре заменяемого сплава.

Расчетное максимальное количество циклов для сплава марки ХН60ВТ при коэффициенте запаса (k_n) = 4 составит

$$N_n = \frac{N}{k_n} = \frac{10401}{4} = 2600, \quad (4)$$

что укладывается в принятое допущение по количеству циклов 2400 как ограничение для необходимости выполнения капитальных ремонтов 1 и 2 (табл. 1). Такая сходимость допускает, что коэффициент запаса равный 4 можно принимать как оценочный прочностной критерий. Этот коэффициент запаса, как рекомендуемый, отмечается и в зарубежных источниках [8].

Жаропрочный сплав марки ХН60ВТ является наиболее предпочтительным для использования в конструкции жаровой трубы и переходной секции камеры сгорания газовой турбины Т32 при выполнении локализации производства. Сплав обладает достаточными прочностными характеристиками при высоких температурах, хорошей коррозионной стойкостью и устойчивостью к циклическим нагрузкам. Кроме того, сплав марки ХН60ВТ имеет стоимость ниже по сравнению со сплавом марки AMS 5872.

Выводы

Выполнена оценка влияния различных факторов, которые необходимо учитывать при выборе жаропрочного сплава для использования в конструкции камеры сгорания газовой турбины Т32. В работе использовались такие факторы, как температурные условия, прочностные характеристики, коррозионная стойкость и экономическая эффективность. Выполнен анализ различных жаропрочных сплавов для использования в конструкции камеры сгорания газовой турбины Т32 при локализации ее производства.

На основе проведенного анализа определено, что для камеры сгорания газовой турбины Т32 наиболее подходит жаропрочный сплав марки ХН60ВТ. Он обладает высокой прочностью при высоких температурах, хорошей коррозионной стойкостью и устойчивостью к циклическим нагрузкам.

Критерии и алгоритмы, полученные в результате выполнения работы, в дальнейшем предполагается использовать для оценки прочностных характеристик других высоконагруженных деталей горячего тракта газовой турбины Т32. Также проделанные исследования в дальнейшем предполагается использовать в решении актуальных проблем локализации производства горячих частей газовой турбины Т32. **Д**

Список литературы

1. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термическая усталость металлов. – М.: «Машиностроение», 1980. – 200 с.

2. Боровков В.М. Материалы и прочность оборудования ТЭС. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 611 с.

3. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 477 с.

4. [электронный ресурс] Сплав AMS 5872 Nimonic – состав, свойства и применение // thepipingmart URL: <https://blog.thepipingmart.com/grades/ams-5872-nimonic-alloy-composition-properties-and-uses/> (дата обращения: 16.08.2023).

5. [электронный ресурс] Сплав марки ХН77ТЮР // Центральный металлический портал URL: https://metallcheckiyportal.ru/marki_metallov/stj/ХН77ТЮР (дата обращения: 16.08.2023).

6. [электронный ресурс] Сплав ЭИ867 (ХН62ВМКЮ) жаропрочный на никелевой основе // Справочник инженера URL: <https://inzhenier-info.ru/razdely/materialy/zharoprochnye-stali-i-splavy/splavy-na-nikelevoj-osnove/zharoprochnye/splav-ei867-khn62vmtkyu-zharoprochnyj-na-nikelevoj-osnove.html> (дата обращения: 16.08.2023).

7. [электронный ресурс] Сплав ХН60ВТ // Лаборатория специальной металлургии URL: <http://www.lasmet.ru/steel/mark.php?s=71&ysclid=lks7magjx369106856> (дата обращения: 16.08.2023).

8. Sasan C. Armand. Structural Optimization Methodology for Rotating Disks of Aircraft Engines. – NASA Technical Memorandum 4693. November 1995. – 16 с.

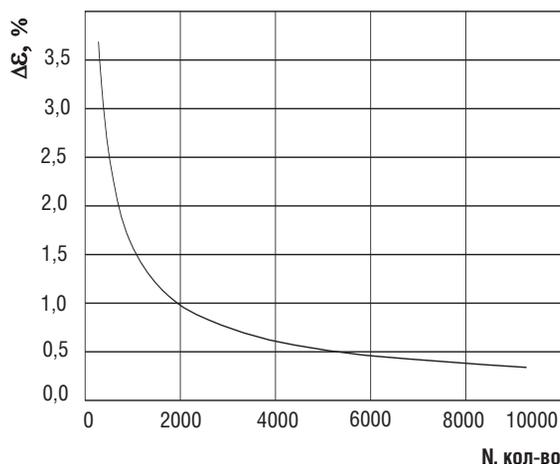


Рис. 15.

Изменение размаха деформации сплава марки ХН62ВМКЮ в зависимости от количества рабочих циклов

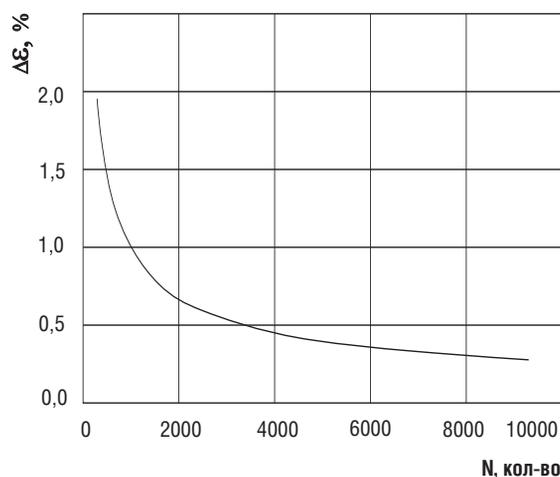


Рис. 16.

Изменение размаха деформации сплава марки ХН60ВТ в зависимости от количества рабочих циклов

Материал	Максимальная температура цикла, t, °С	Максимально допустимый размах деформации, Δε, %
ХН77ТЮР	750	0,71
ХН62ВМКЮ	850	0,64
ХН60ВТ	900	0,53

Табл. 2. Расчетный максимально допустимый размах деформации по уравнению Мэнсона

Материал	Температура цикла, t, °С	Кол-во циклов до образования трещины	Кoeffициент запаса
ХН77ТЮР	750	10676	4,44
ХН62ВМКЮ	800	11191	4,65
ХН60ВТ	900	10401	4,33

Табл. 3. Расчет жаропрочных материалов на термоциклическую усталость

Турбинные масла Taif Rave: успешная эксплуатация в зарубежных ГТУ

И. А. Степанков – ООО «С-Техникс»

ООО «ТАИФ-СМ», первый и единственный в России производитель полиальфаолефиновых масел (ПАОМ), ориентировано на разработку передовых смазочных материалов на российском рынке, способных заменить аналогичные импортные продукты. Предприятие совместно с федеральным дистрибьютором – ООО «С-Техникс» (г. Нижний Новгород) успешно проводит техническую работу по импортозамещению масел, применяемых в динамическом оборудовании зарубежного производства.

In brief

Taif Rave turbine oils: successful operation in foreign gas turbines.

TAIF-SM LLC, the first and the only manufacturer of polyalphaolefin oils in Russia, is focused on the development of advanced lubricants on the Russian market that can replace similar imported products. The company together with S-Technics LLC, successfully carries out technical work on import substitution of oils of foreign production.

Завод «ТАИФ-СМ»

Усовершенствованная техническая и технологическая база завода синтетических масел (бренд Taif Lubricants), а также собственная научно-исследовательская платформа позволили создать в Нижнекамске передовое производство, продукция которого не уступает зарубежным аналогам.

Отличительная особенность «ТАИФ-СМ» – наличие собственного Центра исследований и разработок (R&D). Целью создания Центра стали разработки и корректировки рецептур товарных смазочных материалов и оперативного создания новых продуктов согласно запросам клиентов. Стоит отметить, что подавляющее большинство продуктов, производимых заводом, – собственная разработка Центра исследований. Разработка проводилась в сотрудничестве с признанными мировыми поставщиками присадок, такими как Afton, Lubrizol, Infineum и BASF, а также с научными сотрудниками и выпускни-

ками Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина и Казанского национального исследовательского технологического университета.

Тысячи лабораторных испытаний и успешная эксплуатация подтверждают высокое качество выпускаемых смазочных материалов.

Турбинное масло Taif Rave

Турбинное смазочное масло Taif Rave (минеральное) и Taif Rave PAO (синтетическое) производится на основе отечественных базовых компонентов на заводе в г. Нижнекамске (Татарстан). Турбинное масло серии Taif Rave соответствует требованиям основных производителей газотурбинного оборудования – Siemens Energy, General Electric, Solar Turbines, Ansaldo Energia и др.

По своим физико-химическим и эксплуатационным свойствам турбинные масла Taif Rave являются аналогами масел Mobil DTE, Shell Turbo, Total Preslia GT, Castrol Perfecto, Texaco GST и других.

Турбинные масла ООО «ТАИФ-СМ» производятся только из высококачественного базового сырья 3-й группы по классификации API (Американский институт нефти) и рационально сбалансированного пакета присадок. Физико-химические свойства турбинных масел Taif Rave соответствуют и/или превышают требования производителей оборудования (компрессоры, турбины и т.д.) и обладают отличительными особенностями при сравнении с аналогичными отечественными маслами. К ним относятся:

- высокая окислительная стабильность – длительный срок службы по сравнению с аналогичными продуктами (увеличенный интервал замены, низкие затраты на простой оборудования);
- низкая степень пенообразования и деаэрации – стабильная смазка в гидродинамическом оборудовании (масляный клин) обеспечивает надежность оборудования и защиту от задиров на валу и подшипниках;

№	Характеристики	Единица измерения	Taif Rave PAO 32	Taif Rave PAO 46
1	Класс вязкости	ISO VG	32	46
2	Вязкость при 40 °C	мм ² /с	32	46
3	Индекс вязкости		128	130
4	Плотность при 15 °C	кг/м ³	830	836
5	Температура вспышки	°C	230	234
6	Температура застывания	°C	-58	-57
7	Общее кислотное число, конечный продукт	мг КОН/г	< 0,06	0,08
8	Антикоррозионные свойства		соответствует	соответствует
9	Коррозия медной пластинки		1a	1a
10	Эмульсионные характеристики 40-37-3	мин	20	20
11	Освобождение воздуха до 0,2 %	мин	0,4	1,0
12	Пенообразование при 24 °C	мл	10/0	20/0
13	Остаток пены после 1 мин выдержки	мл	0	0
14	Содержание воды	ppm	отсутствует	отсутствует
15	Содержание цинка	ppm	0	0
16	Стойкость к окислению (TOST)	ч	> 10000	> 10000
17	Окислительная стабильность (RPVOT)	мин	1500	1600
18	Загрязнения	Код ISO; NAS	20/17/14	20/17/14
19	Несущая способность	FZG	12	12

Свойства турбинных масел Taif Rave

- высокие деэмульгирующие свойства – обеспечивают высокую скорость разделения среды вода/масло, что является критическим параметром при работе компрессоров и паровых турбин, где существует риск попадания в систему смазки воды или перекачиваемой среды.

Опыт эксплуатации ГТУ на турбинном масле Taif Rave

ГТУ Siemens Energy (SGT-600, SGT-800, SGT-300)

Турбинное масло Taif Rave 46EP имеет действующий допуск от компании Siemens Energy по спецификации TLV 9013 04/05 и полностью отвечает требованиям SIT AB спецификации MAT 812109 для турбин серии SGT 500/800 (г. Финспонг, Швеция), а также требованиям 65/0027 «Спецификации по текучим средам» компании SIT Ltd (Линкольн, Англия). Парк таких турбин в РФ насчитывает более 100 ед.

Taif Rave 46EP успешно используется в турбинах SGT-600, SGT-800, SGT-300, где был выполнен переход с импортных масел MOL Turbine 46K, Texaco GST EP46, Total Preslia GT46 соответственно. Перевод оборудования на отечественное масло Taif Rave 46EP был выполнен способом полной замены без промывки маслосистемы. На сегодня результаты мониторинга рабочего масла Taif Rave 46EP показывают его высокий эксплуатационный запас срока службы.

ГТУ General Electric (Frame 6FA, LM 2500)

Турбинное масло Taif Rave 32 соответствует требованиям спецификаций General Electric GEK 101941 (серии Frame 6FA), GEK 32568 (серии Frame 9). В России есть успешный опыт перехода ГТУ GE Frame 6FA с импортных масел Total Preslia GT32 на отечественное Taif Rave 32. Общее количество газовых турбин такого типа в России насчитывает около 50 единиц. Также Taif Rave 32 используется в системе смазки генератора Brush в составе газотурбинной установки LM2500+G4, заменив импортное турбинное масло Castrol Perfecto X32. От всех заказчиков получено положительное заключение об эксплуатации ГТУ на отечественном турбинном масле Taif Rave 32 на основании мониторинга эксплуатационного масла в соответствии с требованиями производителя.

ГТУ Solar Turbines (Titan-130, Mars-100, Taurus-60)

Турбинные масла Taif Rave 32 и Taif Rave PAO 32 полностью соответствуют требованиям ES9-224 (Технические условия по выбору смазочного масла для ГТУ Solar Turbines).

На сегодня более 15 установок подобного типа работают на смазочном масле Taif Rave 32 или Taif Rave PAO 32. Несколько конечных потребителей запланировали переход с отече-

Используемые турбинные масла	Производитель	Оборудование	Масло ТАИФ-СМ	Соответствие требованиям производителя
Shell Turbo T46	Siemens	SGT-300	Taif Rave 46EP Taif Rave PAO 46 Полная совместимость	Fluid Specification report 65/0027
Mobil DTE 846		SGT-400		MAT 812109
Castrol Perfecto X46		SGT-600 SGT-800		TLV 9013 04/05
Texaco GST EP46		SGT5-2000E		
MOL Turbine 46K		SGT5-4000F		
Shell Turbo S4 GX46				
Total Preslia GT46	GE/Alstom	GT13E2		Alstom HTGD 90 117 V0001 X
Tal Preslia GT32	GE	Frame 6	Taif Rave 32 Taif Rave PAO 32 Полная совместимость	GEK 101941
Mobil DTE 832		Frame 9		GEK 32568; GEK 28143
Shell Turbo T32	Solar	Titan-130		Solar Turbines ES9-224
Shell Turbo S4 GX32		Mars-100 Taurus-60		
ENI OTE GT32				
Mobil SHC 824 (ПАО)	Ansaldo	AE64.3A		
	Kawasaki	GPB70		-

ственных масел типа ТП-22с на масла Taif Rave PAO 32 в связи с техническими особенностями эксплуатации ГТУ в условиях пониженных температур.

Преимущества использования турбинных масел Taif Rave:

- подтвержденная эксплуатационная надежность;
- низкий потенциал к отложению шлама и лака за счет высокой степени окислительной стабильности;
- превосходные свойства деаэрации и низкого пенообразования;
- экономическая и стратегическая целесообразность (стоимость отечественного продукта ниже на 70...100 % по сравнению с импортными продуктами), гарантийные обязательства;
- постоянное наличие на складе, доставка в аварийных ситуациях в течение одного рабочего дня.

Выводы

На данный момент общая наработка турбинных масел Taif Rave составляет более 30 тыс. часов. За все это время оборудование штатно работает в заданных режимах без отклонений. Турбинные масла Taif Rave отвечают заявленным требованиям производителей ГТУ как по физико-химическим свойствам, так и по эксплуатационным показателям. Все эти факты говорят о том, что современные турбинные масла Taif Rave в полной мере способны заместить импортные масла Mobil, Shell, Total и др., не снижая технической надежности оборудования. 

Аналоги импортных турбинных масел

ООО «С-Техникс» – официальный дистрибьютор компании «ТАИФ-СМ» по энергетике:
www.stechnics.ru
 т. 8-800-55-00-662,
 т. моб. 8-929-047-30-31
mail@stechnics.ru



Производственные возможности АО «Газэнергосервис» по ремонту и изготовлению составных частей ГТД и ГПА

Р.В. Алдохин – ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»
П.Е. Дрягин – АО «Газэнергосервис»

Ключевые слова:

газоперекачивающий агрегат, локализация, плазменное напыление, капитальный ремонт агрегатов, динамическая балансировка гибких роторов, запасные части, газотурбинные установки, исследования, импортонезависимость, лопатки ГТД

Аннотация

Компания «Газэнергосервис», с 2021 года входящая в группу «Газпром энергохолдинг индустриальные активы», занимает ведущие позиции в области производства запасных частей для импортных и отечественных газоперекачивающих агрегатов, а также ремонта узлов ГПА, газотурбинных установок и двигателей в заводских условиях.

В состав компании, образованной в 1993 году, в результате реструктуризации активов государственного предприятия «Союзгазификация», сегодня входят машиностроительные предприятия и сервисные подразделения, специализирующиеся на изготовлении широкого спектра оборудования, запасных частей и осуществляющие ремонт, обслуживание и модернизацию отечественных и импортных ГПА, газоперекачивающего оборудования.

Предприятие играет большую роль в реализации программы импортонезависимости ПАО «Газпром». Расширяя номенклатуру выпускаемой продукции и осваивая новые направления деятельности, компания ежедневно вносит свой весомый вклад в развитие отечественной индустрии и обеспечение технологического суверенитета нашего государства.

Сегодня АО «Газэнергосервис» – это четыре филиала и одно обособленное подразделение:

- завод «РТО» в г. Щёкино Тульской области;
- завод «Ротор» в г. Камышине Волгоградской области;
- завод «Турборемонт» в г. Брянске;
- завод «Турбодеталь» им. И.И. Соколовского в г. Наро-Фоминске Московской области;
- конструкторско-технологический отдел АО «Газэнергосервис» в г. Брянске.

Production capabilities of Gazenergoservice JSC for repair and manufacture of components of gas turbines and gas pumping units

R.V. Aldokhin – Gazprom energoholding industrial assets
P.E. Dryagin – Gazenergoservice JSC

Key words:

gas pumping unit, localization, plasma coating, overhaul of units, dynamic balancing of flexible rotors, spare parts, gas turbine plants, researches, import - independence, gas turbine blades

Abstract

The Gazenergoservice company, which has been part of the Gazprom energoholding industrial assets Group since 2021, occupies a leading position in the production of spare parts for imported and domestic gas pumping units, repair of gas turbines and plants.

The company, formed in 1993 as a result of the restructuring of the assets of the Soyuzgazification state enterprise, today includes machine-building enterprises and service units specializing in the manufacture of a wide range of equipment, spare parts, repairs, maintenance and modernization of domestic and imported gas pumping equipment.

The company plays an important role in the implementation of the import-independence program of

Gazprom PJSC. By expanding the range of products and mastering new areas of activity, the company makes a significant contribution to the development of the domestic industry and ensuring the technological sovereignty of our state on a daily basis.

Today, Gazenergoservice JSC consists of four branches and one separate division:

- RTO plant in Shchekino, Tula region;
- Rotor plant in Kamyshin, Volgograd region;
- Turboremont plant in Bryansk;
- Turbodetal Plant named after I.I. Sokolovsky in Naro-Fominsk, Moscow region;
- Design and Technology Department of Gazenergoservice JSC in Bryansk.

Филиал АО «Газэнергосервис» в г. Щекино

Завод «РТО» в Тульской области является старейшим машиностроительным предприятием газовой промышленности РФ [1]. Он был введен в эксплуатацию в декабре 1965 года для обеспечения запасными частями механического оборудования интенсивно развивающейся газовой отрасли СССР.

Сегодня «РТО» – это современное промышленное предприятие, специализирующееся на изготовлении лопаточных аппаратов газоперекачивающих агрегатов отечественного и зарубежного производства из штампованных заготовок и кованой полосы [2].

Для решения задач, связанных с расширением производства и освоением новых изделий, сегодня завод обладает современным металлообрабатывающим оборудованием с ЧПУ иностранного и отечественного производства. На предприятии уделяется большое внимание процессу модернизации и технического переоснащения производственных мощностей.

Система менеджмента качества завода сертифицирована по ГОСТ Р ИСО 9001-2015, сертификат № RUSEXP-RU-000123 от 24.11.2020 г.

Предприятие стремится к максимальному удовлетворению спроса газотранспортных компаний. Номенклатура его изделий ежегодно расширяется и сегодня включает свыше 1000 наименований запасных частей, узлов и оборудования к отечественным и импортным газоперекачивающим агрегатам [3]. Проводится работа по замещению запасных частей импортного производства собственными изделиями.

В номенклатуру предприятия входят запасные части для различного типа газовых турбин:

- рабочие и направляющие лопатки для ГТК-10-4, ГТ-750-6, ГТ-700-5, ГТ-6-750, ГТН-6, ГТН-16, ГТН-25, ГТК-10И, ГТК-25И, «Аврора», «Дон», ДЖ59, ДР59, ДГ90, ДН80, ДУ80, SGT-600 (ГПА «Балтика-25»), Т32 «Ладога», ГТД ТМ-16 (рис. 1, 2);
- промежуточные валы, зубчатые передачи отечественных и импортных ГПА;
- винты масляных насосов.

За 58 лет успешной работы завод «РТО» приобрел репутацию надежного поставщика высококачественной продукции, соответствующей лучшим отечественным и зарубежным образцам.

Филиал АО «Газэнергосервис» в г. Камышине

Камышинский завод «Ротор» специализируется на изготовлении запасных частей и ремонте узлов газоперекачивающих агрегатов зарубеж-



Рис. 1.
Пакеты направляющих лопаток осевого компрессора ГТУ

ного и отечественного производства, эксплуатирующихся на значительной части магистральных газопроводов России [4].

В соответствии с инвестиционной программой АО «Газэнергосервис» на заводе происходит обновление станочного парка, осваивается изготовление и ремонт новых изделий. Так, на предприятии осуществляется ремонт следующего оборудования:

- турбоблоков ГТК-10И фирмы GE или Nuovo Pignone, ГТК-10-4 производства НЗЛ (рис. 3);
- узлов газотурбинных установок отечественного и зарубежного производства: ГТК-10-4, ГТ-750-6, ГТ-6-750, ГТК-10И, ГТК-25И, PGT-5, Coberra-182;
- газотурбинных двигателей ДР59, ДЖ59, а также ГТД «Центавр» серии Т-3000; Т-4000; Т-4500; Т-4700;
- турбокомпрессоров ГТТ-3М, ГТТ-12 и нитрозных нагнетателей для химической промышленности;
- нагнетателей отечественного производства Н-235; Н-520; Н-370; Н-196; НЦ-6,3/125-2,2; НЦ-12/56С и др., а также иностранных компаний – Cooper-Bessemer, Nuovo Pignone, Creusot Loire, Ingersoll Rand, Dresser-Rand, Thermodyn, Siemens;
- нагнетателей и мультипликаторов ГПА фирмы Solar Turbine;
- подогревателей топливного и пускового газа ПТПГ-30;



Рис. 2.
Рабочие лопатки турбины ГПА



Рис. 3.
Контрольная сборка турбоблока ГТК-10И

➤ Рис. 4.
Жаровая труба ГТК-25И



➤ Рис. 5.
Плазменное напыление
термобарьерного покрытия
роботом РПН-25

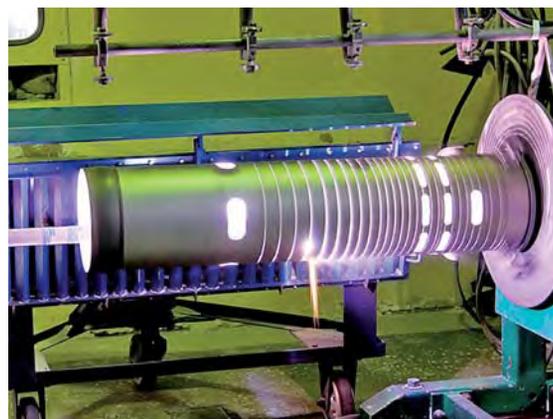
- роторов приводных электродвигателей типа СТД.
Производственные возможности завода позволяют изготавливать:
- элементы камер сгорания (рис. 4), в т.ч. для ГПА ГТК-10И, ГТК-25И, РГТ-10, ГТД ДГ90, ТЗ2 «Ладога» и др.;
- муфты – подводные, стальные, стягивающиеся – для ремонта дефектных участков подводных переходов магистральных трубопроводов Ду325 – Ду1220;
- камеры «Кессон» для осуществления ремонта подводных участков газопроводов;
- фильтры воздушные карманного типа, а также фильтрующие патроны для очистки природного газа;
- спирально-навитые прокладки с асбестовым и графитовым наполнителем.

Завод оснащен необходимым технологическим оборудованием – как универсальным, так и специальным. В процессе производства помимо механической обработки используются различные способы сварки, пайки, термообработки, в том числе и вакуумной, гальваники (включая хромирование, меднение, цинкование). Осуществляется плазменное напыление прирабатываемых покрытий с использованием авиационных порошков АНБ, 20Б, УВС-2П, а также термобарьерных покрытий на основе оксида циркония (рис. 5).

➤ Рис. 6.
Трубы пламеперекидные
(левые и правые)
ГТУ ТЗ2 «Ладога»



➤ Рис. 7.
Ротор нагнетателя ГПА-Ц-16



В настоящее время перед специалистами завода «Ротор» стоит очень ответственная задача – полная локализация изготовления узлов камеры сгорания ГТУ ТЗ2 «Ладога» из ответственных материалов. Комплект узлов камеры сгорания, осваиваемый предприятием, включает пламеперекидные трубы, левые и правые (рис. 6), наружные пламеперекидные трубы, экраны в сборе (направляющие трубы потока), переходные секции, трубы жаровые, крышки камеры сгорания.

На сегодня филиалом изготовлены опытные комплекты левых и правых, а также наружных пламеперекидных труб для проведения эксплуатационных испытаний в составе ГТУ.

Завершается освоение экранов в сборе. Локализация переходных секций, труб жаровых и крышек камеры сгорания будет выполнена в намеченные сроки, в соответствии с программой локализации ГТУ ТЗ2 «Ладога» [5], утвержденной ПАО «Газпром».

Одновременно на заводе полным ходом идет освоение ремонта вышеперечисленных узлов камеры сгорания ГТУ ТЗ2 «Ладога», а также бандажных уплотнений 1-й и 2-й ступеней турбины высокого давления и топливных форсунок.

Освоен ремонт пламеперекидных труб, экранов в сборе (направляющих труб потока), переходных секций, жаровых труб, крышек камеры сгорания. В процессе ремонта были



восстановлены размеры и геометрические параметры, устранены эксплуатационные дефекты, нанесены функциональные покрытия (износостойкие, термобарьерные), а также дефектные компоненты заменены вновь изготовленными (уплотнения Хула, крепеж и пр.). Ремонт производится согласно нормативным документам, а также с учетом термического и динамического воздействия на все компоненты камеры сгорания. Нужно отметить, что ранее ремонт узлов камеры сгорания данного агрегата выполнялся за рубежом.

В настоящее время на предприятии ведется работа по освоению ремонта бандажных уплотнений 1-й и 2-й ступеней турбины высокого давления и топливных форсунок, с изготовлением ответственных комплектующих (внутренние сегменты, диффузионные наконечники, фланцы и др.).

Филиал АО «Газэнергосервис» в г. Брянске

Брянский завод «Турборемонт» специализируется на изготовлении запасных частей и ремонте узлов газоперекачивающих агрегатов отечественного и зарубежного производства, эксплуатируемых на объектах ПАО «Газпром».

Номенклатура запасных частей, которые изготавливает завод, включает:

- сопловые аппараты газовых турбин, в том числе ГТК-10И, ГТК-25И, ГТК-10-4, «Балтика-25», ГТУ Т32 «Ладога», ГТД судового типа (ДН/ДУ80, ДГ90);
- опорные и упорные подшипники скольжения;
- лабиринтные, сотовые уплотнения;
- обоймы, диафрагмы, бандажные сегменты;
- роторы (рис. 7) и рабочие колеса центробежных нагнетателей;
- муфты – подводные, стальные, стягивающиеся – для ремонта дефектных участков подводных переходов магистральных трубопроводов Ду325 – Ду1220;
- крепежные детали.

На предприятии осуществляется восстановление и капитальный ремонт самых различных элементов и узлов ГПА (рис. 8). В этот перечень входят:

- рабочие и направляющие лопатки газовых турбин;
- роторы газовых турбин отечественного и зарубежного производства, в том числе ГТК-10-4, ГТ-750-6, ГТН-16, ГТ-6-750, ГТК-10И, ГТК-25И, PGT-10, ТНМ-1203;
- роторы центробежных нагнетателей;
- корпусные детали, диафрагмы, обоймы направляющих аппаратов;
- пусковые турбины;
- модули свободной турбины агрегата НК-12СТ;



- стационарные газовые турбины типа ГТК-10-4;
- пакеты СПЧ нагнетателей Н-235, СПЧ 7V3;
- теплообменные аппараты;
- подогреватели топливного газа Plenty;
- турбоблоки ГТТЗМ, нагнетатели для химической промышленности.

За время своей деятельности предприятием произведен заводской ремонт свыше 700 роторов турбин ГПА и СПЧ нагнетателей.

С 1994 года на заводе освоен ремонт роторов к импортным газоперекачивающим агрегатам типа ГТК-10И (MS3002) и ГТК-25И (MS 5002) производства фирмы «Дженерал Электрик» (США), центробежных компрессоров PCL 804/36, 1002/40, а также отечественных ГТК-10-4, ГТ-750-6.

На заводе выполняются работы по динамической балансировке гибких роторов с диаметром опорных шеек до 306 мм на низких и рабочих оборотах до 30 000, а также для разгонных испытаний роторов на рабочих оборотах на разгонно-балансировочном стенде Schenck DN6i, оснащенный взрывозащищенной вакуумной камерой [6] (рис. 9).

Помимо основной номенклатуры завод выпускает нестандартное оборудование, оснастку, высокоточный режущий инструмент, коннекторные устройства для ремонта подводных переходов магистральных трубопроводов и др.

Рис. 8.

Ремонт СПЧ 294ГЦ2-750-7-21

Рис. 9.

Разгонно-балансировочный стенд DN6i



➤ Рис. 10.
Координатно-измерительная
машина ACCURA-7



➤ Рис. 11.
Сегмент лопаток
ТНД 2-й ступени
ГТУ Т32 «Ладога»



Завод оснащен необходимым технологическим оборудованием, как универсальным, так и специальным. В процессе производства, помимо механической обработки, используются различные методы сварки, пайки, термообработки, нанесения покрытий.

На предприятии оборудованы лаборатории для проведения механических испытаний материалов, металлографических исследований, созданы центральная заводская и санитарно-промышленная лаборатории. Для высокоточных измерений деталей любой конфигурации применяется координатно-измерительная машина ACCURA-7 фирмы Carl ZEISS (рис. 10).

В настоящее время завод «Турборемонт» наряду с другими филиалами компании выполняет работы по локализации соплового аппарата 1-й и 2-й ступени турбины низкого давления ГТУ Т32 «Ладога». Освоено изготовление сегментов направляющих лопаток ТНД (рис. 11) из отливок, полученных от завода «Турбодеталь» им. И.И. Соколовского – филиала АО «Газэнергосервис».

➤ Рис. 12.
Номенклатура выпускаемых
изделий



Завод «Турбодеталь» им. И.И. Соколовского

Завод «Турбодеталь» в Наро-Фоминске – одно из ведущих предприятий нашей страны, специализирующихся на производстве лопаток газовых турбин из жаропрочных сплавов методом равноосного литья по выплавляемым моделям. Часть выпущенных отливок распределяется для дальнейшей механической обработки в другие филиалы АО «Газэнергосервис» (заводы «Турборемонт», «Ротор», «РТО»). Из другой части отливок завод полностью выпускает изделия с последующей механической обработкой методами профильного шлифования и нанесения защитных покрытий на проточную часть и внутреннюю полость лопаток. Сегодня предприятие предлагает более 140 наименований рабочих и направляющих лопаток, деталей камер сгорания и других изделий для газовых турбин как отечественного, так и иностранного производства.

Номенклатура выпускаемых изделий включает (рис. 12):

- рабочие лопатки турбин ГТК-10И (MS3002), ГТК-25И (MS5002), ГТК-10-4, ГТ-6-750, ГТН-6, ГТН-16М-1, ГТН-25, «Балтика-25», ГТУ Т32 «Ладога»;
- пластины покрывные турбин ГТК-10И, ГТК-25И;
- направляющие лопатки турбины ГТК-10-4;
- отливки рабочих и направляющих лопаток турбин ДР59, ДЖ59, ДГ90, ДН/ДУ80;
- отливки направляющих лопаток турбин MS3002, MS5002, ГТК-10-4 и др.;
- отливки рабочих лопаток турбины 1-, 2- и 3-й ступеней ГТЭ-110.

В условиях предприятия выпускаются прецизионные отливки турбинных лопаток, имеющие сложную циклонно-вихревую и петлевую систему охлаждения. Производство турбинных лопаток газоперекачивающих агрегатов стационарного и судового типа, а также освоение

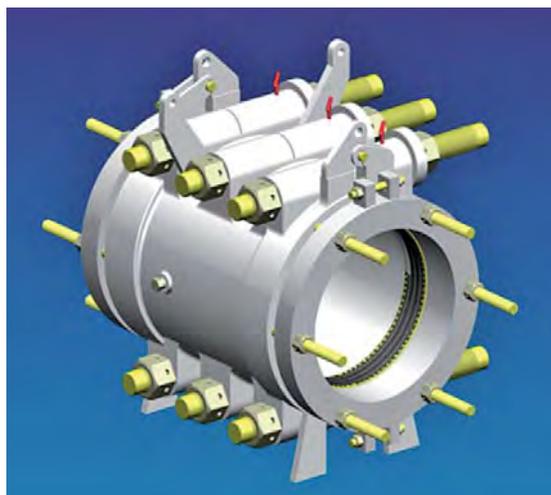
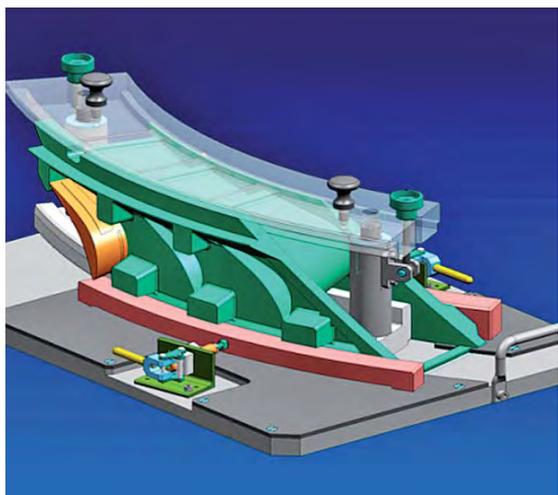


Рис. 13.
Примеры работ конструкторско-технологического отдела в Брянске

производства изделий для замены импортных аналогов являются важными стратегическими направлениями в деятельности предприятия. Для успешной реализации этих направлений проектируется и изготавливается новая оснастка, приобретается оборудование для производства сложных керамических стержней, их удаления из отливок, а также другое современное высокотехнологичное оборудование.

Высокоточное литье деталей газотурбинных агрегатов на предприятии сертифицировано и успешно реализовано совместно с системой менеджмента качества с 1997 года. В настоящее время предприятие имеет сертификат на соответствие ГОСТ Р ИСО 9001-2015.

В 2018 году на заводе внедрена и сертифицирована система менеджмента в области профессиональной безопасности и охраны труда на соответствие OHSAS 18001-2007.

Конструкторско-технологический отдел АО «Газэнергосервис»

Для организации системной работы по централизованному отраслевому инженерно-техническому обслуживанию и ремонту оборудования в газовой промышленности в АО «Газэнергосервис» был организован конструкторско-технологический отдел (КТО) в г. Брянске.

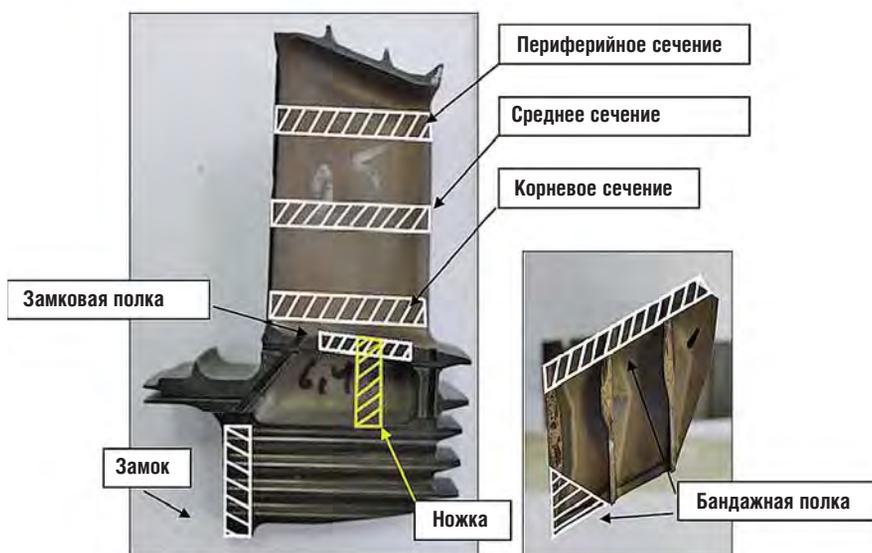
Одна из основных задач отдела – сопровождение реализации программы импортозамещения (рис. 13) в части разработки технической документации для изготовления запасных частей к импортным газоперекачивающим агрегатам. Специалисты КТО также разрабатывают и адаптируют конструкторскую и технологическую документацию на запасные части к ГПА отечественного производства. Отдел сопровождает изготовленные и отремонтированные ресурсные детали и узлы ГПА на стадии опытно-промышленной эксплуатации и проведения ресурсных испытаний.

При решении задач опытный квалифицированный персонал КТО использует современные системы автоматизированного проектирования – Siemens NX, Solid Works, «Компас» и др. При разработке конструкторской документации на запасные части ГПА успешно применяется оптическая измерительная система «Атос».

Отдел также имеет компетенции в разработке документации на литейную оснастку и нестандартное оборудование. Выпускается технологическая документация на ремонт ГПА для филиалов АО «Газэнергосервис»; обеспечивается хранение и своевременная передача технической документации производственным службам и предприятиям компании.

АО «Газэнергосервис» постоянно работает над повышением качества выпускаемой продукции – для этого инициируются и проводятся компанией научно-исследовательские работы. Например, была проведена работа по исследованию оригинальных рабочих лопаток и сопловых лопаток иностранного производства.

Рис. 14.
Схема вырезки образцов и разделения сечения на зоны



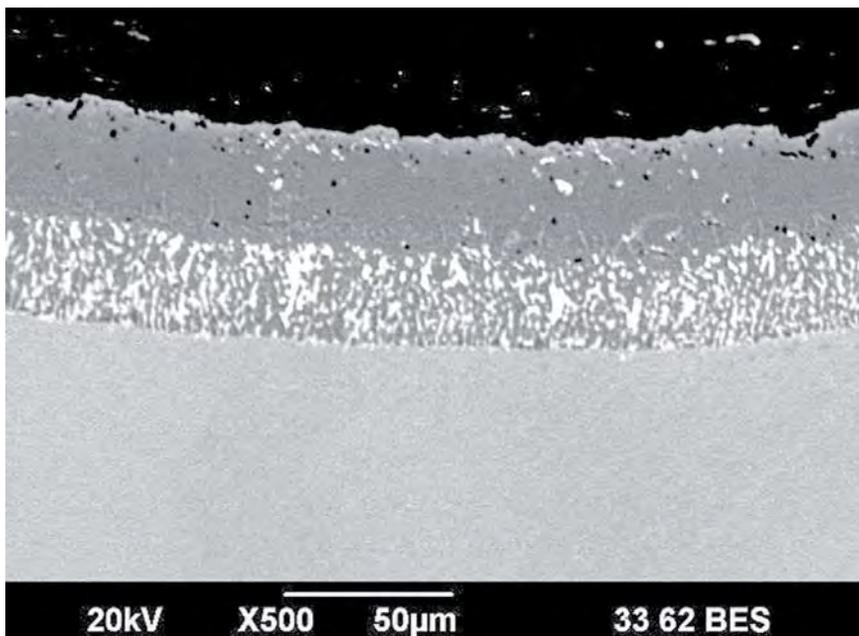
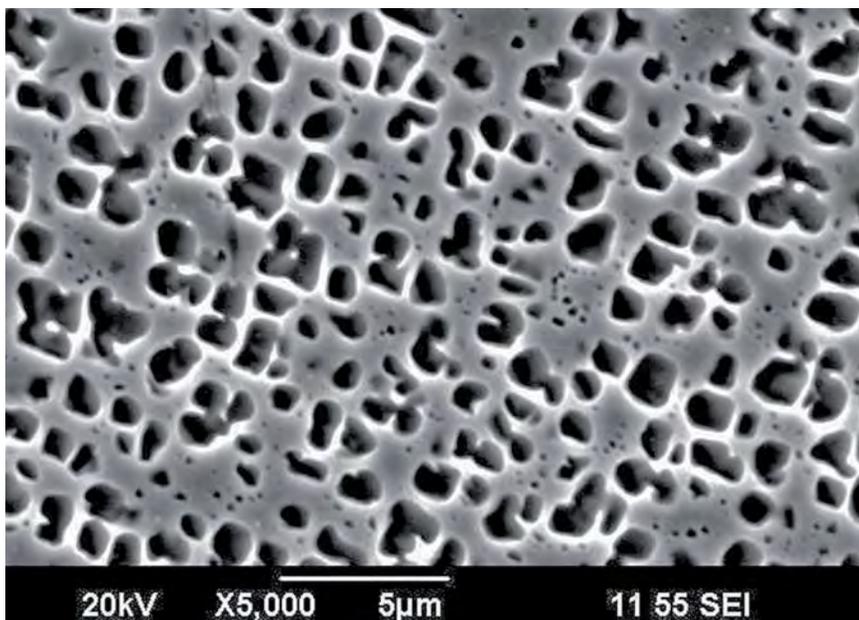


Рис. 15.
Микроструктура и химический состав внутреннего покрытия пера лопатки

В рамках данных исследований был проведен анализ рабочих лопаток 1-й ступени турбины высокого давления агрегата «Балтика-25». Основная цель работы – металлургическое исследование основного материала и материала покрытий лопаток (рис. 14), которое включает химический, микро- и макроструктурный анализ основного материала, химический анализ материала покрытия наружной и внутренней полости, покрытия на гребешках (рис. 15, 16).

По результатам исследования были сделаны заключения по марке основного материала, макро- и микроструктуре, толщине и составу жаростойкого покрытия на внешней (наружной) и внутренней поверхностях лопаток и срабатываемого покрытия на гребешках бандажной полки.

Рис. 16.
Микроструктура основного материала замковой полки после травления



Инженерный состав конструкторско-технологического отдела АО «Газэнергосервис» в ходе своей деятельности постоянно повышает свои профессиональные компетенции в различных направлениях машиностроения. В настоящее время КТО участвует в процессе реинжиниринга и локализации ранее поставляемого иностранного оборудования и компонентов для полной сборки энергетических агрегатов.

К примеру, по проекту ГТУ Т32 «Ладога» уже находятся в производстве элементы ГТУ, ранее поставляемые иностранными компаниями, – жаровые трубы, переходной отсек, крышки. Параллельно выполняется локализация проекта ТМ-16, и уже имеются первые достижения в реализации проекта: завод «Турбодеталь» освоил литье рабочих отливок и изготовление сопловых лопаток; «Турборемонт» приступил к выпуску корпусов сопловых аппаратов и компрессоров, КНД и диафрагмы, а на предприятии «Ротор» готовятся к отгрузке вала СТ и запущены в производство опорные венцы ТВД и ТНД. **TD**

Список литературы

1. Рогов А. В. Об итогах года и амбициозных планах ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы». 2021; S4(825) 22-24.
2. ОАО «Газэнергосервис»: Высокий уровень производства. 2014; 12(715) 48-49.
3. Скрынников С. В., Крылов П. В., Настека В. В., Голуб В. П., Ланговой С. М., Карасев Е. А., Телегин А. Ф., Якжин С. В., Лепихин А. Э., Логашов С. Ю., Скоробогатых В. Н., Лубенец В. П. Освоение производства и ремонта запасных частей, необходимых для обеспечения плановых ремонтов ГТУ SGT-600 ГПА «Балтика-25», в условиях российских предприятий. 2018; S3(773) 12-18.
4. Основные вехи истории развития ремонтной отрасли газовой промышленности. 2017; S2(754) 114-119.
5. Гилев К. О., Гузаев Е. В., Зуева Ю. В., Иванов В. А., Кляйнрок И. Ю., Култышев А. Ю., Смелянский Д. В., Спиринов В. В., Юн В. К. Газоперекачивающий агрегат ГПА-32 «Ладога». 2023.
6. Зайцев А. Н., Габайдуллин В. Л., Коровицын В. С. Высокочастотная балансировка гибких роторов газоперекачивающих агрегатов как способ повышения эффективности и качества ремонта. 2020; S1(797) 76-81.



Специалисты ООО «ГЭХ Сервис газовых турбин» завершили главную инспекцию с оценкой ресурса газотурбинной установки АЕ64.3А на Адлерской ТЭС

В июне 2023 года специалисты ООО «ГЭХ Сервис газовых турбин» в установленные сроки завершили выполнение комплекса работ по главной инспекции с оценкой ресурса (ГИСОР) газовой турбины типа АЕ64.3А совместно с главной инспекцией генератора WY18Z-066LLT и капитальным ремонтом турборедуктора GD-80 ст. № 12 филиала ПАО «ОГК-2» - Адлерская ТЭС.

В период проведения ГИСОР выполнены работы по разборке газовой турбины с выводом ротора из проточной части, осуществлены разборка и неразрушающий контроль деталей ротора, выполнена замена рабочих и направляющих лопаток, устранены выявленные отклонения по результатам дефектации. Комплекс работ выполнен в соответствии с требованиями конструкторско-технологической документации и условиями договора.

После завершения обратной сборки и холодной пуско-наладки оборудование поставлено на валоповоротное устройство, выполнены наладка режимов горения, опробование работоспособности защит и балансировка ротора.

По результатам выполненных работ определен остаточный срок службы компонентов газотурбинной установки и определена дальнейшая концепция сервисного обслуживания оборудования.

The specialists of GEH Gas Turbine Service LLC have completed the main inspection with an assessment of the resource of the AE64.3A gas turbine unit at the Adler thermal power plant.

In June 2023 the specialists of GEH Gas Turbine Service LLC completed the execution of a set of works on the main inspection with an assessment of the resource of AE64.3A gas turbine together with the main inspection of the WY18Z-066LLT generator and the overhaul of the GD-80 gear box of station No. 12 of the branch of PJSC OGC-2 - Adler TPP.

Стартовал новый проект Hermes по созданию энергетических установок на базе газовых турбин нового поколения.

Проект Hermes (Highly Efficient Super Critical ZERO eMission Energy System) реализуется в рамках европейской инвестиционной программы Horizon Europe. В проекте принимают участие 11 компаний и научно-исследовательских институтов из 7 стран. Среди участников проекта: Университет г. Твенте, Институт OWI г. Аахен, OPRA (Нидерланды), Национальный технический университет г. Афины, Exergia LLC (Греция), TEC4FUELS GmbH (Германия), Имперский колледж г. Лондона (Великобритания), CERFACS (Франция), Федеральная политехническая школа Лозанны (EPFL), Институт Пауля Шеррера (Швейцария), Вроцлавский технический университет (Польша).

Основная цель проекта – оценить эффективность системы Hermes, работающей на различных жидких и газообразных возобновляемых видах топлива, для производства электроэнергии с КПД выше 65% при нулевом выбросе парниковых газов и других загрязняющих веществ. В частности, планируется обеспечить эффективную и надежную работу газотурбинной установки на метаноле и водороде.

Для дальнейшего повышения КПД и устранения выбросов загрязняющих веществ партнеры консорциума по исследовательскому проекту Hermes Европейского союза хотят вывести газовые турбины на новый технический уровень.

Высокоэффективная газотурбинная электростанция будет работать в замкнутом цикле с использованием метанола в качестве топлива для проведения базовых лабораторных испытаний. С этой целью специалисты разрабатывают новый, экономически эффективный процесс получения возобновляемого метанола. Для синтеза метанола вода сначала расщепляется на водород и кислород с помощью электролиза с использованием возобновляемой электроэнергии. Водород взаимодействует с диоксидом углерода с образованием метанола. Метанол служит топливом для газовой турбины, где он вступает в реакцию с чистым кислородом, полученным в результате электролиза, и CO₂ со сверхкритическими параметрами (sCO₂).

Использование sCO₂ приводит к эффективному сгоранию топлива практически с нулевыми уровнями эмиссии, КПД ГТУ при этом ожидается на уровне 65%. Чтобы перевести CO₂ в сверхкритическое состояние, его подвергают воздействию температуры 31°C и давления 7,3 МПа, при которых он больше напоминает жидкость. Использование sCO₂ гарантирует, что температура горения не будет превышать установленных пределов при сжигании метанола с чистым кислородом. Метанол в качестве топлива должен быть взаимозаменяем с другими возобновляемыми источниками энергии, такими как водород, метан, этанол, аммиак, диметилэфир.

Кроме того, планируется изучить ксенон в качестве альтернативы CO₂. Исследовательский проект также включает разработку технологий по улавливанию и хранению углерода. Накопленный углекислый газ будет использоваться для производства метанола. В рамках общего процесса как CO₂, так и sCO₂ будут циркулировать таким образом, чтобы исключить выбросы CO₂ в атмосферу. Инструменты динамического моделирования, такие как цифровые двойники и алгоритмы машинного обучения, помогут оценить систему для различных вариантов применения.

Возможные области применения высокоэффективной газотурбинной электростанции включают такие энергоемкие отрасли промышленности, как производство цемента, стали, керамики или стекла, а также децентрализованное производство электроэнергии и тепла для городских районов, крупных строительных комплексов или критически важных объектов инфраструктуры.



Мониторинг ГТУ как инструмент обеспечения надежности эксплуатации.

В АО «ОДК-Авиадвигатель» завершен проект управления эксплуатацией газотурбинных установок

А.В. Лядов – ГК «ЛАНИТ»

In brief
Gas turbine plant monitoring as a tool to ensure the reliability of operation.

Operational reliability, resource and the performance indicators of gas turbine as part of gas turbine power plants and gas pumping units have always been of great importance both for developers and operators of this equipment. In the conditions of withdrawal from the Russian market of suppliers of foreign components for gas turbine plants, the task of increasing the reliability of their own gas turbine equipment becomes particularly urgent. The way to improve the reliability of operation is the development of methods and tools for monitoring of the technical condition.



Работы по повышению эксплуатационной надежности и ресурса ГТУ в составе газотурбинных электростанций и газоперекачивающих агрегатов всегда имели высокую важность как для разработчиков, так и для эксплуатирующих эти изделия организаций. В условиях ухода с российского рынка поставщиков зарубежных комплектующих разработчики и производители энергетического газотурбинного оборудования в очередной раз подошли к задаче повышения показателей надежности собственных ГТУ. Одним из способов повышения надежности эксплуатации является развитие методов и средств мониторинга технического состояния, контроля и диагностики.

АО «ОДК-Авиадвигатель» (входит в Объединенную двигателестроительную корпорацию Ростеха) – крупнейший разработчик газотурбинных установок в России (более 1200 ГТУ эксплуатируются в составе ГТЭС и ГПА) и ключевой участник рынка сервисных решений по контрактам жизненного цикла. Одной из главных задач предприятия всегда было обеспечение высоких показателей назначенного ресурса и надежности в эксплуатации, являющихся залогом качества и конкурентоспособности ГТУ.

Широко применяемые средства измерений, большой опыт сопровождения эксплуатации и знания по доводке изделий позволяют анализировать параметры ГТУ в эксплуатации для достижения высоких показателей межремонтного ресурса ГТУ. Однако, высо-

кая частота изменений процессов, протекающих в ГТД, недоступность контроля параметров «здесь и сейчас» и невозможность измерения всех необходимых параметров, характеризующих работу ГТУ, создали предпосылки к развитию иных подходов мониторинга, диагностики и прогноза технического состояния оборудования.

Различные цифровые инициативы всегда помогали совершенствовать процессы предприятия и в очередной раз пермское КБ оказалось «на острие» современных информационных технологий, приняв решение трансформировать собственную экспертизу в комплекс цифровых средств, применение которых позволит повышать показатели надежности работы газотурбинных установок. В рамках данной инициативы на предприятии был дан старт работ по созданию ЕИС ТОиР – единой информационной среды управления эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом ГТУ.

Целями построения системы были:

- непрерывный сбор и хранение регулярно обновляемой информации об эксплуатации ГТУ;
- оперативный контроль технического состояния эксплуатируемых ГТУ;
- своевременный контроль устранения выявленных неисправностей и обеспечение возможности прогноза их возникновения;
- повышение прозрачности управления процессами ТОиР парка оборудования,

контроль проведения своевременного технического обслуживания объекта;

- повышение эффективности и снижение трудоемкости обслуживания ГТУ в составе ГТЭС и ГПА.

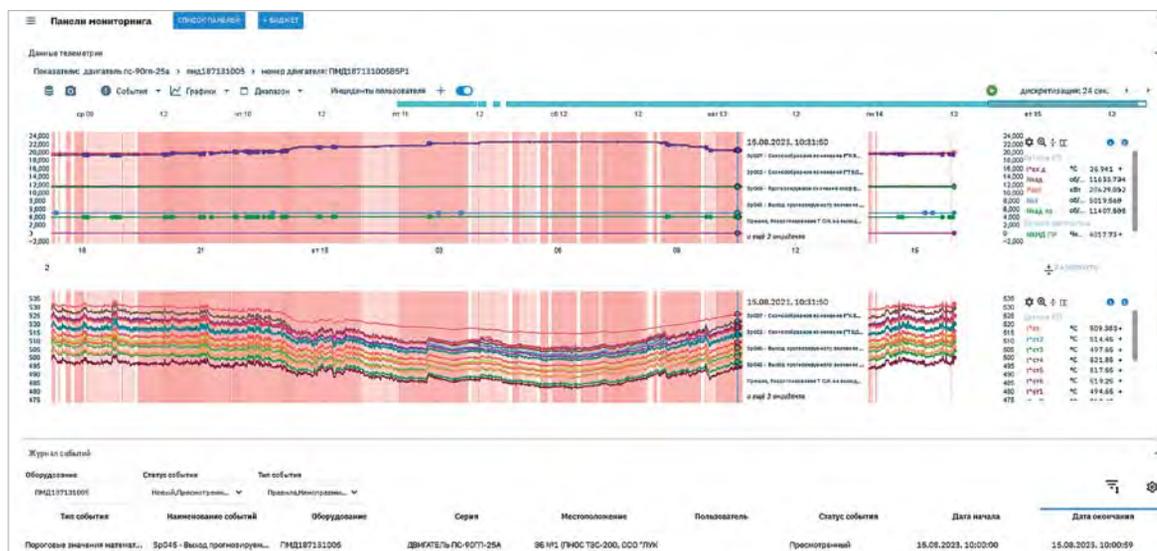
Подобный комплекс инструментов обеспечит конструкторское бюро возможностью оперативной комплексной диагностики технического состояния с использованием данных телеметрии, данных о выявлении и устранении фактических неисправностей, анализа причин зарождения возможных неисправностей, что при выработке необходимых подходов может позволить сократить число случаев выхода оборудования из строя и улучшить эксплуатационные показатели ГТУ.

В АО «ОДК–Авиадвигатель» понимали, что создание столь комплексной системы – задача абсолютно новая по своему характеру, требующая особых компетенций, и предприятие не обладает релевантным опытом в данной сфере. В связи с чем для достижения поставленных целей, минимизации рисков и сроков реализации было принято решение привлечь ИТ-интегратора, который сможет цифровизировать инженерную экспертизу, а также обратиться за государственной поддержкой и субсидировать выполнение указанных работ.

В декабре 2021 года АО «ОДК–Авиадвигатель» совместно с ГК «ЛАНИТ» приступило к реализации проекта. Специалисты по диагностике и сопровождению эксплуатации пермского КБ делились своими знаниями в данной области, описывали бизнес-процессы, обеспечивали настройку каналов связи с местами эксплуатации ГТУ для получения данных телеметрии, а команда ГК «ЛАНИТ» обеспечивала проведение аналитики, проектирование и внедрение инструментов.

За период проведения работ с декабря 2021 г. по март 2023 г. проектной командой были решены следующие задачи:

- разработана архитектура системы с учетом импортозамещения как прикладного, так и общесистемного программного обеспечения. Используется отечественное ПО и решения с открытым исходным кодом. При этом применены передовые практики: система выстроена из набора микросервисов; все приложения разворачиваются как Docker-контейнеры; применяется кластеризация сервисов и оркестрация кластером средствами Kubernetes; реализована непрерывная доставка обновлений CI/CD;
- заложены возможности горизонтального и вертикального масштабирования системы. При построении системы применена как классическая реляционная СУБД PostgreSQL для управления общими данными об оборудовании, так и аналитическая СУБД Clickhouse в кластерной конфигурации для работы с большими потоками данных телеметрии в режиме реального времени;
- учтены актуальные требования по информационной безопасности. Все серверы работают под управлением сертифицированной ФСТЭК операционной системы РЕД ОС, взаимодействие сервисов выполняется по протоколу HTTPS, настроена сквозная аутентификация в системе с получением учетных данных из ActiveDirectory по протоколу LDAP over SSL;
- реализованы универсальные ETL-механизмы для обработки любых видов исходных данных телеметрии из эксплуатации, независимо от поступления данных по протоколу OPC или же в виде наборов зашифрованных файлов, получаемых с САУ ГТУ;



С Панель мониторинга со сводной информацией по данным телеметрии, расчетов ключевых параметров и событий эксплуатации

- «оцифрованы» и подключены в алгоритмы обработки телеметрии математические модели методик расчета параметров и анализа технического состояния ГТУ;

- в систему загружены исторические данные телеметрии по эксплуатации более 400 ГТУ за последние несколько лет.

Результатом взаимодействия стала созданная в ходе проекта и введенная в эксплуатацию на предприятии комплексная система, которая:

- в режиме, приближенном к реальному времени, собирает, обрабатывает и приводит к единой частоте дискретизации в 1 Гц любые данные телеметрии из эксплуатации с более чем 40 ГТУ, размещенных на Урале, в Республике Коми, ЯНАО, ХМАО и Иркутской области. Ежедневно порядка 10 млн. значений параметров на изделие, порядка 240 млрд. значений параметров в год;

- обрабатывает, хранит данные о событиях (неисправности, превышение параметров, нарушение режимов работы), получаемых с САУ ГТУ. Ежедневно порядка 1,5 тыс. событий на изделие;

- обеспечивает автоматическую работу математических моделей оценки технического состояния для всех типов промышленных ГТУ на базе газогенератора двигателя ПС-90А – приведение параметров, расчет показателей мощности и КПД, расчет отклонений, трендовый контроль, прогноз значений ключевых параметров, контроль аномалий. Ежедневно от 1 млн. до 3 млн. значений параметров на изделие;

- обеспечивает работу более 200 экспертных правил, характеризующих возможные отклонения параметров работы ГТУ;

- позволяет визуализировать поступающую информацию в виде сигнальной индикации, графиков и мнемосхем;

Предприятие планирует дальнейшее совершенствование и масштабирование полученных результатов работ путем увеличения количества подключенных ГТУ и развития созданного задела для разработки моделей прогнозирования технического состояния.

Активное участие эксплуатирующих организаций в данной инициативе и предоставление каналов связи для сбора данных с эксплуатируемых ГТУ окажет качественное влияние на общие результаты работы и позволит АО «ОДК–Авиадвигатель» использовать эти средства для дальнейшего увеличения надежности эксплуатации разрабатываемых ГТУ. **Д**



«Росатом» ввел в эксплуатацию третью очередь Кузьминской ВЭС.

В мае 2022 года компания «ВетроОГК-2» (АО «НоваВинд») получила разрешение администрации Кочубеевского муниципального района Ставропольского края на строительство Кузьминской ВЭС общей мощностью 160 МВт на территории округа.

На площадке размещены 64 установки Vestas мощностью по 2,5 МВт. Общая мощность ВЭС составляет 160 МВт, среднегодовое производство энергии – 378 млн кВт·ч.

Первые 40 установок общей мощностью 100 МВт начали работать в начале июня текущего года, а в начале июля введены еще 24 ветроустановки мощностью 60 МВт. Ветропарк сможет обеспечивать электроэнергией свыше 70 тыс. домохозяйств ежегодно.

Компания «Валдекс Энергетика» увеличила мощность ГПУ-ТЭС для Сухонского КБК.

В августе 2021 года специалисты компании «Валдекс Энергетика» и австрийского подразделения MWM ввели в эксплуатацию первую очередь ГПУ-ТЭС для картонно-бумажного комбината в г. Сокол Вологодской области. Генеральный подрядчик – компания «Валдекс Энергетика» реализовала проект под ключ: на ТЭС введена генераторная установка TCG 2032 V16 электрической мощностью 4,3 МВт и тепловой – 1,9 МВт.

В июне этого года на станции были установлены и введены в эксплуатацию еще две аналогичные ГПУ с паровыми котлами-утилизаторами тепла дымовых газов. Две генераторные установки TCG 2032 V16 изготовлены компанией Caterpillar. ТЭС будет производить 12,9 МВт·ч электроэнергии, 5,7 МВт·ч – тепловой и около 9,3 т/ч насыщенного пара. Это позволит заказчику получить значительную экономию расходов на электроэнергию.

HEAT & ELECTRO MACHINERY

Международная выставка
оборудования для промышленности
и теплоснабжения
гражданских объектов и
предприятий различных отраслей



24-26.10.2023

ЦВК «Экспоцентр», Москва



machinery-fair.ru

GA GEFERA MEDIA

РЕКЛАМА

Исследование рабочего процесса газодизельного двигателя, работающего на аммиаке

О. В. Абызов, к.т.н. – доцент, oleg.abyzov@yandex.ru

Ю. В. Галышев, д.т.н. – профессор, galyshev57@yandex.ru

А. А. Метелев – ассистент, petmet@mail.ru

Высшая школа энергетического машиностроения, Институт энергетики, ФГАОВ ВО СПбПУ

Ключевые слова:

аммиак,
азот,
безуглеродное
топливо,
газодизель,
компьютерное
моделирование

Аннотация

В данной работе рассматривается возможность эффективной работы двигателя внутреннего сгорания по газодизельному циклу с использованием аммиака в качестве основного топлива. В ходе моделирования рабочего процесса двигателя с применением ПО ANSYS Forte исследуется влияние характеристик впрыска топлива и параметров сгорания в цилиндре двигателя с воспламенением от сжатия в двухтопливном режиме при использовании аммиака.

В качестве объекта исследования рассматривается газодизельный двигатель ЯМЗ-5345. Полученные результаты сравниваются с расчетом рабочего процесса по дизельному циклу, выполненным в программе RP-TOX.

Исследование показало, что при соответствующей оптимизации рабочего процесса можно добиться практически полной замены дизельного топлива аммиаком при сохранении той же мощности и коэффициента полезного действия, используя дизельное топливо только в качестве запальной дозы – не более 10 %.

При оценке экологических показателей отмечено значительное снижение концентрации CO_2 в составе выхлопных газов, что является основным преимуществом использования безуглеродных топлив. Отмечается наличие в выхлопных газах несгоревшего аммиака и оксидов азота.

Study of the working process of a gas-diesel engine using ammonia as a main fuel

O. V. Abyzov, Ph. D. in Engineering – Associate Professor, oleg.abyzov@yandex.ru

Yu. V. Galyshev, Doctor in Engineering Science – Professor, galyshev57@yandex.ru

A. A. Metelev – Assistant, petmet@mail.ru

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

Key words:

ammonia,
nitrogen,
carbon-free fuel,
gas-diesel,
CFD-simulation

Abstract

In this paper, we consider the possibility of efficient operation of an internal combustion engine in a gas-diesel cycle using ammonia as the main fuel. An engine simulation using ANSYS Forte examines the effect of fuel injection characteristics and in-cylinder combustion parameters in a dual-fuel compression ignition engine using ammonia.

The gas-diesel engine YaMZ-5345 is considered as an object of study. The results obtained are compared with the simulation of the diesel cycle performed in the RP-TOX program.

The study showed that, with appropriate optimization of the work process, it is possible to achieve almost complete replacement of diesel fuel with ammonia while maintaining the same power and efficiency, using diesel fuel only as an ignition dose - no more than 10 %.

Evaluation of environmental indicators shows a significant reduction in CO_2 concentration in the exhaust gases, which is the main advantage of using carbon-free fuels. The presence of unburned ammonia and nitrogen oxides in the exhaust gases is noted.

Введение

В современном мире на двигатели внутреннего сгорания приходится около 50 % всех выбросов в атмосферу. Так, при полном сгорании 1 кг дизельного топлива, состоящего на 87 % из углерода, образуется 3,2 кг CO₂ и 1,1 кг H₂O. В реальном процессе горения концентрация вредных веществ составит: оксидов азота NO_x – (15...20) г/м³, оксида углерода CO – (0,25...2,5) г/м³, углеводородов CH – (0,25...2,0) г/м³, углекислого газа CO₂ – (40...240) г/м³ и других веществ, таких как оксиды серы и сажа.

Постоянный рост количества автомобилей в мире приводит к неизбежному загрязнению окружающей среды, с каждым годом повышаются экологические нормы по составу топлива и токсичности выбросов ДВС [1,2]. Наряду с ухудшением экологической ситуации в мире серьезной проблемой является удорожание ископаемого топлива и истощение его ресурсов. Нефтяная промышленность остается доминирующей отраслью в мировой экономике и лежит в основе большинства геополитических конфликтов. В связи с этим проводится большая работа по поиску альтернативных видов топлива, позволяющих снизить вредные выбросы в окружающую среду вместе с выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания, а также удовлетворить потребность в более дешевых энергоносителях.

В данном исследовании предлагается рассматривать аммиак как альтернативу углеводородному топливу. Аммиак может выступать в качестве топлива для транспортных средств и стационарных систем электроснабжения. Переход на аммиак даст возможность уйти от углеродного цикла – это значительно снизит расход нефтепродуктов и уменьшит негативное воздействие на окружающую среду. Помимо того, что аммиак не содержит углерода, он обладает рядом преимуществ: достаточной энергоемкостью, относительной простотой хранения в жидком или газообразном виде, высоким октановым числом – 130 по исследовательскому методу, большими объемами производства.

Аммиак содержит 17,8 % водорода в массовых величинах, 1 литр аммиака содержит на 39 % больше энергии, чем 1 литр жидкого водорода. Это позволяет использовать аммиак в качестве носителя водорода.

В табл. 1 представлены физические свойства аммиака по сравнению с дизельным топливом и бензином.

Горение аммиака можно описать следующей формулой:



При полном сгорании аммиака образуется только один токсичный компонент – NO_x, и его содержание ничтожно мало.

При температуре окружающей среды аммиак сжижается уже при давлении 0,6...0,7 МПа. Критическое состояние: температура T_{кр} = 132,4 °С; давление P_{кр} = 11,15 МПа; плотность ρ_{кр} = 0,235 г/см³. Аммиак может храниться в сжатом и сжиженном виде, в жидкой фазе – при 0,86 МПа и 20 °С. Тем не менее, рекомендуется поддерживать давление в баке на уровне 1,7 МПа, чтобы сохранить жидкое состояние аммиака при повышении температуры окружающей среды. Энергетическая ценность сжатого аммиака составляет 13,88 МДж/л. Этот способ хранения не требует дополнительных затрат энергии [3].

Аммиак является продуктом крупнотоннажного производства и традиционно производится из природного газа и угля. В то же время аммиак можно получать и безуглеродным способом: путем синтеза из азота и водорода при температуре 380...450 °С и давлении 20...30 МПа с использованием железного катализатора. Такой способ производства позволяет осуществить переход от углеродного цикла, связанного с добычей и переработкой углеводородного сырья, выбросами парниковых газов, к азотному циклу, основанному на возобновляемом сырье – воде и воздухе [4].

Использование аммиака в качестве топлива имеет следующие преимущества:

- *гибкость в производстве и устойчивость.* Аммиак можно производить из любого источника энергии (солнца, ветра, биомассы, газа, угля и т. д.). При энергоснабжении от возобновляемых источников энергии производство аммиака может быть размещено практически в любом месте вблизи потребителя. Он является одним из лучших носителей избыточной энергии из возобновляемых источников;
- *ценовая конкурентоспособность.* Цены на аммиак пока сильно коррелируют

Физическое свойство	Аммиак	Дизельное топливо	Бензин
Объемная энергоемкость, МДж/л,	11,62	36,10	35,20
Низшая теплотворная способность, кДж/кг	19000	4270	44400

Табл. 1.
Физические свойства аммиака

№ мод.	Масса ДТ, г	η_i	N_i , кВт	P_z , бар	T_z , К
1	0,006	–	–	–	–
2	0,008	0,45	44,33	124,8	2028
3	0,0010	0,478	47,56	173,7	2161
4	0,0012	0,479	48,12	191,1	2185
5	0,0014	0,48	48,84	201,9	2202

Табл. 2.
Индикаторные показатели цикла для различных масс впрыскиваемого дизельного топлива

с ценами на углеводородное топливо. С уменьшением стоимости энергии эта зависимость будет снижаться. При этом стоимость безуглеродного аммиака в ряде случаев уже сопоставима со стоимостью аммиака, полученного из природного газа;

- *развитая логистическая инфраструктура.* Инфраструктура хранения и транспортировки аммиака достаточно развита, в том числе в сфере его традиционного использования (в качестве хладагента, удобрения и др.). В России производится необходимое оборудование для транспортировки и хранения этого продукта. Затраты на инфраструктуру сопоставимы с созданием инфраструктуры для сжиженных углеводородных газов (СУГ);
- *экологическая безопасность.* Аммиак является экологически чистым соединением с нулевым выбросом углекислого газа и низким уровнем других выбросов;
- *взаимозаменяемость топлива.* Аммиак можно использовать как монотопливо, а также для создания топливных смесей. Он испытан в качестве топлива в дизельных и бензиновых двигателях внутреннего сгорания. При соответствующем развитии технологий аммиак можно использовать в топливных элементах;
- *пожарная безопасность.* Аммиак относительно пожаробезопасен, так как плохо воспламеняется. Концентрационные пределы воспламенения аммиака с воздухом 15...18 % по объему, температура самовоспламенения 651 °С. Исследования показывают безопасность использования этого продукта по сравнению с СУГ и нефтяным топливом.

Табл. 3.
Концентрации токсичных компонентов при различных массах впрыскиваемого дизельного топлива

Удельный расход дизельного топлива г/(кВт·ч)	η_i	NO_x , ppm	CO , ppm	CO_2 , ppm	NH_3
15,2	0,45	3892	838	6000	9500
16,4	0,48	3359	2089	7000	8200
19,1	0,48	3244	2166	8000	8000
21,48	0,48	2833	2622	9000	7500

Ряд исследований показывает, что возможна работа ДВС с искровым зажиганием на чистом аммиаке [5–9]. Работа двигателя с воспламенением от сжатия на чистом аммиаке также возможна, но при очень высоких степенях сжатия [10–12]. Для двухтопливной работы был проведен ряд исследований [13–16], которые показали, что наибольшая топливная экономичность достигается в диапазоне 40...60 % дизельного топлива и 60...40 % аммиака.

Материалы и методы

ANSYS Forte — это программный инструмент вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования двигателей внутреннего сгорания, в том числе с воспламенением от сжатия. В программном комплексе используются современные теоретические представления о физике трехмерных течений газа и жидкости, динамике распыления топлива и процессах горения.

При моделировании в ANSYS Forte были задействованы следующие расчетные модели:

- модель турбулентного реактивного потока, в которой основная газовая динамика определяется уравнениями Навье-Стокса. При выводе основных уравнений используются термодинамическое уравнение состояния газовой среды, закон Фика для диффузии масс, предположение о ньютоновской жидкости и использование закона Фурье для теплового состояния;
- модель впрыска топлива через форсунку со сплошным или полым диффузором. Смоделированные подпроцессы включают: впрыск форсунки, распыление, дробление капель, столкновение и слияние капель, испарение и удар о стенки;
- гибридная модель распада Кельвина-Гельмгольца/Рэлея-Тейлора для моделирования струйного распыления и разрушения капель;
- дискретная многокомпонентная модель (DMC) для имитации испарения капель;
- встроенная библиотека кинетических механизмов химических реакций при горении;
- двухступенчатая модель сажи, состоящая из стадий образования и окисления. Использовались модели образования сажи Хироюсу и модели окисления Нэгла и Стрикленда-Констебла;
- модель G-equation для отслеживания распространения фронта пламени в полностью или частично перемешанной топливовоздушной смеси.

Моделирование в ANSYS Forte выполняется для временного интервала от момента закрытия впускного клапана до момента открытия

выпускного клапана. Так мы можем точно установить состав смеси в замкнутом объеме цилиндра перед началом впрыска топлива. Также для минимизации вычислительных затрат применяется условие симметрии. Таким образом, расчет производится для сектора цилиндра 45° .

Аммиак условно подается во впускной канал, для этого задается состав топливоздушной смеси в момент закрытия впускного клапана. Поскольку аммиак плохо самовоспламеняется, требуется вспомогательная доза дизельного топлива, впрыскиваемая непосредственно в цилиндр с помощью конусной форсунки. Для этого задаются следующие параметры:

- диаметр отверстия сопла $0,03 \text{ мм}^2$;
- угол распыления 15° ;
- температура капли 400 К ;
- угол начала впрыска -10° ;
- продолжительность впрыска 7° .

Степень сжатия принимается равной $17,69$.

Результаты и их анализ

Определение оптимального значения запальной дозы дизельного топлива

На данном этапе основной задачей является определение минимально возможной массы впрыскиваемого дизельного топлива, достаточной для воспламенения смеси аммиака с воздухом.

В качестве топлива указано вещество nC_7H_{16} , физические свойства которого соответствуют n -тетрадекану ($nC_{14}H_{30}$). Предполагается одноступенчатый впрыск. В *табл. 2* представлены результаты расчетов для различных масс впрыскиваемого топлива.

При массе запальной дозы менее $0,008 \text{ г}$ смесь не воспламеняется. Минимальный удельный расход дизельного топлива составляет $15 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. С увеличением запальной дозы топлива существенно возрастают максимальное давление и температура горения. Определим $m = 0,011 \text{ г}$ как оптимальное значение. Данные расчетов токсичных компонентов сведены в *табл. 3*.

Высокая концентрация оксидов азота NO_x , около 3000 ppm на выходе, обусловлена высокой температурой горения и наличием азота в топливе. На всех режимах работы в составе отработавших газов содержится несгоревший аммиак, около $0,8 \%$ объема, концентрация CO_2 находится в пределах 2000 ppm . И хотя доля дизельного топлива минимальна, горение происходит в зоне с низким коэффициентом избытка воздуха, так как в цилиндре имеется равномерно перемешанная смесь аммиака с воздухом. Что касается CO_2 , то его концентрация значительно ниже, чем в дизелях.

Рис. 1. Индикаторная р-ф диаграмма (давление газов в цилиндре)

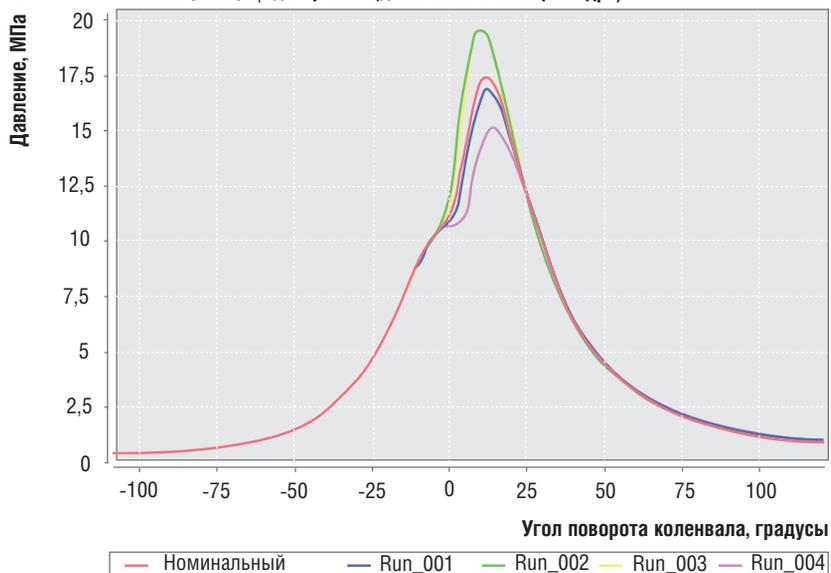


Рис. 2. Индикаторная р-ф диаграмма (температура газов в цилиндре)

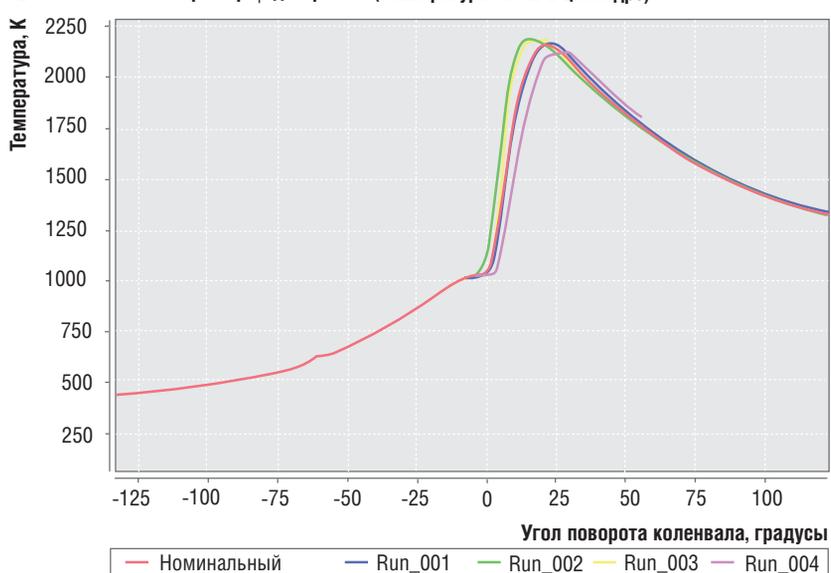
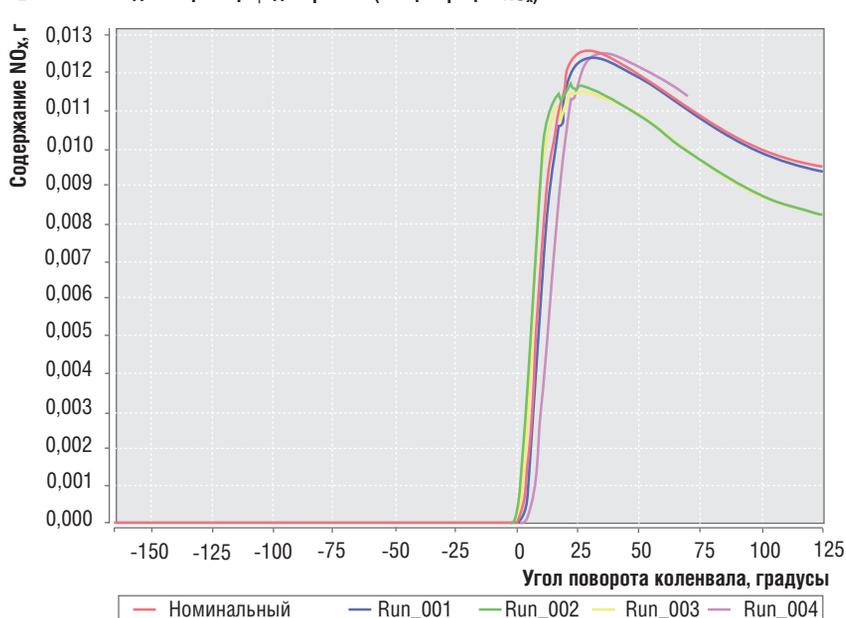


Рис. 3. Индикаторная р-ф диаграмма (концентрация NO_x)



№ моделирования	Φ_{inj}°	P_z , МПа	T_{max} , К	N_i , кВт	NO_x , ppm
1	-8	15,9	2082	49,5	3774
2	-10	17,3	2112	49,1	3652
3	-12	17,2	2159	50,2	3234
4	-14	12,1	2040	46,6	3198

Табл. 4.

Индикаторные показатели цикла для различных моментов пилотного впрыска

Оптимизация момента впрыска

Целью оптимизации является определение зависимости указанных параметров цикла и токсичных компонентов от момента впрыска. Расчетные данные указанных параметров цикла сведены в табл. 4. результаты моделирования представлены на рис. 1–3.

С увеличением угла опережения впрыска увеличивается задержка самовоспламенения, что отрицательно сказывается на экономичности и мощности. Видно, что при угле опережения зажигания больше 14° смесь не воспламеняется, максимальная мощность достигается при $\Phi_{inj} = -12^{\circ}$. Влияние на концентрацию NO_x в отработавших газах незначительно. В качестве оптимального выбираем угол $\Phi_{inj} = -11^{\circ}$.

Сравнение газодизельного цикла на аммиаке и дизельного цикла

В программе RP-TOX 2018 было выполнено моделирование рабочего процесса дизеля с использованием открытой нульмерной модели цилиндра. Исходные данные были взяты те же, за исключением расхода топлива, момента начала впрыска, продолжительности впрыска и температуры впуска (в дизельном варианте используется охлаждение наддувочного воздуха). Результаты сравнения двух циклов приведены в табл. 5.

В двухтопливном цикле на номинальном режиме работы удельный расход дизельного топлива составляет $16 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ – это 9 %

Табл. 5.

Сравнение индикаторных показателей для дизельного и газодизельного циклов

Параметр	Дизель	Аммиак+дизель
N_i , кВт	48,68	49,3
P_z , МПа	18,85	17,23
p_i , МПа	2,03	2,09
T_{max} , К	1720	2159
α	1,755	1,32
η_i	0,463	0,47
NO_x , ppm	511	3772
CO_2 , ppm	85 500	7 000
NH_3 , ppm	–	8 000

от значения в дизельном цикле. Однако для поддержания мощности требуется большой расход аммиака – $390 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, так как его удельная теплотворная способность по сравнению с дизельным топливом ниже более чем в два раза. Максимальное давление сгорания в двухтопливном цикле уменьшилось на 1 МПа ($p_z = 17,23 \text{ МПа}$), при этом происходит значительный рост температуры ($T_z = 2159 \text{ К}$), тепловая нагрузка на двигатель увеличится, но значение останется в допустимых пределах. Низкое значение коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 1,24$) связано с большим расходом аммиака, необходимым для поддержания заданной мощности, при этом важным показателем является сохранение высокого значения КПД ($\eta_i = 0,47$).

Сравнительный анализ режимов показал увеличение концентрации оксидов азота в отработавших газах, что связано с более высокой температурой горения (свыше 2000°C) и наличием азота в составе топлива. Также необходимо решить проблему наличия несгоревшего аммиака в выхлопных газах. Основным отличием двухтопливного цикла является снижение выбросов CO_2 , что является следствием использования безуглеродного топлива.

Заключение

В данной работе проведено расчетное исследование характеристик газодизельного двигателя, работающего на аммиаке, с использованием современного программного обеспечения для моделирования ANSYS Forte.

В результате моделирования были получены основные индикаторные показатели цикла, оценена токсичность выхлопных газов, проведена оптимизация по количеству запальной дозы дизельного топлива и моменту впрыска топлива. В ходе оптимизации было установлено, что при минимальной запальной дозе дизельного топлива необходим точный контроль момента впрыска топлива, при достаточно малом значении $\Phi_{inj} = 11^{\circ}$ отклонение в любую сторону более чем на 2° может привести к пропуску воспламенения.

Удалось сохранить мощность прототипа, для этого при работе на аммиаке необходимо обогащать топливовоздушную смесь, значение КПД при этом сохраняется. Еще большее обогащение топливной смеси аммиаком приводит к увеличению задержки воспламенения.

Анализ вредных выбросов показывает образование значительного количества оксидов азота в результате окисления атмосферного азота и азота, образующегося при сжигании аммиака в зоне высоких температур

(более 2000 °С). Несмотря на небольшую долю дизельного топлива, его горение происходит в зоне с низким коэффициентом избытка воздуха, что приводит к его неполному сгоранию, в результате чего образуются оксиды углерода. Основным преимуществом при работе двигателя на аммиаке является значительное снижение выбросов углекислого газа – более чем в 10 раз.

Существенной проблемой является наличие в выхлопных газах несгоревшего аммиака, его концентрация опасна для здоровья даже в очень малых дозах – необходима оптимизация процесса сжигания или доочистки выхлопных газов.

Результаты исследования показали, что работа газодизеля на аммиаке возможна, при этом достигается значительная экономия при сохранении мощности (расход дизельного топлива составляет 10 % от чисто дизельного цикла). Аммиак может стать альтернативой углеводородному топливу и привести к значительному снижению выбросов парниковых газов в атмосферу. 

Список литературы

1. Ivanov A. *The performance test of the car catalytic converter in the conditions of urban operation* / A. Ivanov, O. Abyzov, Y. Galyshev, V. Rumyantsev // *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019*. – 2020. – P. 03018. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403018.

2. Ivanov A. *Method for assessing performance of catalytic converter of spark-ignition car engine in operating conditions* / A. K. Ivanov, O. V. Abyzov, Y. V. Galyshev // В сборнике: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Series: Lecture Notes in Mechanical Engineering. Chelyabinsk*. – 2021. – pp. 902-910. DOI: 10.1007/978-3-030-54814-8_104.

3. Захаров С. В. *Получение водородосодержащего газа из аммиака и использование его в качестве топлива для ДВС* / С. В. Захаров // *Омский научный вестник*. – 2007. – № 2 (56). – С. 158-161.

4. Климентьев А. Ю. *Аммиак – перспективное моторное топливо для безуглеродной экономики* / А. Ю. Климентьев, А. А. Климентьева // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2017. – № 3 (57). – С. 32-44.

5. Ковалев Л. Г. *Возможности использования аммиака – носителя водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания* / Л. Г. Ковалев,

С. В. Захаров // *Вестник КрасГАУ*. – 2007. – № 4. – С. 158-161.

6. Cornelius W. *Ammonia as an engine fuel* / W. Cornelius // *SAE Technical Paper*. – 1965. – № 650052. DOI: 10.2307/44460524.

7. Starkman E. *Ammonia as a Spark Ignition Engine Fuel: Theory and Application* / E. S. Starkman // *SAE Technical Paper*. – 1966. – № 660155. DOI: 10.4271/660155

8. Grannell S. *The Fuel Mix Limits and Efficiency of a Stoichiometric, Ammonia, and Gasoline Dual Fueled Spark Ignition Engine* / S. M. Grannell // *J. Eng. Gas Turbines Power*. – 2008. – № 130: 042802. – pp. 1–8. DOI: 10.1115/1.2898837.

9. Lhuillier C. *Combustion Characteristics of Ammonia in a Modern Spark-Ignition Engine* / C. Lhuillier // *SAE Technical Paper*. – 2019. – 2019-24-0237. DOI: 10.4271/2019-24-0237.

10. Reiter A. *Demonstration of compression-ignition engine combustion using ammonia in reducing greenhouse gas emissions* / A. J. Reiter, S-C. Kong // *Energy Fuels*. – 2008. – № 22. – pp. 2963–2971.

11. Reiter A. *Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel* / A. J. Reiter // *Fuel*. – 2011. – № 90 (1). – pp. 87–97. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.07.055.

12. Gill S. *Assessing the effects of partially decarbonising a diesel engine by co-fuelling with dissociated ammonia* / S. S. Grill // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2012. – № 37. – pp. 6074–6083. DOI: 10.1016/j.ijdene.2011.12.13.

13. Gross C. *Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia-DME mixtures* / C. W. Gross // *Fuel*. – 2013. – № 103. – pp. 1069–1079. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.08.026.

14. Ryu K. *Performance characteristics of compression-ignition engine using high concentration of ammonia mixed with dimethyl ether* / K. Ryu // *Appl. Energy*. – 2014. – № 113. – pp. 488–499. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.07.065.

15. Pochet M. *Ammonia-Hydrogen blends in Homogeneous Charge Compression-Ignition Engine* / M. Pochet // *SAE Technical Paper*. – 2017. – 2017-24-0087. DOI: 10.4271/2017-24-0087.

16. Lasocki J. *Simulation of ammonia combustion in dual-fuel compression-ignition engine* / J. Lasocki, M. Bednarski, M. Sikora // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – 214. – 012081. DOI: 10.1088/1755-1315/214/1/012081.

Влияние конфигурации впускной системы на мощность дизельного двигателя размерности 7,5/6,0

Л. В. Плотников, д.т.н. – доцент, профессор кафедры «Турбины и двигатели»,
leonplot@mail.ru

В. А. Шурупов – студент кафедры «Турбины и двигатели», shurupov.vladislav@yandex.ru

Д. А. Давыдов – студент кафедры «Турбины и двигатели», dda_2003@bk.ru

В. А. Следнев – студент кафедры «Турбины и двигатели», Vladimir.Slednev@mail.ru

Д. Н. Красильников – студент кафедры «Турбины и двигатели», dima_krasilnikov_2017@mail.ru

А. Д. Лаптев – студент кафедры «Турбины и двигатели», noelll@bk.ru

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Ключевые слова:

дизельный двигатель, впускная система, поперечное профилирование трубопровода, стендовые испытания, расходные характеристики, мощность двигателя

Аннотация

Действенным способом улучшения удельных показателей дизелей является совершенствование процессов газообмена. В статье показано влияние поперечного профилирования впускного трубопровода дизельного двигателя на его расходные характеристики и мощность на основе экспериментальных исследований. Описаны экспериментальные стенды и средства измерений. Модификация впускной системы заключалась в применении впускной трубы с квадратным и треугольным участками. Представлены данные о расходных характеристиках через впускные системы модели поршневого двигателя и мощ-

ностные характеристики дизеля с разными модификациями впускной трубы. Установлено, что использование профилированных труб вызывает увеличение расхода воздуха через впускную систему двигателя на 15...17 % по сравнению с базовой конфигурацией. Отмечается рост мощности дизеля на 3...15 % при использовании профилированных труб во впускной системе по сравнению с базовой модификацией. Полученные данные полезны для модернизации впускных систем существующих двигателей и разработки новых дизелей с перспективными технико-экономическими показателями.

The effect of the intake system configuration on the power of a 7.5/6.0 diesel engine

L. V. Plotnikov, Doctor of Technical Sciences – Associate Professor, Professor of Turbines and Engines Department, leonplot@mail.ru

V. A. Shurupov, Student of Turbines and Engines Department, shurupov.vladislav@yandex.ru

D. A. Davydov, Student of Turbines and Engines Department, dda_2003@bk.ru

V. A. Slednev, Student of Turbines and Engines Department, Vladimir.Slednev@mail.ru

D. N. Krasilnikov, Student of Turbines and Engines Department, dima_krasilnikov_2017@mail.ru

A. D. Laptev, Student of Turbines and Engines Department, noelll@bk.ru

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

Key words:

diesel engine, intake system, pipeline transverse profiling, bench tests, consumption characteristics, engine power.

Abstract

At the same time, the improvement of gas exchange processes is an effective way to improve the specific performance of diesel engines. The article presents an analysis of the effect of cross-profiling of the intake pipeline of a diesel engine on its consumption characteristics and power based on experimental studies. The article describes experimental stands and measuring instruments. Modification of the intake system consisted in the use of an intake pipe with square and triangular sections. The article presents data on the flow characteristics through the intake systems of a piston engine model and the

power characteristics of a diesel engine with different modifications of the intake pipe. It was found that the use of profiled pipes caused an increase in air flow through the engine intake system in the range of 5–17 % compared to the basic configuration. It was revealed that there was an increase in diesel power by 3–15 % when using profiled pipes in the intake system compared to the basic modification. The data obtained are useful for the modernization of the intake systems of existing engines and the development of new diesels with promising technical and economic indicators.

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) остаются востребованными преобразователями энергии во многих отраслях техники и технологий [1]. При этом одним из направлений развития ДВС является повышение удельных показателей, в частности, увеличение мощности при сохранении массогабаритных характеристик. Известно, что добиться этого можно за счет оптимизации конструкции впускной системы [2, 3].

Рассмотрим современные научно-технические результаты ученых и инженеров в области совершенствования процессов газообмена в поршневых двигателях. Один из самых распространенных способов модернизации конструкции системы впуска заключается в определении оптимальной длины впускного коллектора [4, 5]. Данный способ основан на использовании волн давления во впускной системе (газодинамический наддув). Например, Talati Н. с соавторами добились повышения коэффициента наполнения на 6,3 %, снижения удельного расхода топлива на 0,83 % и увеличения крутящего момента на 6,33 % за счет оптимизации длины впускного трубопровода бензинового двигателя [4]. Bari S. и Sawant P. достигли роста коэффициента наполнения в среднем на 5,4 % вследствие применения впускной системы изменяемой длины [5].

Другой распространенный метод улучшения процессов газообмена состоит в создании закрутки потока воздуха во впускной системе. Так, Wang G.X. с коллегами использовали спиральный впускной канал в головке блока цилиндров дизельного двигателя, что привело к росту мощности двигателя на 3,5 % и снижению удельного расхода топлива почти на 2 % [6]. Также ученые и специалисты уделяют большое внимание доводке существующих конструкций систем впуска [7–9]. В большинстве случаев их основная цель – это уменьшение гидравлического сопротивления и, соответственно, улучшение удельных показателей двигателей. Souza G.R.D. вместе с соавторами удалось повысить коэффициент наполнения двигателя на 6 % за счет снижения шероховатости и более плавных изгибов деталей впускной системы [7]. Zhao J. с коллегами разработали оригинальную конструкцию впускного коллектора, при использовании которого возможно уменьшение удельного расхода топлива до 3 % [8].

Также известно, что физические условия на впуске существенно влияют на технико-экономические показатели поршневых ДВС [10]. Создание оптимальных значений начального давления и температуры перед впускным коллектором, а также правильный выбор фаз

газораспределения может повысить КПД двигателя в пределах 2,5 % и снизить выбросы NO_x на 35 % [10]. Sadeq A.M. с соавторами подтвердили существенное влияние конструкции элементов впускной системы на экологические показатели поршневого ДВС: применение спирального канала в головке привело к снижению выбросов NO_x на 47 % и уменьшению количества твердых частиц в отработавших газах на 32 % [11].

Следует отметить, что протекание процесса впуска оказывает существенное влияние на последующие процессы смесеобразования и сгорания топливно-воздушной смеси в цилиндре двигателя [12, 13]. Так, Wang G. с коллегами добились увеличения мощности дизеля на 3,5 % при одновременном снижении удельного расхода топлива на 1,8 % путем совместной настройки впускной системы и системы топливоподачи [13].

Таким образом, на основе анализа литературных источников можно заключить, что совершенствование процессов газообмена является актуальной задачей в развитии поршневого двигателестроения. При этом ученые и специалисты уделяют недостаточно внимания поперечному профилированию впускных трубопроводов. Соответственно, цель данной работы состояла в том, чтобы на основе экспериментальных исследований оценить влияние применения профилированных труб во впускной системе дизельного двигателя на его технико-экономические показатели.

Материалы и методы

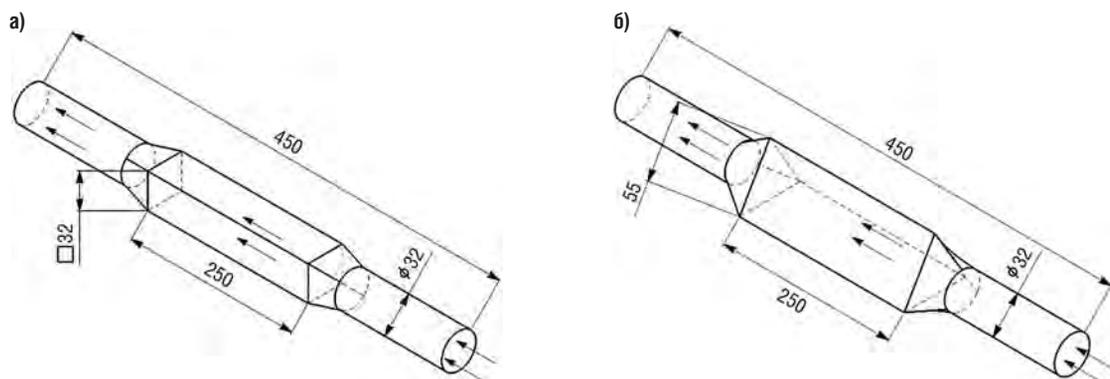
Исследования проводились в два этапа. Первый этап выполнялся на лабораторной установке, представляющей собой натурную модель поршневого ДВС, без учета процесса сгорания рабочего тела внутри цилиндра (рис. 1). На этом этапе подробно исследовались газодинамические и расходные характеристики пульсирующих потоков воздуха во впускных системах разных конфигураций.



Рис. 1. Экспериментальный стенд модели поршневого двигателя для исследования газодинамических характеристик процесса впуска: 1 – модель поршневого двигателя; 2 – электрический двигатель; 3 – впускная труба с датчиком термоанемометра; 4 – частотный преобразователь; 5 – термоанемометр; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – ноутбук

Рис. 2.

Геометрические размеры впускных труб с квадратным (а) и треугольным (б) участками (стрелками указано направление движения воздуха)



Лабораторная модель двигателя имела один цилиндр диаметром 82 мм, ход поршня – 71 мм. Коленчатый вал двигателя приводился во вращение посредством электрического двигателя мощностью 2,5 кВт. Частота вращения регулировалась с помощью частотного преобразователя в диапазоне от 500 до 3000 об/мин. В данном случае пульсирующий режим течения воздуха во впускной системе создавался за счет возвратно-поступательного движения поршня и периодической работы клапанного механизма. В качестве рабочей среды использовался воздух температурой 22...24 °С. Исследования проводились при стандартном барометрическом давлении.

Научная гипотеза данной работы базируется на известном газодинамическом явлении, возникающем при течении газа в трубопроводах с квадратным и треугольным поперечными сечениями, а именно, формирование в углах вторичных течений (продольных вихревых структур) [14, 15]. Эти структуры обладают высокой устойчивостью и способны оказывать существенное влияние на газодинамику потоков. Таким образом, можно предположить, что применение поперечного профилирования впускной трубы приведет к стабилизации пульсирующего потока воздуха и улучшит качество заполнения цилиндра рабочим телом. Поэтому в данном исследовании использовались трубы с поперечными сечениями в форме квадрата и равностороннего треугольника.

В обоих случаях геометрические размеры квадрата и треугольника выбирались исходя из равенства эквивалентных гидравлических диаметров относительно базовой круглой трубы во впускной системе. Так, во впускной системе лабораторной установки диаметр базовой трубы составлял 32 мм. Соответственно, для создания профилированных участков в трубе использовались квадрат со стороной 32 мм и треугольник – 55 мм (рис. 2). Длина профилированных участков труб составляла примерно 35 % от общей длины впускной системы модели двигателя (с учетом канала в головке блока цилиндров). Квадратные и треугольные трубы были изготовлены из металла. Средняя шероховатость их внутренней поверхности составляла примерно 6,3 мкм, как у остальных элементов впускной системы. Участки переходов от круглого сечения к квадратному или треугольному скруглялись пластичным материалом.

Второй этап экспериментальных исследований выполнялся на испытательном стенде, который представлял собой одноцилиндровый дизельный двигатель без турбонаддува, с электрическим нагружающим устройством (рис. 3). На этом этапе проводилась оценка влияния поперечного профилирования впускной трубы на мощностные показатели дизельного двигателя при разных режимах работы.

На этом этапе были получены данные о мощности и расходе топлива при использовании профилированных участков труб во впускной системе дизельного двигателя модели Robin-Subaru DY27-2D. Этот двигатель имел диаметр цилиндра 75 мм, ход поршня 60 мм. Номинальная мощность дизеля 5,2 кВт при частоте вращения коленчатого вала $n = 1900$ об/мин. Интервал изменения частоты вращения в ходе исследования составлял от 600 до 2300 об/мин (регулирование осуществлялось за счет подачи определенного количества топлива). Исследования проводились на разных нагрузочных режимах – от 20 до 80 % от номинальной мощности дизеля. Внешняя нагрузка создавалась посредством электрического нагружающего устройства с возможностью плавной регули-

Рис. 3.

Экспериментальный стенд для испытаний дизельного двигателя:

- 1 – дизель;
- 2 – впускная система;
- 3 – электрический генератор (нагрузка);
- 4 – пульт управления;
- 5 – топливный бак;
- 6 – ноутбук;
- 7 – выпускная система



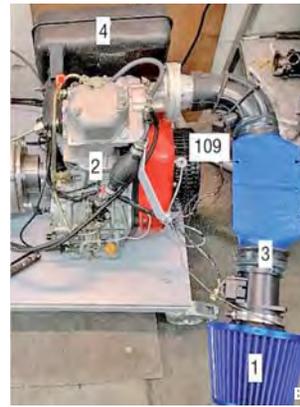


Рис. 4. Фотографии дизельного двигателя с круглой (а), квадратной (б) и треугольной (в) впускными трубами: 1 – воздушный фильтр; 2 – дизель; 3 – впускная система; 4 – выпускная система

ровки в процессе работы дизеля. В данном случае все физические процессы при экспериментах полностью соответствовали особенностям протекания рабочего цикла четырехтактного дизельного двигателя. Рабочей средой являлись воздух (температура 22...24 °С, стандартное барометрическое давление) и традиционное дизельное топливо без каких-либо добавок.

На втором этапе также использовались впускные системы с поперечным профилированием труб. Для дизельного двигателя диаметр базового впускного канала составлял 63 мм. Соответственно, у квадратной трубы размер стороны составлял 63 мм, а у треугольной – 109 мм (рис. 4). В данном случае длина профилированных участков труб также составляла около 35 % от общей длины впускной системы дизеля. Для дизеля квадратный и треугольный участки были изготовлены с помощью 3D-печати из ABS-пластика. Средняя шероховатость внутренней поверхности также равнялась 6,3 мкм. Участки переходов от круглого сечения к квадратному или треугольному были плавными (в соответствии с 3D-моделью).

При исследованиях на лабораторной установке измерялись следующие физические величины: барометрическое давление p_0 (ртутный барометр с погрешностью 0,1 %), средняя температура потока T (термопары с погрешностью 1 %), частота вращения коленчатого вала n (тахометр с погрешностью 2,5 %) и мгновенные значения местной скорости потока воздуха w_x (термоанемометр с погрешностью 5,4 %). Для измерения скорости потока воздуха w_x использовался термоанемометр постоянной температуры фирмы ИРВИС (г. Казань). Данные с аналоговых измерительных приборов поступали в аналого-цифровой преобразователь фирмы LCard (Москва), а далее в компьютер для дальнейшей обработки. Система измерений несколько подробнее описана в статье [16].

При испытаниях на стенде с дизельным двигателем измерялись следующие параметры: давление p_a и температура T_a во впускном

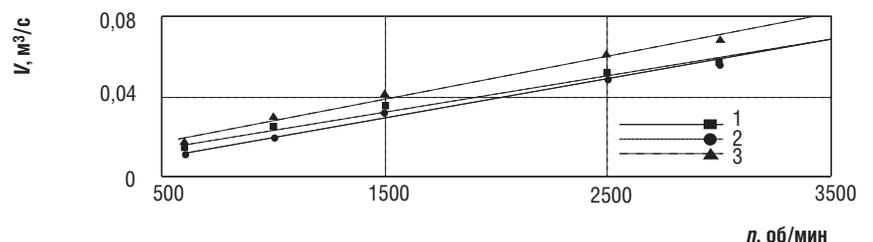
трубопроводе (датчик давления и термопара с погрешностями 0,5 % и 1 % соответственно), частота вращения коленчатого вала n (тахометр с погрешностью 1,5 %), тормозная мощность N и крутящий момент M (электрическое нагружающее устройство с погрешностью 2,5 % и 1,5 % соответственно), расход топлива g и расход воздуха G (весовой датчик и термоанемометр с погрешностью 1 % и 5 % соответственно). В данном случае все измеряемые параметры также поступали в аналого-цифровой преобразователь, а далее в специализированное программное обеспечение для обработки и визуализации.

Результаты и их анализ

Установлено, что поперечное профилирование впускных труб оказывает существенное влияние на расходные характеристики впускной системы модели двигателя (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что наличие квадратного или треугольного участка во впускной системе приводит к росту объемного расхода воздуха на 5...17 % по сравнению с базовой системой. При этом увеличение расходных характеристик через впускную систему имеет место при всех исследованных режимах работы модели двигателя. По мнению авторов, рост расходных характеристик объясняется стабилизацией пульсирующих потоков во впускной системе, которая вызвана действием двух физических процессов. Во-первых, стабилизация потока связана с действием вторичных вихревых структур в углах квадратного или треугольного канала. Эти вторичные течения являются своего рода «жгутами» во впускной системе двигателя (подробнее в [17]).

Рис. 5. Зависимости объемного расхода воздуха V от частоты вращения коленчатого вала n через впускные системы разных модификаций: 1 – базовая конструкция (впускная труба с круглым поперечным сечением); 2 – труба с квадратным участком; 3 – труба с треугольным участком



Во-вторых, она обусловлена ростом геометрического объема впускной системы при использовании квадратного или треугольного канала, которые имеют увеличенные площади поперечного сечения по сравнению с базовой трубой. В данном случае невозможно количественно оценить, какой из физических процессов является преобладающим для стабилизации пульсирующего потока. Однако можно предположить, что эта стабилизация должна привести к повышению качества заполнения цилиндра рабочим телом, а соответственно, потенциально и к росту мощности двигателя.

Таким образом, на первом этапе исследований было установлено, что поперечное профилирование труб во впускной системе модели двигателя имеет несколько положительных эффектов: стабилизация пульсирующего потока и улучшение расходных характеристик. Поэтому было принято решение о целесообразности продолжения исследований и проведении стендовых испытаний на дизельном двигателе с разными модификациями впускной системы.

На втором этапе исследований проводились стендовые испытания дизельного двигателя с разными модификациями впускной системы для получения зависимостей $N = f(n)$. Следует отметить, что коэффициент избытка воздуха был одинаковым для базового и модифицированного дизеля на всех исследуемых режимах. Конструктивно рассматриваемый дизель имел классическую механическую топливную систему, включающую топливоподкачивающий насос низкого давления, односекционный плунжерный насос высокого давления, топливную форсунку с гидравлическим приводом иглы и необходимые топливные фильтры.

Данный дизель также имел механический центробежный регулятор частоты вращения коленчатого вала. Он представлял собой систему управления из вращающихся грузов,

пружин и рычагов, которые были связаны с рейкой топливного насоса высокого давления (органом управления подачей топлива), управляющей величиной подачи топлива. Таким образом, в такой комплектации дизеля потенциальный рост расхода воздуха через впускную систему с одновременным увеличением подачи топлива (с условием равенства коэффициента избытка воздуха у базового и модифицированного дизеля) должен привести к повышению мощности двигателя в пределах максимальной производительности топливной форсунки. Результаты испытаний в виде зависимости мощности N от частоты вращения коленвала n для рассматриваемого дизеля приведены на рис. 6.

Установлено, что применение треугольной трубы во впускной системе приводит к росту мощности дизеля на 5...15,7% по сравнению с базовой модификацией. А использование квадратного участка увеличивает мощность дизеля на 1,1...7,2%. Рост мощности можно объяснить увеличением расхода воздуха через впускную систему с профилированными трубами за счет действия вихревых структур, образующихся в углах квадратного и треугольного участков, что способствует стабилизации пульсирующего потока воздуха. При этом массовый расход топлива увеличивался прямо пропорционально росту мощности. Соответственно, удельный расход топлива дизеля фактически не изменился в ходе проведения испытаний.

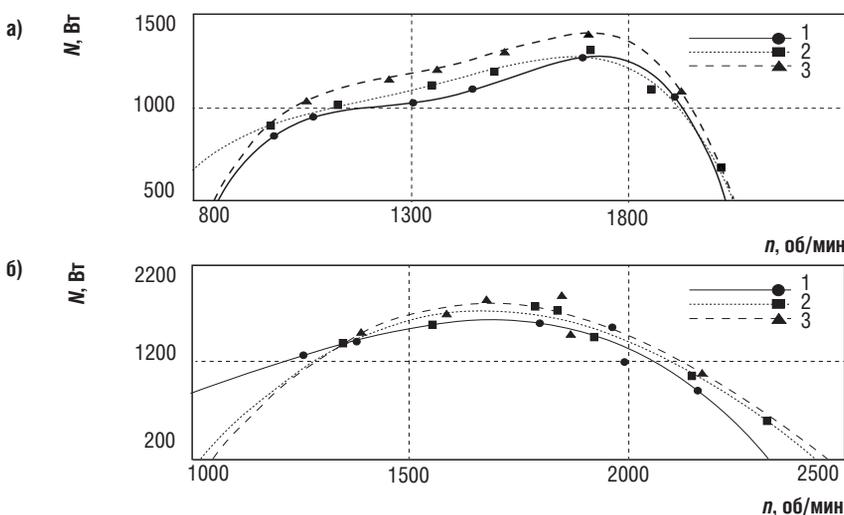
Следует отметить, что максимальный положительный эффект имел место при положениях органа управления подачей топлива на величинах 0,25...0,4 от максимального значения (1,0). Это можно объяснить ограниченной производительностью топливной форсунки.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие основные выводы:

- Отмечено увеличение расхода воздуха через впускную систему двигателя при использовании квадратной или треугольной труб в пределах 5...17% по сравнению с базовой конфигурацией. Улучшение расходных характеристик связано с увеличением геометрического объема впускной системы и вторичными вихревыми структурами, образующимися в углах профилированных каналов.
- На основе стендовых испытаний получены данные о мощностных показателях дизельного двигателя с впускными системами разной модификации. Установлено, что использование профилированных труб во впускной

Рис. 6.
Зависимости мощности N от частоты вращения коленчатого вала n дизельного двигателя при положениях органа управления подачей топлива 0,3 (а) и 0,4 (б) от 100% для впускных систем разных модификаций:
1 - базовая конструкция (впускная труба с круглым поперечным сечением);
2 - труба с квадратным участком;
3 - труба с треугольным участком



системе дизеля приводит к росту мощности до 15 % по сравнению с базовой модификацией. При этом КПД двигателя не изменяется.

- Направление дальнейших исследований по данной тематике может быть связано с оптическими методами изучения структуры пульсирующих потоков в системах газообмена разных модификаций, а также с применением профилированных труб в выпускной системе поршневого двигателя. 

Работа выполнена при поддержке РФФ в рамках научного проекта 23-29-00022.

Список литературы

1. IJER editorial: *The future of the internal combustion engine* / R.D. Reitz, H. Ogawa, R. Payri, T. Fansler [et al.]. // *International Journal of Engine Research*. – 2020. – Vol. 21 (1). – p. 3-10.

2. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания / Б.Х. Драганов, М.Г. Круглов, В.С. Обухова – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 175 с.

3. Плотников Л.В. *Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом: монография* / Л.В. Плотников // под общ. ред. Б.П. Жилкина, Ю.М. Бродова – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2020. – 204 с.

4. *Optimal design and analysis of a novel variable-length intake manifold on a four-cylinder gasoline engine* / H. Talati, K. Aliakbari, A. Ebrahimi-Moghadam, H. Khoshbakht Farokhad, A. Eskandary Nasrabad // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – Vol. 200. – Article number 117631.

5. *Improve of performance by 2-step variations of intake runner length and intake valve timing in the induction system of a SI engine* / S. Bari, P. Sawant // *Energy Procedia*. – 2019. – Vol. 160. – P. 108-115.

6. *Influence of fuel injection and intake port on combustion characteristics of controllable intake swirl diesel engine* / G.X. Wang, W.B. Yu, X.B. Li, R. Yang // *Fuel*. – 2020. – Vol. 262. – Article number UNSP 116548.

7. *Study of intake manifolds of an internal combustion engine: A new geometry based on experimental results and numerical simulations* / G.R.D. Souza, C.D.C. Pellegrini, S.L. Ferreira, F. Soto Pau, O. Armas // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2019. – Vol. 9. – p. 248-258.

8. *Improving the partial-load fuel economy of 4-cylinder SI engines by combining variable*

valve timing and cylinder-deactivation through double intake manifolds / J. Zhao, Q. Xi, S. Wang, S. Wang // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 141, – p. 245-256.

9. *Low-speed performance compensation of a turbocharged natural gas engine by intake strategy optimization* / K. Luo, Y. Huang, Z. Han, Y. Li, Y. Shi, W. Liu, C. Tang // *Fuel*. – 2022. – Vol. 324. – Article number 124748.

10. *Exploring the high load potential of diesel-methanol dual-fuel operation with Miller cycle, exhaust gas recirculation, and intake air cooling on a heavy-duty diesel engine* / W. Guan, X. Wang, H. Zhao, H. Liu // *International Journal of Engine Research*. – 2021. – Vol. 22(7). – p. 2318-2336.

11. *Combustion and emissions of a diesel engine utilizing novel intake manifold designs and running on alternative fuels* / A.M. Sadeq, M.A. Bassiony, A.M. Elbashir, S.F. Ahmed, M. Khraisheh // *Fuel*. – 2019. – Vol. 255, – Article number 115769.

12. *Numerical study on the asymmetrical jets formation from active pre-chamber under super-lean combustion conditions* / D. Zhao, Y. An, Y. Pei, H. Shi, K. Wang // *Energy*. – 2023. – Vol. 262. – Article number 125446.

13. *Influence of fuel injection and intake port on combustion characteristics of controllable intake swirl diesel engine* / G. Wang, W. Yu, X. Li, R. Yang // *Fuel*. – 2020. – Vol. 262. – Article number 116548.

14. Emery A.F. *The numerical prediction of developing turbulent flow and heat transfer in square duct* / A.F. Emery, P.K. Neighbors, F.B. Gessner // *Journal of Heat Transfer*, – 1980, – Vol. 102(1). – p. 51-57.

15. Идельчик И.Е. *Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов)* / И.Е. Идельчик – Москва: Машиностроение, 1983. – 351 с.

16. Plotnikov L.V. *Experimental research into the methods for controlling the thermal-mechanical characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a turbocharged engine model* / L.V. Plotnikov // *International Journal of Engine Research*. – 2022. – Vol. 23(2). – p. 334-344.

17. Plotnikov L.V. *Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine* / L.V. Plotnikov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 195. – Article number 123144.

Многофункциональные присадки к дизельному топливу: механизм действия, эффективность, проблемы

А. Ю. Шабанов, к.т.н. – доцент, aush2003@mail.ru

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

А. А. Сидоров, к.т.н. – доцент, sidorov_aa@spbstu.ru

А. Б. Зайцев, к.т.н. – доцент, zajtsev_ab@spbstu.ru

О. В. Абызов, к.т.н. – доцент, oleg.abyzov@yandex.ru

Высшая школа энергетического машиностроения, Институт энергетики, ФГАОВ ВО СПбПУ

Ключевые слова:

многофункциональная присадка, дизельное топливо, процесс сгорания, эффективная мощность, расход топлива, температура отработавших газов, дымность, токсичность отработавших газов, задержка воспламенения

Аннотация

Многофункциональные присадки (МФП) улучшают процесс сгорания топлива, повышают его моющие способности, снижают уровень загрязненности рабочих полостей камеры сгорания и т.д. Но глубокого исследования о влиянии их концентрации на работу двигателя не проводилось, производители МФП дают общие рекомендации, без учета реального состава базового топлива и режимов работы двигателя.

В статье приведены результаты специальных моторно-стендовых исследований по влиянию концентрации МФП на работу двигателя: расход топлива, дымность отработавших газов. Исследования проводились при работе двигателя по нагрузочной характеристике для летнего

ДТ-Л-К5 и зимнего ДТ-З-К5 на дизельных топливах одного бренда. Также представлены результаты индицирования двигателя (измерение мгновенного давления в цилиндре) с расчетным исследованием диаграмм для определения динамики активного тепловыделения в цилиндре при работе двигателя на базовом топливе и содержащем МФП в разных концентрациях.

В результате было определено уменьшение задержки воспламенения топлива, повышение скорости сгорания в кинетической фазе и сокращение общей продолжительности горения. Выявлено значение оптимальной концентрации МФП, которое существенно зависит от углеводородного состава базового топлива.

Multifunctional additives for diesel fuel: mechanism of action, efficiency, problems

A.Yu. Shabanov, Ph. D. in Engineering – Assistant Professor, aush2003@mail.ru

A.S. Aleshina, Ph. D. in Engineering – Assistant Professor, Director, Alena.Aleshina@spbstu.ru

A. A. Sidorov, Ph.D. in Engineering – Assistant Professor, sidorov_aa@spbstu.ru

A. B. Abyzov, Ph.D. in Engineering – Assistant Professor, oleg.abyzov@yandex.ru

Higher School of Power Engineering, Institute of Power Engineering, SPbPU

Key words:

multifunctional additive, diesel fuel, combustion process, effective power, fuel consumption, exhaust gas temperature, smokiness, exhaust gas toxicity, ignition delay

Abstract

Multifunctional additives (MFAs) improve the combustion process of fuel, increase its washing abilities, reduce the level of contamination of the working cavities of the combustion chamber, etc. But no in-depth research has been conducted on the effect of their concentration on engine operation, manufacturers of MFAs give general recommendations, without taking into account the real composition of the base fuel and engine operating modes.

The article presents the results of special motor-bench studies on the effect of MFA concentration on engine operation: fuel consumption, exhaust gas smoke. The studies were carried out when the engine was operating according to the load characteristic for the summer

DT-L-K5 and winter DT-Z-K5 on diesel fuels of the same brand. The results of engine indexing (measurement of instantaneous pressure in the cylinder) with a calculated study of diagrams to determine the dynamics of active heat generation in the cylinder when the engine is running on base fuel and containing MFAs in different concentrations are also presented.

As a result, a decrease in the ignition delay of the fuel, an increase in the rate of combustion in the kinetic phase and a reduction in the total duration of combustion were determined. The value of the optimal concentration of MFAs, which significantly depends on the hydrocarbon composition of the base fuel, is revealed.

Повышение качества углеводородных топлив, в первую очередь дизельного топлива (ДТ), с точки зрения улучшения их моторных свойств, экологических характеристик, снижения степени загрязненности камеры сгорания, системы впуска / выпуска двигателя является актуальной задачей и обязательным условием высококачественного товарного топлива. Очень важной проблемой, прямо влияющей на суммарные эксплуатационные затраты и общий ресурс дизельного двигателя, является повышение ресурса систем подавления токсичности: катализаторов, сажевых фильтров, ремонт и замена которых относится в настоящее время к крайне дорогостоящей операции.

Для реализации задачи повышения качества ДТ в основном используются два направления. Во-первых, это совершенствование технологий производства и очистки базовых топлив, но это требует очень больших капитальных вложений в переоборудование отечественных НПЗ. Другим перспективным направлением является применение специальных многофункциональных присадок (МФП). Эти присадки улучшают качество сгорания топлива, а также повышают моющие способности топлив и способствуют уменьшению уровня загрязненности рабочих полостей камеры сгорания, впускной и выпускной системы. Кроме того, присадки к ДТ повышают смазочные свойства топлива, увеличивая тем самым ресурс топливной аппаратуры [1–6].

В то же время особенности сгорания топлива в дизельном двигателе ставят перед МФП во многих случаях весьма противоречивые требования. Так, улучшение смазывающей способности топлива зачастую ухудшает его низкотемпературные свойства. Активация сгорания топлива, являющаяся основой механизмов улучшения эффективности его сгорания, приводит к росту цетанового числа дизельного топлива, что также сужает границы положительного эффекта. Известно, что отклонение цетанового числа от оптимального значения, на которое настроен рабочий процесс, как в сторону повышения, так и понижения дает эффект повышения расхода топлива и снижения эффективного КПД на 0,5 % на каждую единицу отклонения ЦЧ.

Кроме того, активация сгорания топлива неизбежно влечет за собой рост температур сгорания в цилиндре. С одной стороны, это повышает термический КПД цикла, снижая тем самым удельный расход топлива и повышая полноту сгорания, уменьшая содержание в отработавших газах остаточных углеводородов СН и дымности ОГ. Помимо улучшения экологического качества топлива, это снижает

нагрузку на системы подавления токсичности и дымности (катализаторы и сажевые фильтры) двигателя, продляя срок их службы.

С другой стороны, рост температур в цилиндре в условиях использования сверхбедных топливовоздушных смесей, характерных для рабочего процесса дизельных двигателей, неизбежно приводит к повышению эмиссии не менее опасных токсических компонентов – оксидов азота NO_x , а также к росту теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы дизеля. Для современных высокофорсированных дизелей этот фактор может быть критическим. При высоких концентрациях ввода МФП, обладающих высокой моющей способностью, особенно на начальных этапах применения присадки, может наблюдаться ускоренное засорение топливных фильтров вплоть до полного прекращения подачи топлива в двигатель.

Наиболее перспективным и экономически выгодным способом улучшения качества дизельных топлив является использование присадок различного функционального назначения, несмотря на то что присадки иногда, улучшая качество одних марок топлива, не проявляют эффективности в других топливах и даже выступают в роли антагонистов по отношению к иным присадкам, входящим в состав используемого пакета. При этом известно оптимальное значение концентрации вводимой присадки, при котором достигается наибольшая эффективность ее действия, и зависимость значения оптимальной концентрации от состава базового топлива [7, 8, 11].

Однако причина ухудшения эффекта при концентрации присадок, превышающей оптимальные значения, обычно не раскрывается. Также нет полного исследования о возможном негативном эффекте применения высоких концентраций присадки на потребительские свойства брендового топлива.

В рекомендациях по технологии применения присадок, разработанных их производителями, обычно дается лишь общая рекомендация по концентрации ее ввода, но без учета реального состава базового топлива, его сезонности, особенностей пакета функциональных присадок, использованных при изготовлении базового топлива. Несмотря на широкое распространение применения подобных присадок при производстве топлив улучшенного качества (в дальнейшем – брендовых топлив), глубокого исследования механизма их работы в реальных условиях двигателя не проводилось [7–12].

Для ответа на поставленные вопросы авторами было проведено специальное исследование, результаты которого частично приводятся в данной статье.

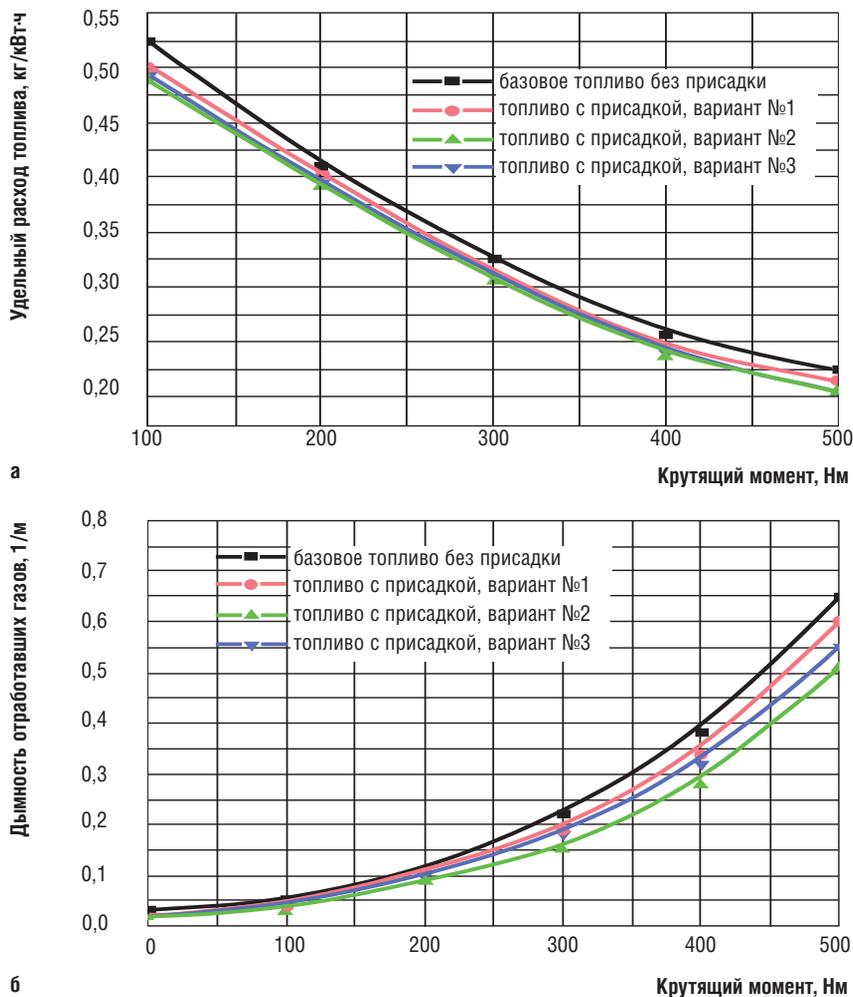


Рис. 1.

Изменение удельного расхода топлива (а) и дымности отработавших газов (б) дизельного двигателя при работе на дизельных топливах с разным содержанием МФП.

Нагрузочная характеристика, частота вращения коленчатого вала 1500 об/мин, ДТ-Л-К5:

вар. 1 – концентрация присадки от рекомендованной производителем 50 %;

вар. 2 – концентрация присадки 100 %;

вар. 3 – концентрация присадки 200 %

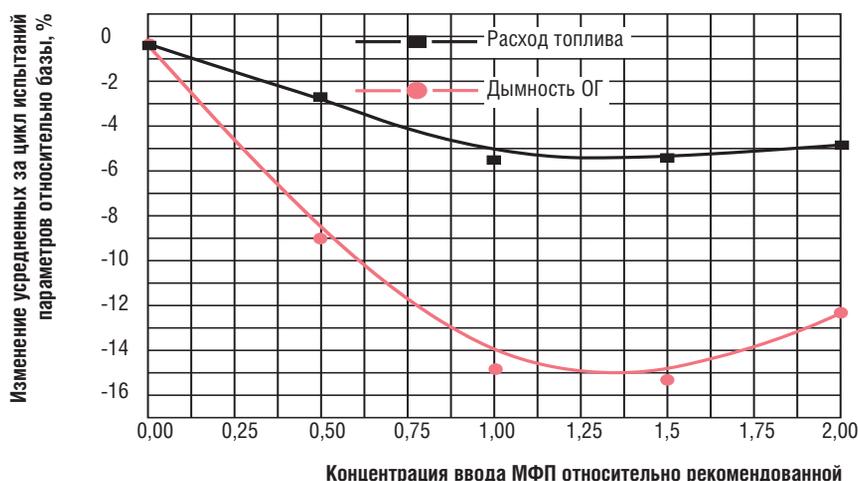


Рис. 2.

Зависимость усредненных за цикл испытаний эффектов изменения удельного расхода топлива и дымности отработавших газов от концентрации ввода испытываемой МФП.

Базовое топливо ДТ-Л-К5

Исследование строилось на базе систематизации и последующего анализа результатов многочисленных моторно-стендовых испытаний, проведенных авторами в процессе работ по созданию и корректировке состава брендовых топлив (автомобильных бензинов, дизельных топлив) в интересах различных фирм – производителей присадок и топлив.

Методика моторно-стендовых испытаний включала в себя проведение цикла испытаний с замером основных технико-экономических показателей двигателя (эффективной мощности, мгновенного расхода топлива, температуры отработавших газов, дымности и токсичности отработавших газов по компонентам CO, CO₂, CH, NO_x) в широком спектре эксплуатационных режимов работы двигателя – от холостого хода до режимов больших нагрузок. На части наиболее характерных режимов проводилось измерение диаграммы давления (индикаторной диаграммы) в цилиндре двигателя. Обработка индикаторной диаграммы позволяла проанализировать характер сгорания (скорость, полноту, распределение сгорания по фазам быстрого и медленного горения).

Полностью идентичные циклы испытаний последовательно проводились для базового топлива, не содержащего присадки, а также композиционных брендовых топлив, содержащих присадку в различных концентрациях – от половинной до удвоенной по отношению к рекомендованной производителем.

Далее будут обсуждаться результаты, полученные в ходе проведения работ по оптимизации состава летнего дизельного топлива ДТ-Л-К5 путем использования многофункциональной присадки отечественного производства.

Результаты замеров изменения параметров расхода топлива и дымности отработавших газов при работе дизеля по нагрузочным характеристикам выявляют определенное положительное влияние присадки на процессы сгорания. Это выражается в заметном снижении удельного расхода топлива (на 1,5...6,2 % в зависимости от режима работы) и, особенно, дымности отработавших газов – до 25...30 % (рис. 1 а, б). При этом наблюдается заметное влияние концентрации ввода присадки на итоговую величину получаемого эффекта. Этот вывод наглядно подтверждается при анализе зависимости от концентрации ввода присадки усредненных за цикл испытаний эффектов – расход топлива, дымность ОГ (рис. 2).

Таким образом, для данного вида дизельного топлива оптимальная концентрация присадки, обеспечивающая максимальный эффект повышения качества сгорания, заметно выше рекомендованной ее производителем. При этом, как

показывает весь наш опыт проведения аналогичных работ, оптимальная концентрация МФП существенно зависит от углеводородного состава базового дизельного топлива [7–14]. В качестве иллюстрации этого утверждения на рис. 3 приведены результаты аналогичной работы, проведенной с испытуемой присадкой, но с использованием в качестве базового топлива зимнего дизельного топлива ДТ-3-К5 того же бренда.

Представленный результат показывает, что для этого вида топлива оптимальная концентрация снизилась и приблизилась к рекомендованной производителем. Таким образом, путем проведения аналогичных исследований возможна оптимизация состава брендового топлива по соотношению цена/качество, с учетом индивидуальных особенностей конкретного базового топлива.

Для выявления механизма влияния МФП на процессы сгорания, объясняющего приведенные выше результаты, было произведено индентирование цилиндров двигателя при работе на режимах, идентичных по частоте вращения коленчатого вала и нагрузке. Кроме того, на этих же режимах проводился замер полного комплекса показателей двигателя по программе, аналогичной вышеописанной. Полученные индикаторные диаграммы обрабатывались с использованием программно-методического комплекса, разработанного в СПбПУ [8].

Так, на рис. 4 а, б приведены результаты обработки экспериментальных индикаторных диаграмм двигателя (давление и температура в цилиндре) на фиксированном режиме работы ($n=1700$ об/мин, нагрузка 450 Нм). Результаты обработки позволили проанализировать изменение характера сгорания топлива в цилиндре дизеля, происходящие при вводе в него МФП.

По результатам замера давления в цилиндре рассчитывается т.н. «активное» тепловыделение $X(\varphi)$, определяемое по формуле

$$X(\varphi) = M_{\tau}^{ст}(\varphi) / M_{\tau}^0,$$

где $M_{\tau}^{ст}(\varphi)$ – масса топлива, сгоревшего в цилиндре к моменту времени φ ; M_{τ}^0 – цикловая подача топлива.

На рис. 5 приведены результаты расчета динамики активного тепловыделения в цилиндре двигателя на том же режиме при работе дизеля на разных вариантах топлива – базовом и содержащем МФП в различных концентрациях.

По характеру изменения кривой активного тепловыделения можно судить о полноте и продолжительности сгорания топлива, а также о задержке воспламенения (длительности периода индукции). Кроме того, можно

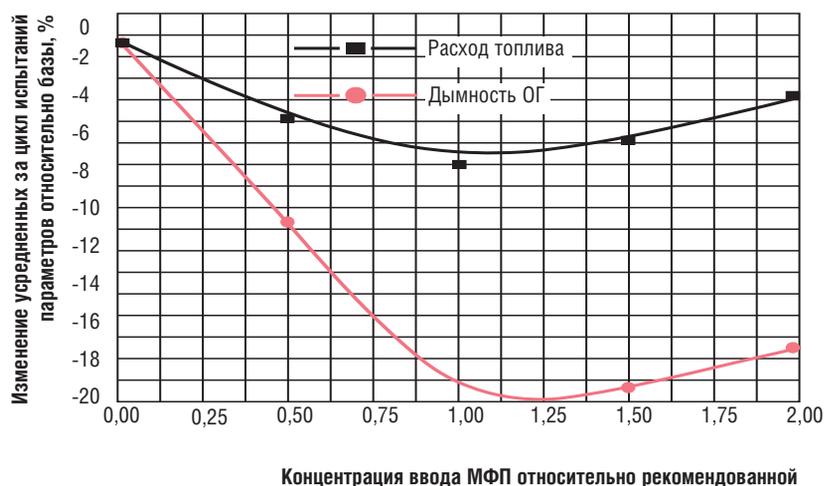
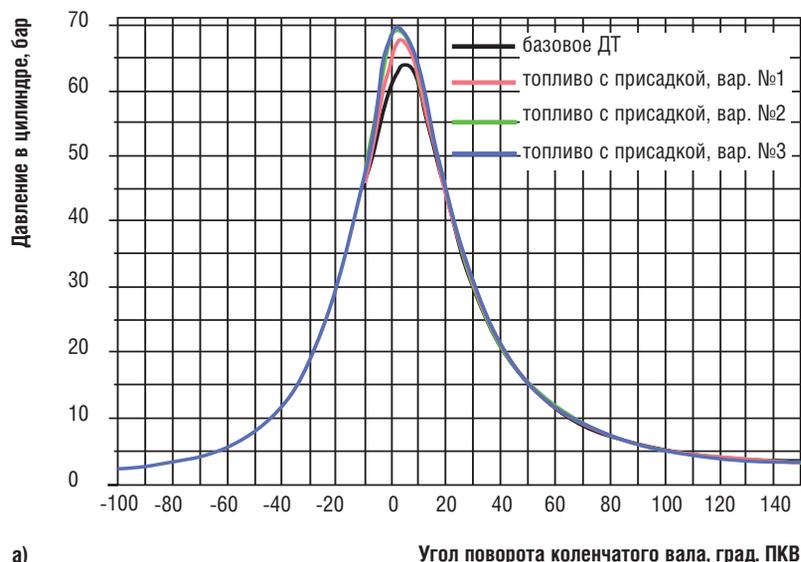
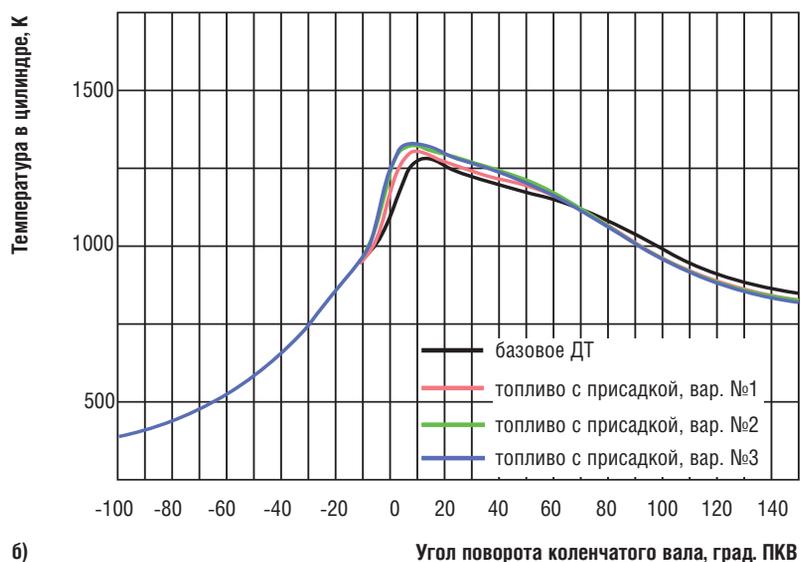


Рис. 3.

Зависимость усредненных за цикл испытаний эффектов изменения удельного расхода топлива и дымности отработавших газов от концентрации ввода испытуемой МФП. Базовое топливо ДТ-3-К5



а)



б)

Рис. 4.

Диаграммы давлений (а) и температур (б) в цилиндре двигателя на фиксированном режиме работы

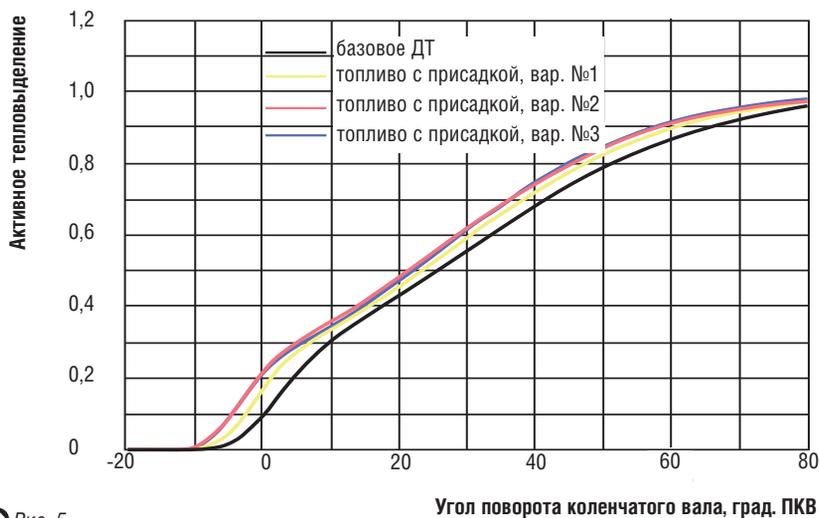


Рис. 5. Изменение характера сгорания дизельного топлива при вводе в него МФП в различных концентрациях удельного расхода топлива и дымности отработавших газов от концентрации ввода испытываемой МФП. Базовое топливо ДТ-Л-К5

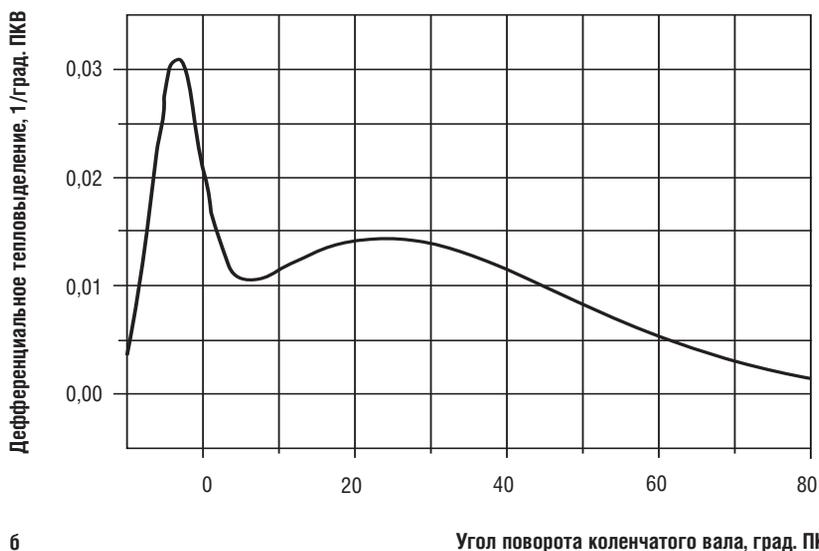
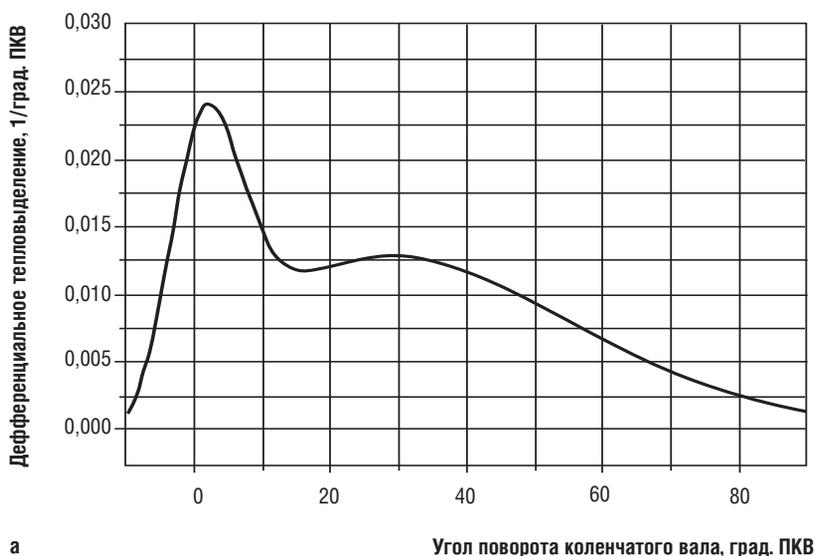


Рис. 6. Динамика дифференциального тепловыделения в двигателе при работе а) на базовом топливе; б) на топливе, содержащем МФП

проанализировать характер сгорания в фазах быстрого (кинетического) и медленного (диффузионного) сгорания.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. При вводе в топливо МФП наблюдается определенное повышение скорости сгорания, особо заметное в его кинетической фазе (рис. 6). Сокращение продолжительности сгорания говорит об увеличении скорости сгорания, то есть об активации процесса горения. При этом ввод МФП в некоторой степени повышает полноту сгорания топлива. Предположительно, это также связано с увеличением скорости сгорания топливовоздушной смеси в двигателе.

На основании приведенных выше результатов можно сформулировать предположительные причины полученного эффекта улучшения показателей двигателя. Увеличение скорости сгорания при вводе присадки способствует некоторому росту максимальной температуры цикла, что влечет за собой увеличение термического, а следовательно, и эффективного КПД цикла. Это дает снижение часового и удельного расхода топлива на всех точках замера характеристик. Об этом также свидетельствует отмеченный в эксперименте рост максимального давления сгорания. В то же время отрицательным эффектом повышения температуры сгорания является определенный рост эмиссии оксидов азота (рис. 7). Однако при этом наблюдается существенное снижение температуры отработавших газов (рис. 8).

Известно, что именно эта температура в максимальной степени влияет на теплонапряженность деталей двигателя. Этот факт, установленный в ходе моторно-стендовых испытаний полноразмерного дизеля, позволяет сделать предположение об отсутствии отрицательного влияния длительного применения топлива, содержащего МФП, на работоспособность и ресурс работы теплонапряженных деталей.

При этом наблюдается некоторое уменьшение задержки времени воспламенения, что сдвигает сгорание в зону более раннего зажигания. Уменьшение периода индукции, соответствующее сокращению времени задержки воспламенения, очевидно, объясняется отмеченным в предыдущем исследовании увеличением цетанового числа базового дизельного топлива при вводе в него МФП. Это также косвенно подтверждает активацию сгорания при вводе вышеупомянутой присадки.

Следует отметить, что увеличение максимальной температуры цикла, в силу уменьшения длительности сгорания и его более раннего начала из-за сокращения периода индукции, приводит к некоторому снижению средней

температуры цикла и температуры отработавших газов, что прямо влияет на снижение рабочих температур деталей ограждения камеры сгорания – поршня, головки цилиндров. Это косвенно влияет на повышение надежности работы и ресурса двигателя при постоянном использовании испытуемой многофункциональной присадки.

Сокращение длительности сгорания является одной из основных причин уменьшения содержания в отработавших газах остаточных углеводов и их дымности.

Сложный характер влияния концентрации МФП, выраженного оптимального ее содержания в топливе, при котором достигается максимальный эффект улучшения потребительских качеств топлива, очевидно, определяется комплексным влиянием всех трех отмеченных выше факторов – уменьшением задержки воспламенения, повышением скорости сгорания в кинетической фазе, сокращением общей продолжительности сгорания. Поскольку все эти факторы также в максимальной степени определяются составом дизельного топлива – как углеводородным составом базового топлива, так и свойствами пакета функциональных присадок, то поиск значения оптимальной концентрации МФП является сугубо индивидуальным для каждого вида и сорта топлива.

В то же время из всей совокупности проведенных исследований можно сделать вывод о достаточно высокой эффективности использования многофункциональных присадок подобного типа как в плане повышения топливной экономичности двигателя, так и улучшения его экологических показателей, надежности и ресурса работы.

Следует отметить, что в настоящее время рядом исследовательских организаций Российской Федерации активно ведется разработка отечественных вариантов МФП, ориентированных на использование в отечественных брендовых видах топлива, что позволяет полностью реализовать принцип импортозамещения в этой важной отрасли высокотехнологичной нефтехимии. **Д**

Список литературы

1. Сафонов А. С., Ушаков А. И., Чечкенов И. В. Автомобильные топлива. Химмотология, эксплуатационные свойства, ассортимент // СПб.: НПИКЦ, 2002. – 264 с.

2. Школьников В. М. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Справочное пособие // М.: Техинформ, 1999. – 596 с.

3. Шабанов А. Ю. Современная автохимия. Теория и практика применения // СПб.: Издательство «Любавич», 2016.

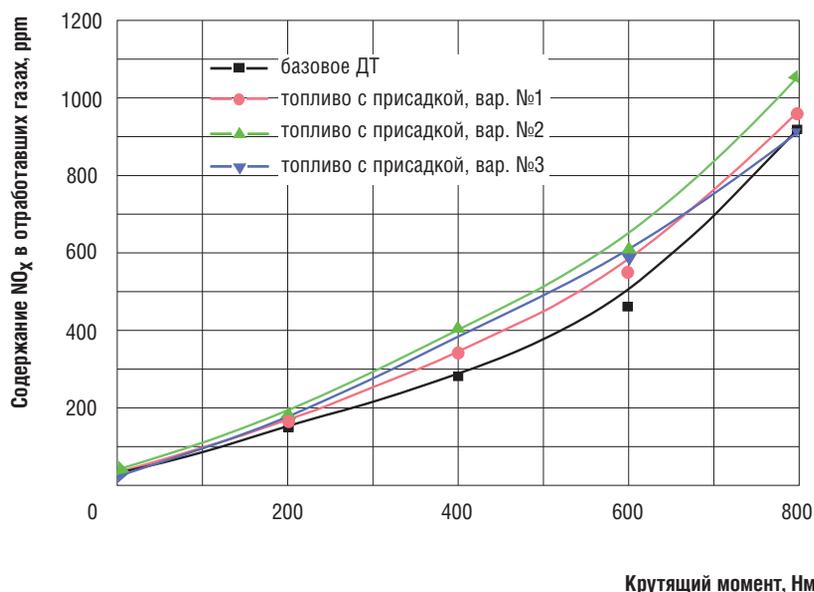


Рис. 7.

Изменение содержания оксидов азота в отработавших газах дизельного двигателя при работе на дизельных топливах с различным содержанием МФП.

Нагрузочная характеристика, частота вращения коленчатого вала 1500 об/мин

4. Химия нефти и газа, под редакцией Проскурякова В. А., Дробкина А. Е. // СПб.: Издательство «Химия», 1995. – 448 с.

5. Гальшиев Ю. В., Зайцев А. Б., Шабанов А. Ю. Химмотология. Эксплуатационные материалы для двигателей внутреннего сгорания // СПб.: Издание Политехнического университета, 2009. – 296 с.

6. Mihaylov V., Ivanov Z., Belchev S., Petkov D. Experimental evaluation of the effectiveness of a diesel fuel additive // IOP

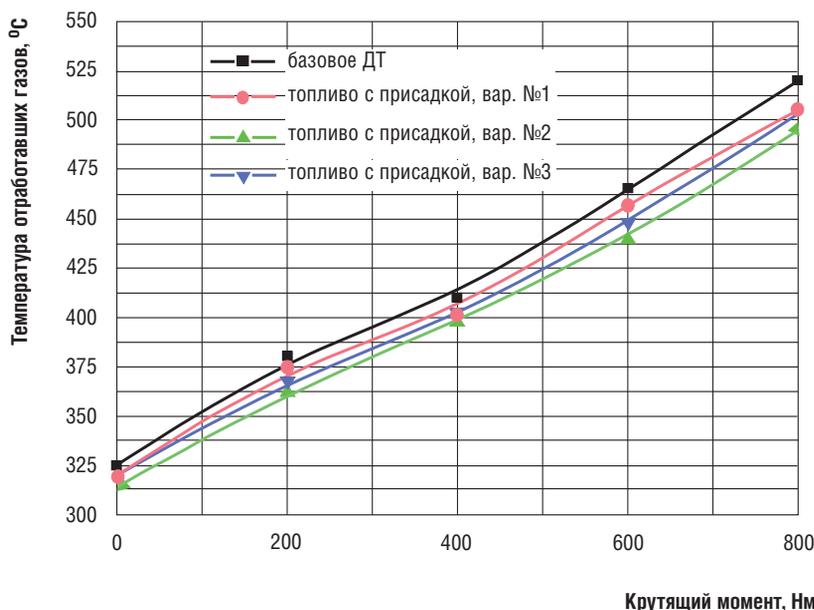


Рис. 8.

Изменение температуры отработавших газов дизельного двигателя при работе на дизельных топливах с различным содержанием многофункциональной присадки.

Нагрузочная характеристика, частота вращения коленчатого вала 1500 об/мин

Conference Series: Materials Science and Engineering 1031(1):012017. 2021. DOI:10.1088/1757-899X/1031/1/012017.

7. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Галышев Ю.В., Буторов С.В. Особенности работы моющих присадок применительно к бензинам различного группового состава // *Инженерный журнал: наука и инновации*. №11(71), 2017. – 12 с.

8. Галышев Ю.В., Зайцев А.Б., Сидоров А.А., Шабанов А.Ю. Рабочие процессы и токсичность отработавших газов судовых дизельных и газопоршневых двигателей: учебное пособие. Изд. второе перераб. и доп. // СПб.: СПбПУ, 2019. – 355 с. Электронный ресурс <http://elib.spbstu.ru/dl/2/s19-12.pdf/info>.

9. Ashok B. et al. Multi-functional fuel additive as a combustion catalyst for diesel and biodiesel in CI engine characteristics. // *Fuel* Volume 278, 2020, 11825 DOI:org/10.1016/j.fuel.2020.118250.

10. Pashayeva L. V., Aliyev S. A. Influence of additives on the quality of diesel fuel // *Azerbaijan Chemical Journal* № 2, 2023, pp. 104-110 / *AIMS Energy*, 2022, 10(1): 1-22. DOI: 10.3934/energy.2022001.

11. Безюков О.К., Жуков В.А., Маад Махфуд Моххамед. Современные присадки к дизельному топливу // *Вестник АГТУ*. – 2016. – № 1 (61). – С. 26–31.

12. Khalife E., Tabatabaei M. Demirbas A., Aghbashlo M. Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation. // *Progress in Energy and Combustion Science* 59:32-78. 2017 DOI:10.1016/j.pecs.2016.10.001.

13. Sendilvelan S., Bhaskar K. Studies on the enhancement of diesel engine combustion through the use of pib-succinimide type fuel additive and internal jets for turbulence inducement to reduce environmental pollution // *International Journal of Chemical Sciences* 14(2016):2467-2475.

14. Hu Li et al. Effect of Multifunctional Fuel Additive Package on Fuel Injector Deposit, Combustion and Emissions Using Pure Rape Seed Oil for a DI Diesel // *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, vol. 2, № 2, 2010, pp. 54–65. <http://www.jstor.org/stable/26271541>.

В Казахстане введена в промышленную эксплуатацию ветроэлектростанция мощностью 60 МВт.

Холдинг «Самрук-Энерго» ввел в эксплуатацию новую ВЭС в Енбекшиказахском районе Алмаатинской области. Мощность ветростанции – 60 МВт. На станции эксплуатируются 24 ветроэнергетические установки V-100 мощностью по 2,5 МВт производства Vestas Wind Systems, смонтирована подстанция, сопутствующая инфраструктура, подведены воздушные линии электропередачи.

Новая ВЭС будет производить 225,7 млн кВт·ч электроэнергии в год. Проект реализован АО «Самрук-Энерго» и компанией Power China. Подписан меморандум о сотрудничестве между компаниями «Самрук-Казына» и Power Construction Corporation of China Ltd. для увеличения мощности станции до 300 МВт.

ООО «ИНГК» поставит компрессорное оборудование на Ево-Яхинское месторождение, ЯНАО

Предприятие заключило договор на изготовление и поставку поршневой компрессорной установки (ПКУ-032) мощностью 1 МВт для комплексной подготовки газа на Ево-Яхинском газоконденсатном месторождении. Заказчик проекта – компания «НОВАТЭК-Юрхаровнефтегаз». ПКУ будет оснащена компрессором Ariel и приводом российского производства («Электротяжмаш-Привод», г. Лысьва).

Ранее компания «ИНГК» поставила для Ево-Яхинского линейного управления два блока компрессоров низконапорных газов (ПКУ-022) мощностью по 1 МВт с компрессором Ariel и электроприводом Siemens. Агрегаты введены в промышленную эксплуатацию.





На предприятии «Феникс» введена в эксплуатацию вторая очередь мини-ТЭС мощностью 2 МВт.

Модульная электростанция снабжает доступной электроэнергией и теплом предприятие по добыче и обработке природного камня, расположенное в Карталинском районе Челябинской области.

Вторая очередь станции, как и первая, построена в рамках энергосервисного контракта. В качестве основного генерирующего оборудования используется установка TCG 2020 производства MWM. Работы по вводу ГПЭС на условиях «под ключ» выполнила группа компаний «МКС».

В 2019 г. была введена первая очередь мини-ТЭС с использованием аналогичного оборудования. Газопоршневые установки работают в режиме когенерации. Экономия энергоресурсов будет существенной: стоимость электроэнергии с пуском новой станции для предприятия снизится почти в три раза. Срок окупаемости объекта составит около трех лет.

Основная продукция ЗАО «Феникс» – высококачественные минеральные наполнители, которые изготавливаются из белого мрамора. Сегодня на заводе открыто пять производственных линий, предприятие работает круглосуточно.

Подписан контракт с подрядчиком строительства Алмаатинской ТЭЦ-2.

ЕРС-контракт подразумевает выполнение полного цикла работ: проектирование, поставку оборудования, строительные-монтажные и пусконаладочные работы, ввод в эксплуатацию. Новая станция будет построена на площадке действующей угольной ТЭЦ. Подрядчиком стал консорциум из трех китайских компаний – Dongfang Electric International Corporation, Powerchina Sepco1 Electric Power Construction, Powerchina Hebei Electric Power Engineering.

Согласно проекту модернизации Алмаатинской ТЭЦ-2, ведется строительство газотурбинной станции электрической мощностью 600 МВт и тепловой – 957 Гкал/ч. Она будет включать в себя корпус газотурбинных блоков M701F и водогрейную котельную. Цель проекта – снижение негативного влияния станции на экологическую обстановку Алма-Аты за счет перевода ТЭЦ-2 на сжигание природного газа.

Завершение проекта и ввод в станции эксплуатацию планируется в декабре 2026 года. После модернизации, реконструкции и перевода на газ двух алмаатинских станций – ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 выбросы вредных веществ в атмосферу города снизятся на 92 %, снижение будет достигнуто за счет использования природного газа в ГТУ. На месте существующего золоотвала станции будут размещены испарительные поля для утилизации производственных стоков.

Проект нацелен на покрытие дефицита рынка электрической мощности в Южной части Казахстана. В ноябре 2022 г. было заключено кредитное соглашение между АлЭС, владельцем станции, и ЕБРР о финансировании проекта. Финансовую поддержку проекта обеспечивают Азиатский банк развития и банк развития Казахстана.

Алмаатинская ТЭЦ-2 – крупнейшая тепловая станция в Казахстане по комбинированному производству энергии с установленной электрической мощностью 510 МВт, тепловой – 1411 Гкал/ч. Она обеспечивает порядка 70% тепла и 50% электроэнергии, потребляемой в Алма-Ате. ТЭЦ-2 принадлежит АО «Алмаатинские электрические станции».

A contract has been signed with the contractor for the construction of Alma Ata TPP-2.

The contractor is a consortium of three Chinese companies - Dongfang Electric International Corporation, Powerchina Sepco1 Electric Power Construction, Powerchina Hebei Electric Power Engineering. According to the modernization project of Almaatinskaya CHPP-2 gas turbine plant with an electric capacity of 600 MW and a thermal capacity of 957 Gcal/h is being built. is being built.

КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ГАЗОВЫХ И ПАРОВЫХ ТУРБИН

<p>Siemens General Electric Dresser Rand Pratt & Whitney Rolls Royce</p>	<p>Максимальная эффективность очистки</p> <h1>TURBO-K 1:4</h1> <p>Масла: Aeroshell, Eastman, Total, Shell, Mobil</p> <p>ЗАО "Росма" - поставщик оригинальной продукции в РФ и странах СНГ www.rosma.ru, тел. +7 (831) 277-38-77</p>	<p>Alstom Kawasaki Ansaldo Energia Solar Turbines Mitsubishi Centrax</p>
--	---	--

РЕКЛАМА

Независимое программное обеспечение для газопоршневых электростанций

Д.С. Колесов – ООО «НПО ТЕХ»

In brief

Independent software for gas engine power plants

The TECH Group of Companies, founded in 2013, has specialized in the maintenance, repair and modernization of gas engine power plants of various manufacturers since the first day of its existence. The company consists of experienced specialists who were educated at manufacturing plants in Europe, which allowed them to occupy their niche in the market in the first months.

Constant development and improvement of equipment characteristics became the company's ideology, which naturally led to the launch of its own production in 2016.

From the first installation to the present moment, new solutions aimed at simplifying the operation and increasing the reliability of the machine are being implemented in each GPU of the TECH company. So, in 2018, the company's engineering department came up with the idea of creating its own software, independent of the controller supplier.

The project was named «NIKA», and the first tests on «hardware» began by mid-2019.

Как известно, Россия уже полтора года живет в условиях блокирующих санкций, причем ограничения коснулись абсолютно всех сфер деятельности. И сегодня можно констатировать, что сфера энергетики является одной из самых пострадавших, наряду с оборонными предприятиями и автомобильной отраслью. Но при активном участии отечественных предпринимателей, в течение нескольких месяцев восстановивших поставки оборудования и комплектующих западного производства в нашу страну (не без потерь), проблемы отрасли в основном решить удалось.

Однако проблема зависимости промышленного сектора от введенных санкций, как и предполагалось, оказалась намного глубже. Так, абсолютное большинство западных газопоршневых установок работают на собственном программном обеспечении и связаны между собой через удаленные серверы, находящиеся в странах Европы. Ограничение доступа к данным серверам стало «головной болью» для всех владельцев газопоршневых электростанций, моментально потерявших контроль над своим оборудованием. Как решается данная проблема, поговорим далее.

Группа компаний «ТЕХ», основанная в 2013 году, с первого дня своего существования специализировалась на обслуживании, ремонте и модернизации газопоршневых электростанций разных производителей. На предприятие пришли опытные специалисты, получившие образование на заводах-производителях в Европе, что позволило уже в первые месяцы занять свою нишу на рынке.

Постоянное развитие, улучшение характеристик оборудования стало идеологией компании, что закономерно привело к запуску собственного производства в 2016 г. С первой установки и по настоящий момент в каждой ГПУ компании «ТЕХ» реализуются новые решения, направленные на упрощение эксплуатации и повышение надежности машины. Так, в 2018 г. в инженерном отделе компании появилась идея о создании собственного программного обеспечения, независимого

от поставщика контроллеров. Проект получил название «НИКА», а первые тесты на «железе» начались уже к середине 2019 года.

К моменту введения последних санкций проект был готов к массовому внедрению, но полномасштабный запуск не форсировали, доводя систему до образцового состояния. Осенью 2022 г. зарубежные партнеры уведомили российские компании о предстоящей блокировке серверов, что послужило толчком для ГК «ТЕХ» к развертыванию собственной системы.

В течение суток специалисты компании запустили в работу собственный сервер обработки данных ГПУ, обеспечивающий также удаленный доступ к оборудованию. Исчезла потребность в использовании иностранных серверов – сегодня они располагаются в пределах нашей страны. Появилась возможность работать по проводным сетям и беспроводным мобильным сетям (GSM), повысилась безопасность обмена данными благодаря шифрованию. Бонусом стала обработка искусственным интеллектом полученных данных в режиме онлайн и выдача предложений по корректировке работы ГПУ ТЕХ для сервисных инженеров отдела мониторинга компании.

Сегодня уже более ста установок по всей стране используют систему «НИКА», а специалисты ГК «ТЕХ» продолжают работать над подключением еще не охваченных электростанций и совершенствованием системы.

Подробнее о работе программного обеспечения «НИКА» можно узнать, обратившись к специалистам ООО «НПО ТЕХ». **TD**

➔ Панель управления ТЕХ-Е, система управления НИКА





Hyundai Heavy Industries ввела в эксплуатацию электростанцию на Багамских островах.

Электростанция построена в столице Багамских островов – г. Нассау. ГПЭС работает в простом цикле, ее общая электрическая мощность составляет 27 МВт. Станция была создана на базе 16 двухтопливных энергоблоков NiMSEN 6H27DF мощностью по 1,7 МВт. Четырехтактный двигатель 6H27DF имеет 6 цилиндров рядного расположения, диаметр цилиндра 270 мм, ход поршня 330 мм.

Основным топливом является природный газ, резервным – дизельное топливо. Удельный расход топлива при работе на дизельном топливе при 100 %-й нагрузке составляет 186 г/кВт·ч.

Станция предназначена для снятия пиковых нагрузок в сети, а также для поддержания баланса в энергосистеме региона, в которой используется большое количество СЭС и ВЭС.

Энергоблоки Урал-6000 смонтированы на ГТЭС Средне-Назымского месторождения.

АО «ОДК–Авиадвигатель» выполняет контракт на поставку четырех энергоблоков Урал-6000 мощностью по 6 МВт для Средне-Назымского газового месторождения (ХМАО). Заказчик – компания «РИТЭК»

Энергоблоки будут эксплуатироваться на открытой площадке в диапазоне температур окружающего воздуха от –52 °С до +33 °С. Блочная конструкция, разработанная специалистами Пермского КБ, обеспечивает максимально эффективное использование всего комплекса оборудования электростанции.

Установки будут работать в базовом режиме в простом цикле. В составе энергоблоков Урал-6000 применяется российское оборудование, в том числе газотурбинные установки ГТУ-6П.

Средне-Назымское месторождение расположено в 100 км к юго-востоку от месторождения им. В. Н. Виноградова и имеет схожую с ним геологию, с преобладанием низкопроницаемых коллекторов.

Ural-6000 power plants are installed at the site of Sredne-Nazymkoye field.

UEC-Aviadvigatel JSC is fulfilling a contract for the supply of four Ural-6000 power plants each rated at 6 MW for the Sredne-Nazym gas field (KhMAO). The customer is the RITEK company. The plants will operate on the base mode in a simple cycle.

На Центральном ремонтно-механическом заводе применяется новое технологическое оборудование.

На предприятии «ЦРМЗ» введена в эксплуатацию семиосевая измерительная машина Tomelleri Engineering Space Plus. Диапазон измерений составляет 3200 мм, что позволяет сканировать крупные детали с минимальной погрешностью.

Оборудование оснащено мобильным стендом для перемещения в цеховых условиях, а также магнитным основанием для установки измерительных приборов на горизонтальную поверхность без повторной калибровки.

Прибор позволяет проводить высокоточное сканирование благодаря мультисенсорному анализу данных: на рукоятке размещается не только комбинированный датчик, но и бесконтактный лазерный сканер Nikon Metrology с шириной линии 100 мм, что значительно снижает погрешность измерений.

Для успешного освоения новой технологии в программу пусконаладочных работ также входило обучение специалистов завода. Сотрудники успешно прошли аттестацию, овладев навыками сканирования и создания 3D-моделей.

Координатно-измерительная машина будет активно использоваться в производственных процессах, в частности при разработке деталей насосов, в рамках программы освоения новых изделий.

New technological equipment has been put into operation at the Central Mechanical Repair Plant.

The seven-axis measuring machine Tomelleri Engineering Space Plus has been put into operation at the CRMP enterprise. The measurement range is 3200 mm, which allows to scan large parts with minimal error. The equipment is equipped with a mobile stand for moving in shop conditions, as well as a magnetic base for installing measuring instruments on a horizontal surface without recalibration.



АО «Газэнергосервис» – главная ремонтная база страны

Р.В. Алдохин, К.В. Симутин – ООО «Газпром энергохолдинг промышленные активы»
П.Е. Дрягин – АО «Газэнергосервис»

In brief

**Gazenergoservice
JSC – the main repair
base of the country**

The history of Gazenergoservice began after the end of the Great Patriotic War, when the issue of restoring the energy economy of the oil industry and bringing it to a modern scientific and technical level became acute. To solve this problem, in 1946 the Orgenergoneft Union Office was organized, the main specialization of which was the installation and commissioning of steam and gas turbine plants, internal combustion engines and compressors for the oil industry. The rapid development of the gas industry in the 1960s required the creation of a specialized enterprise that would take over installation and commissioning of gas and steam turbines.

История образования АО «Газэнергосервис» началась после окончания Великой Отечественной войны, когда остро встал вопрос о восстановлении энергетического хозяйства нефтяной промышленности и выведении ее на современный научно-технический уровень. Для решения этой задачи в 1946 году была организована Союзная контора «Оргэнергонефть», основной специализацией которой стали монтаж и наладка паровых и газовых турбоагрегатов, двигателей внутреннего сгорания и компрессоров для нефтяной отрасли.

Бурное развитие газовой индустрии в 1960-х годах требовало создания специализированного предприятия, которое взяло бы на себя функции по монтажу и наладке газовых турбин, газомотокомпрессоров, котлов, электротехнического оборудования, контрольно-измерительных приборов и автоматики магистральных газопроводов. Опыт специалистов Союзной конторы «Оргэнергонефть» для решения этой задачи был незаменим. В результате ряда структурных преобразований, присоединения нескольких специализированных строительных и монтажных организаций к 1970 году было сформировано головное производственное объединение по ремонту энергомеханического и энергосилового оборудования – «Союзгазэнергоремонт» с 15 филиалами. Филиалы располагались на территории от Заполярья до южных границ нашей страны,

от Центральных районов до Восточной Сибири, осуществляя широкий спектр работ – от монтажа и пусконаладки до ремонта и обслуживания ключевого энергетического оборудования.

Специалисты предприятия принимали участие в строительстве экспортных газопроводов: Уренгой – Помары – Ужгород, «Союз». Работа велась по нескольким направлениям: проектирование ремонтных баз, разработка конструкторско-технологической документации, совершенствование управления ремонтным производством, подготовка кадров для проведения наладки и ремонта новых видов оборудования. Вместе с другими организациями ПО «Союзгазэнергоремонт» участвовало в пусконаладочных работах на 12 компрессорных станциях с различными типами газоперекачивающих агрегатов.

Главной задачей предприятия в этот период было организовать оперативное диспетчерское управление деятельностью всех звеньев централизованной системы обеспечения запасными частями и систем ремонта газоперекачивающего оборудования. Для ее решения впервые в практике Министерства газовой промышленности ПО «Союзгазэнергоремонт» начинает оснащать системами распределения обработки данных предприятия, выполняющие ремонты газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях, управления баз и складов запасных частей к ГПА, заводы и ремонтные базы, осуществляющие агрегатно-узловой ремонт ГПА.

Экспортные газопроводы оснащались сложным, в основном импортным, оборудованием. Это предъявляло принципиально новые требования к квалификации эксплуатирующего, ремонтного и оперативного персонала всех уровней. Чтобы решить эту проблему, в объединении был создан учебно-курсовой комбинат, где повышал квалификацию ремонтный персонал. Кроме теоретических занятий, ежегодно организовывались практические курсы на ведущих заводах-изготовителях газоперекачивающего оборудования.

С Строительство завода по ремонту газотурбинного оборудования для газопровода Уренгой – Помары – Ужгород, г. Брянск, 1989 г.



К концу 1980-х годов объединение «Союзгазэнергомонтаж» было преобразовано в государственное предприятие «Союзгазификация». В структурных подразделениях «Союзгазификации», расположенных по всей территории страны на наиболее важных направлениях транспорта газа, трудились высококвалифицированные специалисты. Они имели огромный опыт ремонтов ГПА и других объектов газовой промышленности, выполняя свою главную задачу – обеспечение бесперебойной подачи газа потребителям с минимальными затратами.

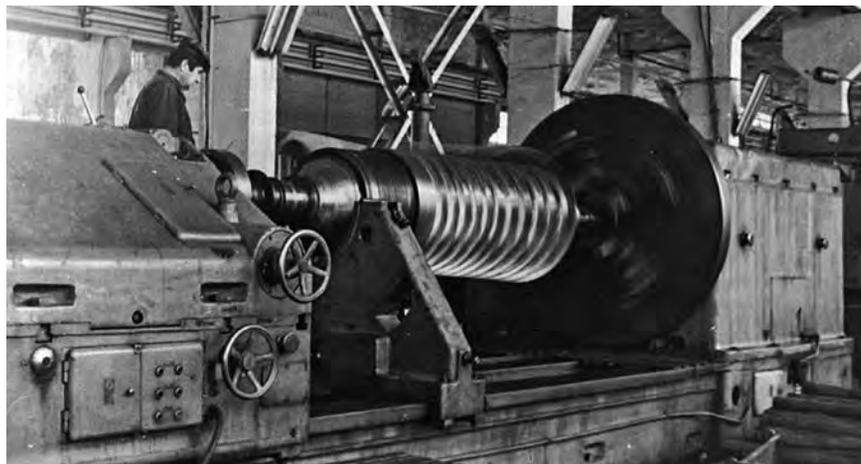
Реформирование отечественной газовой отрасли затронуло и государственное предприятие «Союзгазификация». В 1991 году приказом концерна «Газпром» оно было переименовано в государственное предприятие «Газэнергосервис». Ряд ремонтных производственно-технических предприятий, ранее входивших в состав «Союзгазификации», был передан газотранспортным объединениям.

В 1993 году ГП «Газэнергосервис» преобразовано в дочернее акционерное общество «Газэнергосервис» – его основой стали четыре машиностроительных предприятия, которые являются сегодня филиалами АО «Газэнергосервис», – Щекинский завод «РТО», завод «Ротор», завод «Турборемонт» и завод «Турбодеталь» им. И.И. Соколовского.

Щекинский завод

Щекинский завод по ремонту технологического оборудования (РТО) основан в 1965 году, когда были возведены основные цеха предприятия: главный корпус, где разместились механосборочный, инструментальный и ремонтно-механический цехи, корпуса цеха горячих работ и цеха по ремонту электрооборудования. Новое предприятие должно было специализироваться на изготовлении запасных частей, сменных узлов и деталей для эксплуатируемого на магистральных газопроводах оборудования и на проведении ремонта газовых турбин, газомоторных двигателей, компрессоров, насосов, арматуры и другого оборудования как в стационарных условиях, так и силами выездных бригад.

Настоящий расцвет завода «РТО» пришелся на 1970-е годы. Это было время становления и формирования коллектива, на развивающееся предприятие приходили молодые специалисты. Завод наращивал объемы производства, потребовались новые производственные мощности. Эстакаду хранения металла перестроили в цех крупных металлоконструкций, в котором было организовано изготовление нестандартизированного оборудова-



Механическая обработка рабочих поверхностей ротора турбокомпрессора ГТК-10

дования – воздухоподогревателей для газовых турбин, теплообменников, АГРС. В тот же период были построены материальный склад, складские и производственные площадки, трансформаторная подстанция и другие объекты энергоснабжения.

Резкое увеличение выпуска теплообменников потребовало механизации трудоемких процессов. Для этих целей была разработана новая конструкция модульных теплообменников, спроектирована и пущена в эксплуатацию высокочастотная установка спирального орбления труб со скоростью сварки до 60 м/мин.

В связи с увеличением объема ремонтных работ был создан специальный участок ремонта газовых турбин, оборудованный станками для обработки крупногабаритных изделий. Параллельно шла реконструкция в главном корпусе – устанавливалось оборудование для увеличения производства лопаток к газовым турбинам. Важной вехой в истории завода стало освоение в 1982 году производства рабочих лопаток ТВД первой ступени и ТНД второй ступени к агрегату ГТК-10-4, выпуск которых в последующие 15 лет составлял весомую долю в общих объемах производства.

Проведение замеров рабочих лопаток осевого компрессора ротора турбокомпрессора ГТК-10



➤ Ремонтный фонд:
роторы турбокомпрессора
и силовой турбины ГТК-10
на заводе «Ротор»



В 1986 году построен литейный цех мощностью 10 тыс. тонн литья в год, что позволило обеспечить собственными заготовками из специального чугуна производство запасных частей к газомотокомпрессорам. Также началось изготовление анодных заземлителей из железокремниевых малорастворимых сплавов для защиты газопроводов от коррозии в различных природно-климатических зонах.

К началу 2000-х гг. завод пришел стабильно работающим, причем не только в регионе, но и в отрасли в целом, был обеспечен весомый портфель заказов, что позволило всем подразделениям работать с полной загрузкой.

Завод «Ротор»

История создания камышинского завода «Ротор» связана с началом строительства газопровода «Союз» для обеспечения природным газом стран, входивших в Совет экономической взаимопомощи, и освоения Оренбургского газового месторождения. В объект строительства так называемого чехословацкого участка, проходившего по территории Волгоградской области, входило пять компрессорных станций и завод по ремонту импортного газоперекачивающего оборудования. Строительство газопровода началось в 1975 году со станции Антиповка, и к концу 1978-го были сданы в эксплуатацию все пять компрессорных станций: Антиповка, Палласовка, Фролово, Калининская, Сохрановка.

Строительство завода началось в 1979 году силами чехословацкой организации «Промысловые Ставбы» (г. Брно), и уже в 1981-м приказом министра газовой промышленности в состав производственного объединения «Союзгазэнергоремонт» был включен экспериментальный завод по ремонту и изготовле-

нию запасных частей к газоперекачивающему оборудованию в г. Камышине Волгоградской области. К этому времени завод состоял из производственного корпуса площадью 12 тыс. м², двух складов запчастей и административных помещений. На предприятии были организованы основные производственные подразделения: механосборочный, кузнечно-термический и сварочно-заготовительный участки, участок ремонта горячих частей турбин, участок воздушных фильтров.

В январе 1982 года на заводе было запущено производство, а уже через два года он вышел на проектную мощность. За этот короткий срок специалисты предприятия смогли внедрить сложнейшие технологические процессы: микроплазменную и аргонодуговую плазменную сварку, газоплазменное напыление поверхностей ремонтируемых деталей, электрошлаковый переплав высоколегированных импортных сталей с целью использования металла для изготовления новых деталей, борирование колес роторов и восстановление лопаток отечественных роторов.

Кроме того, в рекордно короткие сроки был освоен ремонт и изготовление продукции, ранее не предусмотренной проектом завода: восстановительный ремонт роторов нагнетателей и различных элементов газотурбинных установок, изготовление аналогов импортных роторов, ремонт и изготовление элементов камер сгорания.

На сегодня производственные возможности завода включают в себя не только изготовление широкого спектра запасных деталей к различным типам газоперекачивающего и насосно-компрессорного оборудования, но и капитальный ремонт газотурбинных установок отечественных и импортных ГПА.

Завод «Турборемонт»

Строительство Центральной ремонтной базы по обслуживанию строящегося газопровода Уренгой – Ужгород в Брянске было инициировано Министерством газовой промышленности в 1982 году. Проектировщиком выступил ленинградский институт «Гипроспецгаз», строительство осуществляли польские строительные организации. Станочное, технологическое, термическое оборудование поставлялось в соответствии с заключенным контрактом между Мингазпромом и немецкой фирмой Liebherr.

После завершения строительства по приказу Мингазпрома Брянский завод по ремонту газотурбинного оборудования вошел в состав производственного объединения по монтажу, наладке и техническому обслуживанию систем

газоснабжения «Союзгазификация». С 1991 г. завод «Турборемонт» становится одним из четырех ремонтных заводов акционерного общества «Газэнергосервис». За годы работы на предприятии произведен заводской ремонт около 700 роторов турбин ГПА и модулей авиационных двигателей.

Завод «Турбодеталь»

История создания завода «Турбодеталь» имени И.И. Соколовского, как и других филиалов компании «Газэнергосервис», связана с периодом бурного роста добычи газа в 1970-х годах. Для скорейшего ввода в эксплуатацию новых газопроводов было приобретено около 500 газоперекачивающих агрегатов иностранного производства. Для надежной работы постоянно требовались запасные части, которые на тот момент можно было приобрести только у зарубежных партнеров.

В 1980-х годах стала очевидной необходимость организации производства запасных частей к газоперекачивающим агрегатам на отечественных предприятиях. Требовалось создание нового завода, специализирующегося на производстве точнолитых деталей для турбин ГПА. Так появился проект завода «Турбодеталь» в подмосковном Наро-Фоминске. В 1989 году новое предприятие в составе производственного объединения «Союзгазификация» было введено в эксплуатацию. Завод «Турбодеталь» становится одним из самых передовых предприятий в Советском Союзе, специализирующимся на изготовлении лопаток турбин для газоперекачивающих агрегатов и оснащенным высокопроизводительным современным оборудованием. В производстве использовались самые передовые на тот момент технологии литья по выплавляемым моделям и механической обработки.

На начальном этапе освоения производства точнолитых деталей на заводе изготавливались только четыре вида лопаток рабочих турбин высокого и низкого давления к импортным газоперекачивающим агрегатам. В последующие годы на предприятии активно проводятся работы по замене импортных материалов, применяемых в производстве, отечественными аналогами, осваивается выпуск различных точнолитых деталей, которые используются в качестве запасных частей при ремонте импортных и отечественных ГПА. Сегодня предприятие предлагает более ста сорока наименований рабочих и направляющих лопаток, деталей камер сгорания и других изделий для газовых турбин как отечественного, так и зарубежного производства.

Образованная в 1993 году компания «Газэнергосервис» консолидировала многолет-



ний опыт монтажа, наладки и технического обслуживания широкого перечня оборудования, применяемого на магистральных газопроводах и нефтегазовых предприятиях, — опыт, накопленный многими поколениями профессионалов, работавших над созданием и развитием газотранспортной системы нашей страны.

Объединив лучшие отраслевые предприятия, АО «Газэнергосервис» стало признанным лидером в области производства запасных частей для импортных и отечественных газоперекачивающих агрегатов, обеспечивая таким образом надежную работу газотранспортной инфраструктуры страны. Сегодня «Газэнергосервис» является частью большой команды промышленной группы «Газпром энергохолдинг индустриальные активы», а это значит, что многие производственные задачи получили новый масштаб, а перед коллективом открылись новые перспективы участия в крупных инфраструктурных проектах. **Д**

Керамическая литейная форма рабочих лопаток турбины в литейном цехе завода «Турбодеталь» имени И.И. Соколовского, г. Наро-Фоминск

Исторический символ завода «Ротор». Водружен в честь основателей предприятия – газовиков СССР и строителей ЧССР в сентябре 1982 г., г. Камышин



Модульные подходы и алгоритмы при создании паровых турбин

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

Ключевые слова:

паровая турбина, турбоустановка, паротурбостроение, энергомашиностроение, конкурентоспособность, модуль, модульный подход, унификация, алгоритм, жизненный цикл, трудоемкость

Аннотация

К важнейшим вопросам развития паротурбостроения относится совершенствование инструментов и средств разработки, производства, эксплуатации и управления жизненным циклом (ЖЦ) основного и вспомогательного оборудования.

Достаточно часто мероприятия по совершенствованию подготовки производства и собственно изготовления проводятся несогласованно, без подчинения общей цели, с различием в подходах, инструментах и средствах решения. Это приводит к дублированию работ, отсутствию общей линии, а иногда и к несовместимости.

Нерациональное и неравномерное решение задач должно меняться в пользу системного подхода к развитию предприятия, его продуктов и инструментов управления ЖЦ выпускаемой продукции.

Описаны конструкции и подходы к разработке паровых турбин и турбоустановок зарубежных и российских турбинных производителей. Обозначено, что модульный принцип «LEGO» и единая библиотека стандартных элементов позволяет добиться большей эффективности жизненного цикла паротурбинного оборудования и более высоких его средневзвешенных показателей, чем использование «базовой платформы», что объясняется необходимостью при таком принципе создания оптимизированной «скорлупы» с ограниченными возможностями опционной замены частей и систем и принципиально схожими с индивидуальным проектированием подходами.

Предложен алгоритм модульного подхода к созданию паровой турбины и совершенствованию ее конструкции при управлении жизненным циклом.

Modular approaches and algorithms for the creation of steam turbines

A. Yu. Kultyshev, PhD of Engineering – Deputy Director General – Technical Director, Gazprom energo holding industrial assets LLC, al.kultyshev@gehia.ru

Key words:

steam turbine, turbine plant, steam turbine manufacturing, power engineering, competitiveness, module, modular approach, unification, algorithm, life cycle, labor intensity

Abstract

The most important issues in the development of steam turbine engineering include the improvement of tools for the development, production, operation and life cycle management of the main and auxiliary equipment.

Quite often, measures to improve the preparation of production and actual manufacturing are carried out inconsistently, without subordination to a common goal, with differences in approaches, tools and means of solution. This leads to duplication of work, lack of a common line, and sometimes incompatibility.

Irrational and uneven problem solving should change in favor of a systematic approach to the development of the enterprise, its products and tools for managing the housing and communal services of manufactured products.

The designs and approaches to the development of steam turbines and turbine plants of foreign and Russian turbine manufacturers are described. It is indicated that the modular principle of LEGO and a single library of standard elements makes it possible to achieve greater efficiency of the life cycle of steam turbine equipment and its higher weighted averages than using the base platform, which is explained by the need for such a principle to create an optimized shell with limited options for optional replacement of parts and systems and fundamentally similar to individual design approaches.

An algorithm for a modular approach to creating a steam turbine and improving its design in life cycle management is proposed.

В Российской Федерации реализована Программа договоров о предоставлении мощности (ДПМ), которая позволила внести значительный вклад в обновление фондов электрогенерации. За период реализации Программы ДПМ с 2010 по 2016 гг. реализовано более 130 проектов общей мощностью 30 ГВт, большая часть из которых основана на использовании современных образцов оборудования. С 2022 по 2035 гг. в России будет реализован следующий этап Программы ДПМ, так называемый ДПМ-штрих, с суммарным ограничением на объем модернизируемой мощности 39 ГВт.

До 2025 года будет реализована инвестиционная программа по развитию электроэнергетики Дальневосточного федерального округа, параллельно реализуются проекты по строительству мусоросжигательных заводов. Во всех программах реализация будет осуществляться в сжатые сроки, с высокими требованиями к оборудованию и подрядчикам, что обусловлено высококонкурентной средой участников рынка электроэнергии и дефицитом ресурса производителей основного тепломеханического оборудования и подрядчиков строительства и реконструкции объектов энергетики. Из этого следует, что основное тепломеханическое оборудование, в том числе и паротурбинное, должно иметь высокие технико-экономические и эксплуатационные показатели, что позволит добиваться победы в конкурсах, в короткий период реализовать строительство или реконструкцию объекта, а затем эффективно и надежно его эксплуатировать. Таким образом, очевидна актуальность темы данной работы, связанной с разработкой и совершенствованием паровых турбин и паротурбинных установок мощностью до 850 МВт для тепловых электростанций.

Трудоемкость работ по созданию и производству сложного, наукоемкого основного и вспомогательного оборудования настолько велика, что отказ от индивидуального проектирования и производства является вполне закономерным – как технически, так и экономически. Следует использовать не только унификацию, но и четко отлаженные принципы и методологию, позволяющие применять глубоко проработанный модульный подход с разносторонне и многофакторно оптимизированной архитектурой конструкции и компоновки оборудования и собственно самих используемых модулей.

Развитие отечественного энергомашиностроения, особенно в последние годы, показало, что текущий и перспективный уровень конкурентоспособности может быть обеспечен

за счет радикального повышения степени унификации и внедрения модульных конструкций паровых турбин. Это положение также подтверждается направлением развития основных мировых компаний-разработчиков и производителей такого оборудования.

Предел унификации, типизации и стандартизации ограничивает и останавливает развитие конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) оборудования и его изготовления, поэтому нужна новая идея, которая обеспечит единый системный подход к развитию и росту энергомашиностроительного предприятия, вплоть до взрывного, на фоне остановившихся конкурентов. Такой новой идеей, или идеологией может стать методологическое применение модульного принципа создания оборудования [1].

Реализация новой идеи по внедрению модульного проектирования основного и вспомогательного паротурбинного оборудования создаст возможность разрабатывать и совершенствовать паровые турбины и паротурбинные установки на основе новых принципов и технических решений. Это позволит добиться высоких технико-экономических и эксплуатационных показателей при сниженных затратах на КТПП и изготовление оборудования, а также с минимальными временными и финансовыми затратами выполнять реконструкцию и обслуживание такого действующего оборудования путем смены модулей.

Стоит отметить, что исходя из опыта разработки паровых турбин можно сделать вывод о возможности достижения доли унификации 50–60 % во всем номенклатурном ряду и 90 % внутри группы ряда, т.е. ограниченного ряда (семейство или серия турбин), что достигается как раз при использовании модульных принципов и подходов к КТПП. Но этого, например, невозможно достичь в гидротурбостроении, где из-за особенностей условий эксплуатации объектов доля унификации даже в близких по конструкции образцах номенклатурного ряда продукции предприятия иногда едва достигает 15 % (хотя при правильном выстраивании типоразмерного ряда аналогичные показатели унификации достигались даже и в гидротурбостроении) [2]. Аналогичный показатель в газотурбостроении не превышает 20–30 %, что объясняется большей, чем в паротурбостроении, наукоемкостью, требующей выполнения трудоемких и длительных лабораторных, стендовых и натурных испытаний и ведущей, как следствие, к производству и дальнейшему сопровождению на протяжении всего ЖЦ оборудования, ограниченного несколькими образцами ряда.

Подходы таких производителей, как General Electric, Siemens AG (в настоящее время Siemens Energy, с разной номенклатурой выпускаемой продукции и разными турбинными школами – «немецкой» и «чешской»), Alstom (в 2015 г. энергетическое направление и соответствующая ему номенклатура вошла в GE), Mitsubishi Power (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.), Ansaldo Energia, Doosan Skoda Power, MAN Energy Solutions, АТ «Турбоатом» (в настоящее время АО «Украинские энергетические машины»), АО «Силовые машины» (СКБ «Турбина», Ленинградский металлический завод), ПАО «КТЗ» и АО «УТЗ» с различными конструкциями паровых турбин и вспомогательного оборудования, несомненно, формируют полную картину о конструкциях и школах мировой практики паротурбостроения.

Ограничение по мощностному и функциональному ряду газовых турбин не позволяет широко использовать ни унификацию, ни модульные подходы и даже параметрическое проектирование, не говоря уже о масштабировании с последующим проведением полномасштабных расчетно-аналитических и экспериментальных исследований. В мировых профессиональных кругах турбостроителей негласно уже второй образец паровой турбины семейства или серии, даже с некоторыми функциональными изменениями относительно первого, головного образца, принято считать серийным, в то время как в газотурбостроении только 51-й образец газовой турбины, когда в ней уже учтены все необходимые доработки на основе опыта эксплуатации, считают серийным образцом.

Разберем только некоторую практику паротурбостроения мировых производителей. Компания General Electric разрабатывает и производит паровые турбины модульной конструкции – в ее портфолио есть несколько номенклатурных рядов паровых турбин для ПСУ и ПГУ ТЭС, геотермальных и атомных электростанций, а также станций, использующих несколько различных «модульных платформ» паровых турбин. Каждая модульная платформа позволяет учитывать широкий диапазон применения турбины и условий ее эксплуатации, то есть разработку и эксплуатацию турбин и турбоустановок данной платформы при разных параметрах пара на входе, отборах и принципиальных тепловых схемах.

Компания Siemens разрабатывает и производит паровые турбины модульной конструкции, в которую заложена идеология эффективного обеспечения ЖЦ оборудования. При этом нужно отметить, что, учитывая необходимость ограничить номенклатурный ряд турбин и библиотеку модулей, а также сократить затраты на адаптацию к требованиям проекта и оптимизацию модулей под такие требования, технико-экономические показатели паровых турбин Siemens уступают аналогам, индивидуально разработанным и произведенным конкурентами, но которые, в свою очередь, по показателям надежности и эксплуатации уступают серийно выпускаемым образцам компании Siemens.

Анализ оптимальности показателей (технико-экономические, массогабаритные, оптимальность конструкции) одноцилиндровых паровых турбин различных производителей с разными подходами к проектированию: «базовая платформа», модульный принцип, индивидуальное проектирование – показал, что нельзя делать выводы о преимуществах подходов для конкретных конструкций паровых турбин определенной мощности и о выявленных закономерностях. Однако с учетом опыта реализации различных проектов паровых турбин и вспомогательного оборудования турбоустановок автор сделал следующие выводы:

1. При разработке паровых турбин индивидуальной конструкции можно добиться их максимальных технико-экономических показателей, превышающих аналогичные показатели подобных образцов техники, разработанной с использованием унификации, модульных подходов и «базовой платформы» для модельного ряда. Однако достижение таких успехов сопровождается одновременно увеличением трудоемкости, длительности и себестоимости КТПП и собственно производства такого оборудования, но самое важное – снижается

эффективность обслуживания ЖЦ и, как следствие, значительно увеличивается его стоимость. Это обусловлено тем, что предприятие-разработчик и производитель не может позволить себе преимущественно затрачивать трудовые, материальные, временные и финансовые ресурсы на разработку и сопровождение документации на индивидуальные детали, сборочные единицы, системы и оборудование в целом в большем объеме, чем на выпускаемые серийно для унифицированных и модульных конструкций;

2. При формировании отдельных модельных рядов и номенклатурного ряда предприятия в целом из индивидуальных проектов паротурбинного оборудования не удастся добиться таких показателей, которые превышали бы аналогичные показатели подобных образцов техники, разработанной с использованием унификации, модульных подходов и «базовой платформы», так как на индивидуальные проекты будут затрачиваться значительные вышеупомянутые ресурсы, причем не только на их разработку и внедрение, но и сопровождение ЖЦ на высоком уровне эффективности. Поэтому даже если в отдельных специальных проектах будет использоваться оптимальная для проекта унификация и будут достигаться высокие показатели оборудования и его ЖЦ, то в диапазонах различных значений мощности, параметров пара и разного применения между такими проектами будут разработаны проекты их адаптации под другие условия и назначение. Причем в случае неоптимально выстроенной классификации и построения номенклатурного ряда, то есть неправильно выбранных базовых моделей, «провалы» проектов адаптации будут все более значительными;

3. При любом конструкторском подходе можно добиться максимальной эффективности ЖЦ и высоких средневзвешенных показателей всего номенклатурного ряда оборудования предприятия, т.е. высоких показателей всех образцов, только при одновременном «закладывании» всех конструктивных особенностей всех типов и модификаций оборудования исходя из конструктивной преемственности, позволяющей добиться оптимальности составных частей оборудования;

4. В случае если в одновременно проектируемом ряду будет использоваться правильное разделение на составные части, т.е. сохранять их автономность и преемственность, то можно будет и в следующих модификациях автономно выполнять оптимизацию этих составных частей и заменять их другими. Таким образом, именно модульный подход и в целом модульная концепция проектирования

позволяет добиваться максимальной эффективности ЖЦ оборудования и его высоких показателей с возможностью их малозатратной оптимизации;

5. Модульный принцип проектирования, а точнее, использование модульной концепции создания и совершенствования номенклатурного ряда паровых турбин, в которую заложен принцип «LEGO» и единая библиотека стандартных модулей/подмодулей, позволяет добиться большей эффективности ЖЦ всего оборудования турбинного предприятия и более высоких средневзвешенных показателей оборудования, чем использование «базовой платформы», то есть преимущественно отдельных библиотек для каждой из платформ, создаваемых для серии, семейства с большей оптимизацией составных частей для данного ограниченного модельного ряда.

Такой вывод объясняется фактами, указывающими на создание оптимизированной «скорлупы» с ограниченными возможностями опционной замены частей и систем, что вполне доказывается ограниченностью затрат ресурсов на развитие опций и самой платформы, которые, как правило, развиваются дискретно по отдельному проекту, что является несколько схожим определением с индивидуальным проектированием за одним лишь исключением: проектируется «базовая платформа», то есть «серия», а не индивидуальный проект. Такая «серия» со своими функциональными ограничениями библиотеки «базовой платформы» предлагается и продается заказчику, который вынужден адаптировать проект к турбине, а не наоборот, что «позволительно» только Siemens.

До недавнего времени при достаточности размеров мировых рынков сбыта Siemens удавалось практиковать включение «базовой платформы» в проекты своих промышленных паровых турбин против предложений поставки конкурентов с короткими сроками поставки и сравнительно высокими показателями при достаточно гибкой ценовой политике, но в ущерб показателям проекта в целом. Такие проекты адаптации использования паровой турбины, профиль которой подбирается на основании библиотеки и схемы «базовой платформы», также касаются модульных концепций. В таких случаях в турбоустановке, например, вынужденно используется редуктор, так как у поставщика в номенклатурном ряду нет собственного генератора с нужными характеристиками, а на турбину с генератором другого производителя не предоставляются гарантийные обязательства, т.е. поставка осуществляется только

«пакетом», который не является оптимальным для проекта.

Завершая обзор использования компанией Siemens концепции модульного проектирования, необходимо отметить, что она широко применяет модульный подход к разработке и сопровождению ЖЦ своего оборудования и имеет самый богатый опыт формирования модульных конструкций оборудования (что в том числе связано с «впитыванием» опыта разных школ турбостроения). Концепция распространяется на весь номенклатурный ряд, на все модельные ряды паровых турбин. При этом важно отметить, что при формировании профиля паровых турбин и ПТУ просматриваются 4 конструктивных уровня модульной идеологии, в то время как у других производителей – 3 или максимум 3,5 уровня, что позволяет добиваться максимального эффекта от внедрения модульных конструкций, начиная с достигаемой доли унификации и заканчивая надежностью оборудования и сокращением сроков разработки, производства и технического обслуживания.

Явно выраженным уровнем модульной концепции стало внедрение «улучшенной платформы», позволяющей создавать из стандартных компонентов паротурбинные агрегаты различных типов. Конечно, такой подход используется другими производителями, однако комбинирование новой паровой турбины или турбоагрегата требует значительных переделок по составным элементам имеющегося оборудования, что не позволяет положительно оценивать такую работу по формированию нового оборудования из стандартных библиотечных компонентов турбин. В *таблице* представлена структура уровней модульной концепции компании Siemens.

Mitsubishi Power располагает широким номенклатурным рядом паровых турбин [3], что позволяет гибко адаптировать каждую турбину в соответствии с потребностями проекта, сохраняя высокую эффективность и надежность оборудования. Паровые турбины малой и средней мощности создаются на основе концепции модульного проектирования (MD), в которой используются стандартизированные модули, такие как клапанные коробки и выхлопные патрубки части низкого давления. Эти стандартные модули выбираются в соответствии с требованиями проекта и объединяются для формирования конструкции турбины по потребностям заказчика.

Паровые турбины производства Ansaldo Energia имеют модульную конструкцию и, как следует из материалов сайта компании [4], «...основаны на модульной концепции для

снижения технических рисков и времени изготовления, а также обеспечения высокой надежности.

Каждая модель представляет собой комбинацию проверенных модулей, предварительно изготовленных в различных размерах, чтобы обеспечить широкий диапазон мощностей и областей применения. Доступны различные варианты материалов для соответствия различным условиям пара, вплоть до самых передовых сверхкритических (600/620 °С)».

Номенклатурный ряд паровых турбин компании Doosan Skoda Power [5] совмещает использование модульной конструкции, решений, базируемых на модульном дизайне турбин серий MTD 10...MTD 80, со специальными проектами паровых турбин. Такая синергия модульной концепции со специальными проектами позволяет эффективно обеспечить индивидуальные требования проектов в диапазоне мощности от 3 до 1500 МВт, с температурами свежего пара от 230 до 621 °С и давлением от 3 до 30 МПа. При этом турбины используются для привода генераторов, насосов, компрессоров.

Компания MAN Energy Solutions также использует концепцию модульного проектирования и компоновки паровых турбин [6], номенклатурный ряд которых охватывает турбогенераторные установки мощностью до 180 МВт. Концепция модульной конструкции включает в себя стандартизированные модули: секции подвода, выхлопа, отборов/подводов, корпуса подшипников, регулирующих ступеней и т.д. Из стандартных модулей формируется и профиль турбоагрегата – паровая турбина, редуктор, генератор, система маслоснабжения, смазки, система регулирования. Такой модульный подход позволяет значительно сокращать продолжительность разработки и производства до окончательной заводской готовности при обеспечении высоких технико-экономических и эксплуатационных показателей паровых турбин и турбоустановок.

Развитие отечественной унификации и создание модельных рядов паровых турбин разных типов и принципиальных схем шло с одновременным ростом установленной мощ-

ности агрегатов, с переходом к разработке и производству крупных турбин с уменьшением числа ступеней и цилиндров, что связано с некоторым отставанием роста энергетики от развития промышленности. Такие задачи решались с созданием одновременно быстроходных турбин мощностью 50 и 100 МВт с частотой вращения 3000 об/мин, что решало задачи двух этапов удвоения единичной мощности [7].

Одна из самых наукоемких задач – разработка последней ступени – была общей для этих турбин: однопоточной для одноцилиндровой К-50-90 с одновенечной регулирующей ступенью и двухцилиндровой с двухпоточным ЦНД К-100-90. Помимо такой унификации, на этом этапе развития паротурбостроения использовалась прогрессивная унификация: ступени ЧНД в целом, элементы ЦВД с паровыми коробками, передний подшипник, узлы регулирования, выхлопные патрубки и др. Такие подходы и решения, с учетом опыта разработки, производства и эксплуатации паровых турбин, использовались и на ЛМЗ, и на ХТГЗ, что позволяло быстро развивать энергосистемы.

Однако формирование расширенного ряда паровых турбин разного типа, класса мощности и т.д. приводило к разнообразию типоразмеров и к конструктивно-технологическим излишествами, что неблагоприятно сказывалось на унификации в номенклатурном ряду каждого завода, приводило к увеличению стоимости, сроков разработки и изготовления и, как следствие, к необоснованной загрузке конструкторов, технологов, а также дефицитных (особенно на тот период развития) производственных мощностей. В тот период стали очевидными проблемы дефицита ресурса сопровождающего ЖЦ оборудования и необходимость формирования профиля номенклатурного ряда с учетом горизонта планирования развития различных уровней унификации оборудования в модельном ряду конкретного завода.

Задачи по унификации основного и вспомогательного паротурбинного оборудования ставились не только предприятиям, но и головным отраслевым научно-исследовательским институтам, что позволяло решать сложные, масштабные задачи при развитии не только отдельно турбин, но и модельных рядов и в целом в связке турбин, котлов, генераторов и вспомогательного оборудования. При этом масштабы касались не только межзаводской или межотраслевой, но и межгосударственной кооперации, так как охватывали СССР и страны СЭВ, поэтому история развития унификации паровых турбин касается всех этапов

Табл.
Структура уровней
модульной концепции
компании Siemens

Уровень	Наименование компонента	Входимость
1	Подмодуль	Модуль
2	Модуль	Турбина
3	Турбина	Составная турбина (улучшенная платформа)
4	Блок ПТУ	Турбина, турбоагрегат, ПТУ

развития отечественного энергомашиностроения, имеет свои особенности и достойна отдельного внимания.

При разработке и постановке на производство новых турбин даже несмотря на стратегические задачи по сокращению издержек и повышению уровня конструктивной и технологической унификации, на отсутствие опыта в разработке и эксплуатации принципиально новых образцов техники принималось решение о разработке не только в рамках детальных эскизно-технических и технических проектов, но и о доведении до производства и эксплуатации сразу нескольких вариантов оборудования, с дальнейшим выбором наилучшего. Нужно учитывать, что этапы разработки, подготовки производства и изготовления турбин с дальнейшим проведением стендовых и натурных испытаний, с накоплением опыта занимали продолжительное время, до десятилетия, что предопределяло необходимость в условиях активного развития экономики выпускать серийно стандартные турбины с целью развития межзаводской и межотраслевой кооперации и унификации.

Важно отметить, что подходы отечественных отраслевых институтов и профильных турбинных заводов к унификации развивались по синусоиде: с выбором решений по повышению уровня унификации и при проектировании некоторых образцов со снижением унификации – в пользу индивидуальных решений и улучшения технико-экономических показателей.

Следует заметить, что при необходимости обеспечить самые высокие требования проекта не удастся добиться их только за счет подбора или адаптации новой проточной части с использованием стандартных библиотечных модулей. Особенно это касается случаев, когда требования проекта имеют значительные отклонения по мощности, параметрам пара и принципиальной схеме турбоустановки. При этом справедливо добавить, что это касается не только использования платформ/базовых конфигураций в диапазонах больших мощностей и параметров, но и при неоправданном использовании непрофильного оборудования. Например, при отсутствии у производителя/партнера необходимого генератора на 3000 об/мин используется генератор на 1500 об/мин с редуктором, который значительно снижает технико-экономические показатели турбоагрегата и усложняет компоновку как агрегата, так и турбоустановки.

Анализируя развитие отечественного и зарубежного паротурбостроения, необходимо обозначить, что на темпы и уровень развития

унификации, а впоследствии и модульной концепции оборудования турбинного предприятия влияли три ключевых базовых принципа:

- правильность определения границ унификации, то есть границ семейства, построенного на одной базе/платформе;
- правильность разделения базовой турбины на модули и подмодули;
- обеспечение взаимозаменяемости/применимости модулей и подмодулей, характеризующее затраты на формирование профиля из стандартных библиотечных модулей.

Если по этим базовым принципам разобран отечественное паротурбостроение периода 1940–50-х гг., то можно отметить, что был выбран рациональный для его развития диапазон мощности – от 25 до 100 МВт и ряд – 25, 50, 100 МВт, с принципиально правильным и удобным для модульной концепции и оптимизации конструкции выделением модулей: передняя часть ЦВД, паровые и сопловые коробки, автозатворы и другие узлы системы регулирования, регулирующие клапаны, корпус переднего подшипника, фундаментные рамы. Что же касается взаимозаменяемости/применимости модулей, то этому вопросу было недостаточно уделено внимания конструкторов: с тем чтобы была возможность формировать профиль турбин совсем без затрат на КТПП, то есть использовать документацию на модули «один к одному». При этом ранее для достижения высоких технико-экономических показателей необходимо было сформировать, отработать и оптимизировать ряд облопачивания от профилей пера рабочих и направляющих лопаток, профилей хвостовиков до лопаток в целом преимущественно ЧСД и ЧНД.

Создание академическими, научно-исследовательскими институтами и заводами альбомов профилей и библиотеки облопачивания позволяло оптимизировать компоненты проточных частей и значительно снизить трудоемкость и продолжительность КТПП новых образцов техники или новых образцов семейств. Известно, что на облопачивание, с учетом масштабыности и наукоемкости междисциплинарных вопросов с решением сложных расчетно-аналитических и эмпирических тепловых, газодинамических, прочностных, вибрационных, технологических задач, приходится 40–50 % от общей трудоемкости разработки турбины. Также сокращался размер рядов направляющих и рабочих лопаток: направляющие были преимущественно не только постоянного профиля, но и группами одинаковых профилей, рабочие лопатки унифицировались рабочими колесами на разных внутренних

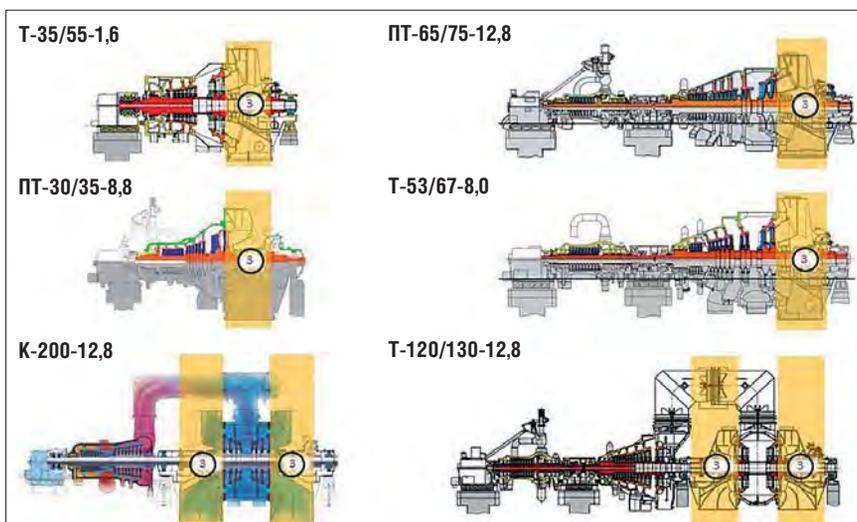


Рис. 1.
Алгоритм модульного подхода создания паровой турбины и совершенствования ее конструкции при управлении жизненным циклом

расточках, что было связано с использованием одних и тех же степеней в разных температурных зонах при одинаковых Gv проточных частей разных турбин.

Примером того времени по повышению уровня унификации ступеней также были ступени части высокого давления турбин мощностью до 25 МВт, в которых использовалось изменение парциальности за счет закрытия каналов. Такие подходы использовались на НЗЛ и КТЗ. Также стоит заметить, что в паровых турбинах американских производителей, например GE, большей мощности (до 50 МВт) и более поздних периодов разработки просматривалось конструктивное сходство с турбинами НЗЛ и использовался тот же самый подход к подбору площадей облопачивания, с сохранением высоты ступеней и даже рабочих колес и путем закрытия каналов. Этот же подход является примером снижения $KПД$ облопачивания, а значит и технико-экономических показателей турбин в пользу повышения уровня унификации, которого добивались в том числе за счет унификации заготовок.

Рис. 2.
Выделение конструктивных частей в номенклатуре паровых турбин УТЗ: (3) выхлопные патрубки



Первым подготовительным этапом для внедрения модульной конструкции в паротурбостроении является разделение конструктивных схем паровых турбин предприятия на конструктивные части – такое разделение представлено в статье [8]. Конструктивные части выделяются одновременно во всей номенклатуре паровых турбин предприятия.

На *рис. 1* представлен алгоритм модульного подхода создания паровой турбины и совершенствования ее конструкции при управлении ЖЦ.

Шаги (1)–(3) алгоритма по выделению конструктивных частей на конструктивных схемах, а затем в турбинах всего номенклатурного ряда предприятия позволяют прийти к единому образу укрупненного разделения турбин совершенно различных конструкций, типов, схем ПТУ и мощностей на части крупнее модулей. Это упрощает разделение наукоемкого изделия на модули и их составные части с унификацией по общим признакам, позволяя избежать итерационного уточнения и описания составных частей на всех уровнях.

На шаге (3) выполняется исследование конструктивных частей, что позволяет установить между ними общие признаки и оценить возможность унификации по геометрическим (размерам и соединению) и функциональным (назначению) параметрам. На *рис. 2* приведен пример с выхлопными патрубками.

Как показано на *рис. 3*, унификация сократила ряд конструктивных частей паровых турбин производства УТЗ: из нового меньшего ряда конструктивных частей разработан больший номенклатурный ряд турбин. При этом некоторые типы двухцилиндровых турбин, разработанные традиционными методами КТПП в модульной конструкции, имеют одноцилиндровое исполнение.

На шагах (4)–(7) выполняется работа с модулями: выделение их в конструктивных частях, унификация с объединением по общим признакам, оптимизация облика и характеристик модулей с совершенствованием их конструкции и расширением назначения, что позволяет сократить их количество в библиотеке.

На основании опыта создания паровых турбин сформулированы основные и дополнительные принципы выделения и разработки модулей. Модуль должен обеспечивать следующие основные принципы (требования по конструкции и технологичности):

- расширенный диапазон параметров, охватывающий всю или большую часть линейки ПТУ;
- унификацию длинноциклового заготовок;
- совместимость присоединения и унификацию соединительных элементов;

- функциональность (максимальный набор возможностей по назначению);
- гибкую систему однотипных библиотечных ДСЕ модуля;
- взаимозаменяемость, технологичность конструкции и сборки.

Дополнительные принципы разработки модулей (влияние условий проекта и производства):

- сокращенный срок постановки и собственно производства;
- альтернативность выбора станочного парка и технологических возможностей;
- автономность разработки одним конструкторским подразделением;
- гибкость использования типовой оснастки, приспособлений, приборов и инструмента.

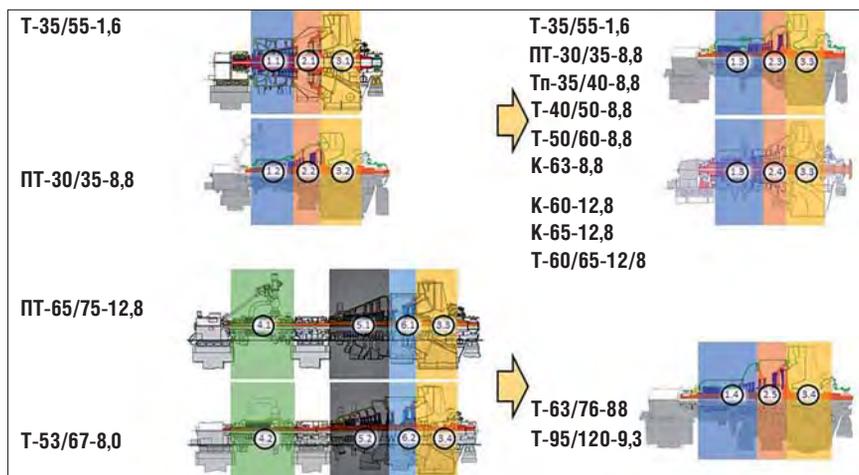
Такие принципы, по которым заданы значения или диапазоны значений, позволяют ограничить библиотеку модулей, с возможностью применения одних и тех же модулей в максимальном количестве паровых турбин различного типа, назначения, принципиальных схем. Кроме того, для разработки конкретного модуля можно задействовать ограниченное количество конструкторов одного подразделения, которое может осуществлять автономную разработку модулей, при этом при изготовлении иметь максимальную альтернативу выбора станочного оборудования, широко используя внутризаводскую, внутригрупповую, внешнюю кооперацию.

Последние шаги (8) и (9) алгоритма модульного подхода связаны с компоновкой турбин из библиотечных модулей, наполнением и адаптацией параметрических элементов, что будет описано далее, и сопровождением ЖЦ оборудования с обеспечением «обратной связи» с каждого его этапа с целью формирования системной работы по циклу оптимизации модулей и конструкций оборудования (см. рис. 1).

На рис. 4 представлен алгоритм работы с модулем, который так же, как весь модульный подход, зациклен «обратной связью» на изменение модуля с целью унификации модулей с расширением их функционального назначения и совершенствования конструкции.

Заключение

Внедрение модульного проектирования паровых турбин позволяет сократить трудоемкость и длительность разработки и производства на 25–30 % и изготавливать образцы из номенклатурного ряда в течение 10–14 месяцев против 14–20 месяцев с использованием традиционных подходов к КТПП и производству. **Д**



Список литературы

1. Култышев А.Ю. Научное обоснование и разработка модульного принципа создания паротурбинной установки / А.Ю. Култышев // Турбины и Дизели. – 2023. – № 1 (106). – С. 42–49.

2. Гокун В.Б. Технологические основы конструирования машин: монография / В.Б. Гокун. – М.: Государственное научнотехническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 736 с.

3. URL: <https://power.mhi.com/products/steamturbines/lineup/>

4. URL: <https://www.ansaldoenergia.com/>

5. URL: <https://www.doosanskodapower.com>

6. URL: <http://www.man-es.com>

7. Кириллов И.И. Паровые турбины и паротурбинные установки / И.И. Кириллов, В.А. Иванов, А.И. Кириллов // Л.: Машиностроение, 1978. – 276 с.

8. Култышев А.Ю. Анализ и совершенствование конструкции основного и вспомогательного оборудования паротурбинных установок / А.Ю. Култышев // Турбины и Дизели. – 2023. – № 2 (107). – С. 46–52.

Рис. 3.

Выявление общих признаков и унификация конструктивных частей в номенклатуре паровых турбин УТЗ: нумерация конструктивных частей в формате Х.У, где Х – номер конструктивной части; У – номер исполнения конструктивной части в ряду

Рис. 4.

Алгоритм работы с модулем



Компания MWM реализовала биогазовый проект в Китае.

Биогазовая электростанция будет введена в эксплуатацию на полигоне бытовых отходов в г. Циндао. Проект реализуется в рамках контракта, заключенного с компанией Beijing Pauway Energy Technology Co. Ltd. Станция спроектирована на базе двух энергоблоков MWM TCG мощностью по 1560 кВт. Они будут использовать свалочный газ в качестве топлива. Производимые электроэнергия и тепло предназначены для собственных нужд полигона, а излишки – для местной сети.

Энергоблоки оснащены системой управления ТЕМ. Она автоматически выполняет программу пуска и останова двигателя, регулирование состава газозвушной смеси, оптимизируя тем самым процесс горения. Осуществляется цифровое регулирование частоты вращения и мощности, индивидуальный контроль каждого цилиндра.

Компания «ИНГК» изготовила оборудование для Южно-Сахалинской ТЭЦ.

На производственной площадке ООО «ИНГК» в г. Перми по договору с АО «ОДК-Авиадвигатель» завершено изготовление двух комплектов оборудования для ЭГЭС-25ПА. В состав каждого комплекта входит блок двигателя, вентиляции и воздухоочистки. Продукция прошла приемку заказчика и подготовлена к отгрузке. Оборудование предназначено для новых энергоблоков Южно-Сахалинской ТЭЦ, конечным заказчиком является ПАО «Сахалинэнерго».

АО «ОДК-Авиадвигатель» планирует ввести в эксплуатацию первый энергоблок в начале 2024 года, другой – во втором полугодии. Ввод энергоблоков повысит устойчивость энергосистемы острова.

Для сокращения сроков монтажа агрегаты поступят на ТЭЦ-1 в виде блоков повышенной заводской готовности. ЭГЭС-25ПА контейнерного исполнения будут работать на открытой площадке в простом цикле, производимая электроэнергия предназначена для покрытия пиковых нагрузок Южно-Сахалинской ТЭЦ-1.

Энергоблоки выдерживают сейсмическое воздействие по шкале MSK-64 интенсивностью до 9 баллов без специальных мероприятий. Сегодня эксплуатируется 15 агрегатов ЭГЭС-25 суммарной мощностью 375 МВт, суммарная наработка парка превысила 800 тыс. часов.

ТЭЦ-1 снабжает электроэнергией большую часть Сахалина, обеспечивает теплом г. Южно-Сахалинск. Установленная мощность станции составляет 455 МВт, из которых 230 МВт производят газотурбинные установки, введенные в строй в 2013–2014 гг.



В Мурманской области введена вторая очередь Кольской ВЭС.

ПАО «ЭЛ5-Энерго» (группа «Лукойл») ввело в промышленную эксплуатацию вторую очередь Кольской ветроэлектростанции – самого мощного в мире ветропарка за Полярным кругом. Первая очередь мощностью 170 МВт была введена в коммерческую эксплуатацию 1 декабря 2022 года. Ветропарк оснащен 57 турбинами и занимает площадь в 257 га.

Плановая мощность ветропарка составляет порядка 750 млн кВт·ч в год, что позволит ежегодно предотвращать выбросы до 600 тыс. тонн CO₂-экв. На ВЭС используется преимущественно российское оборудование.

Кольская ВЭС построена «ЭЛ5-Энерго» в рамках государственной программы поддержки возобновляемой энергетики (ДПМ ВИЭ) и соглашения с правительством Мурманской области о ее развитии. В 2021 г. ВЭС присвоен статус стратегического инвестиционного проекта региона.

Компания Synergy Astana выполнит ремонт установок ENEX 1000.

По две электростанции ENEX 1000 работают на месторождении «Сардоб» и на КС «Шуртан» в Узбекистане. Собственником и эксплуатирующей организацией является ООО «Мубарекнефтегаз» и УДП «Шуртан-нефтегаз». В состав каждой ГТЭС входит 5 микротурбинных установок С200 мощностью по 200 кВт компании Capstone. Энергоблоки работают с 2016 г. в простом цикле.

Компания Synergy Astana выполнит ремонт и техническое обслуживание газотурбинных установок и введет их в эксплуатацию с проведением приемочных испытаний.



- 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»

АО «Уралтурбо» ООО «ЦРМЗ» ООО «ИТЦ» ООО «ГЭХ Сервис газовых турбин»

ООО «Газпром энергохолдинг литейные технологии»



РЕКЛАМА

www.gehia.ru