

май  
июнь  
**2024**

# Турбины и Дизели

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№3 (114)

**«СТГТ»: современный облик  
и цели обновленной компании**



16+



**Поршневые и винтовые компрессорные  
установки разработки и изготовления  
ООО «ИНГК»**

**НПП «Уральская лаборатория вибрации»:  
системный подход к построению системы  
управления жизненным циклом  
энергетического оборудования**

На рынке с 2010 года



- Мобильные источники энергии на базе ГПД и ГТД мощностью 2...6 МВт;
- Модульные ГТЭА и ГТЭС мощностью 10...25 МВт

Компания входит в Перечень системообразующих организаций Российской экономики



*ТО ГПА на базе ГТУ Solar Turbines на Южно-Приобском ГПЗ*



*ПКУ на базе компрессора Cooper и привода Superior для ДКС Южная Тандырча*

[www.ingc.ru](http://www.ingc.ru)

*КМЧ для ГПА-25 для Южно-Тамбейского ГКМ*

*ГТЭА-12 на базе ГТУ-12ПГ-2 и ТГ ТС-12-2РУХЛЗ на Бованенковском НГКМ*

РЕКЛАМА



- ГПА серии «Иртыш»
- Компрессорные установки
- Сервис, ТОиР, поставки ЗИП

Технические характеристики  
 Условный проход от 25 до 200 мм  
 Температура рабочей среды до 120 °С  
 Давление до 6,3 МПа  
 Марка стали 12Х18Н10Т, 09Г2С, С120  
 Тонкость очистки от 5 до 80 мкм



## СОВРЕМЕННОЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ОТ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДИТЕЛЯ

Дуплексный механический фильтр состоит из двух фильтрующих камер, соединенных трехходовыми кранами. Одна камера всегда работает, а другая — находится «в режиме ожидания», очищена и готова к фильтрации. Сдвоенные фильтры преимущественно применяются в процессах фильтрации, где остановка

работы экономически нецелесообразна или невозможна технологически. Конструктивно фильтр оснащён датчиком перепада давления с визуальной шкалой «степени загрязнения» для осуществления своевременной замены фильтрующего патрона — без остановки технологического процесса.

Россия, г. Пермь, ул. Монастырская, 12а  
 телефон: +7 (342) 259-01-87  
 e-mail: [info@senergy.pro](mailto:info@senergy.pro)



[senergy.pro](http://senergy.pro)



[спецэнерджи.рф](http://спецэнерджи.рф)

РЕКЛАМА

## Главный редактор

**Култышев Алексей Юрьевич, д.т.н.,**  
директор по развитию машиностроения,  
ООО «Ренова Холдинг Рус»

## Редакционная коллегия:

**Аронсон Константин Эрленович, д.т.н.,**  
профессор, главный научный сотрудник  
кафедры «Турбины и двигатели»,  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина»

**Барсков Виктор Валентинович, д.т.н.,**  
доцент Высшей школы энергетического машиностроения,  
и.о. директора Института энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ

**Блинов Виталий Леонидович, к.т.н.,**  
доцент, доцент кафедры «Турбины и двигатели»,  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина»

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

**Бычков Олег Витальевич,**  
генеральный директор, ООО «ИНГК»

**Волков Александр Викторович, д.т.н.,**  
профессор, заведующий кафедрой  
«Гидромеханики и гидравлических машин»,  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Галышев Юрий Витальевич, д.т.н.,**  
профессор, заведующий кафедрой «Тепловые двигатели»,  
ФГАОУ ВО СПбПУ

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

**Гольцев Александр Олегович, д.т.н.,**  
профессор, начальник лаборатории,  
НИЦ «Курчатовский институт»

**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 энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ

**Ивановский Александр Александрович, к.т.н.,**  
генеральный конструктор, АО «Силовые машины»

**Кайдаш Александр Сергеевич,**  
заместитель начальника департамента,  
ПАО «Газпром»

**Комаров Олег Вячеславович, к.т.н.,**  
доцент, заведующий кафедрой «Турбины и двигатели»,  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина»

## Editor in Chief

**Kultyshev Aleksey Yurievich, Doctor of Engineering Science,**  
Director of Mechanical Engineering Development,  
Renova Holding Rus LLC

## Editorial board:

**Aronson Konstantin Erlenovich, Doctor of Engineering Science,**  
Professor, Chief Researcher  
of Turbines and Engines Department,  
Ural Federal University named after  
the First President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU)

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

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

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

**Bychkov Oleg Vitalievich,**  
General Director, INGC LLC

**Volkov Alexander Victorovich, Doctor of Engineering Science,**  
Professor, Head of the Department  
of Hydromechanics and Hydraulic Machines,  
National Research University MPEI

**Galyshev Yury Vitalyevich, Doctor of Engineering Science,**  
Professor, Head of Thermal Engines Department,  
SPbPU

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

**Goltsev Alexander Olegovich, Doctor of Engineering Science,**  
Professor, Head of Laboratory,  
Research Center of Kurchatov Institute

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

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

**Ivanovskiy Alexander Alexandrovich, PhD in Engineering,**  
General Designer, Power Machines JSC

**Kaydash Alexander Sergeevich,**  
Deputy Head of Department,  
Gazprom PJSC

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

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

**Лифшиц Михаил Валерьевич,**  
заслуженный машиностроитель РФ,  
председатель совета директоров, АО «Уральский турбинный завод»

**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. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

**Радин Юрий Анатольевич, д.т.н.,**  
главный эксперт, ПАО «Мосэнерго»

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

**Росляков Павел Васильевич, д.т.н.,**  
профессор, академик Российской инженерной академии,  
профессор кафедры «Моделирования и проектирования  
энергетических установок»,  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Рябчиков Александр Юрьевич, д.т.н.,**  
старший научный сотрудник, главный научный сотрудник кафедры  
«Турбины и двигатели», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

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

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

**Цырук Сергей Александрович, к.т.н.,**  
доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжения  
промышленных предприятий и электротехнологий»,  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Шайхутдинов Александр Зайнетдинович, к.т.н.,**  
генеральный директор,  
ООО «Высокотехнологические разработки»

**Шаповало Анатолий Антонович, к.т.н.,**  
начальник управления департамента,  
ПАО «Газпром»

**Шевченко Олег Викторович,**  
генеральный директор,  
ООО «ТурбоСервис Рус»

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

**Ямалтдинов Артем Альбертович, к.т.н.,**  
технический директор,  
АО «Уральский турбинный завод»

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

**Lifshits Mikhael Valeryevich,**  
Honored Machine Builder of the Russian Federation,  
Chairman of the Board of Directors, Ural Turbine Works JSC

**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  
the First President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU)

**Radin Yury Anatolyevich, Doctor of Engineering Science,**  
Chief Expert, Mosenergo PSJC

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

**Roslyakov Pavel Vasilyevich, Doctor of Engineering Science,**  
Professor, Academician of the Russian Engineering Academy,  
Professor of the Department of Modeling and Design of Power Plants,  
National Research University MPEI

**Ryabchikov Alexander Yuryevich, Doctor of Engineering Science,**  
Senior Researcher, Chief Researcher,  
Ural Federal University named after  
the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)

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

**Sulimov Daniil Dmitrievich,**  
Honored Machine Builder of the Russian Federation,  
Deputy General Designer,  
Chief Designer of Drive GTP and Objects of Their Application,  
UEC-Aviadvigatel JSC

**Tsyruk Sergey Alexandrovich, PhD in Engineering,**  
Associate Professor, Head of the Department of Industrial  
Enterprises Power Supply and Electrical Technologies,  
National Research University MPEI

**Shaikhutdinov Alexander Zainetdinovich, PhD in Engineering,**  
General Director,  
High-tech Developments LLC

**Shapovalov Anatoly Antonovich, PhD in Engineering,**  
Head of Directorate of Department,  
Gazprom PJSC

**Shevchenko Oleg Victorovich,**  
General Director,  
TurboService Rus LLC

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

**Yamaldinov Artem Albertovich, PhD in Engineering,**  
Technical Director,  
Ural Turbine Works JSC

# Содержание

май-июнь 2024, № 3(114)



Фото на обложке:  
Производственный цех компании «СТГТ»

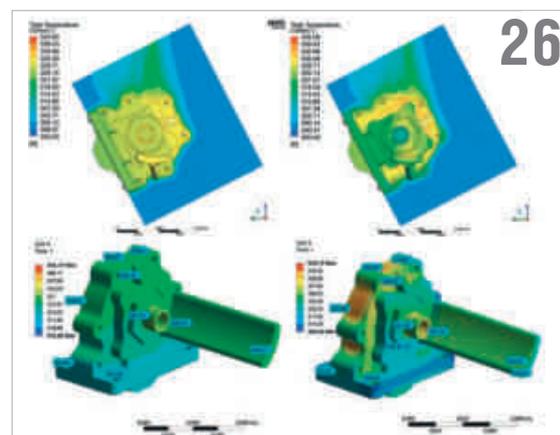


9

- 6** От редакции  
**Развитие российского машиностроения в руках молодых инженеров и ученых**  
*А. Ю. Култышев, д.т.н. — журнал «Турбины и Дизели»*
- 8** Интервью  
**Национальный исследовательский университет «МЭИ» – лидер в подготовке кадров для передовых отраслей экономики**
- 12** Газотурбинные установки  
**Методика исследования лопатки вентилятора авиационного газотурбинного двигателя на ударную прочность при попадании постороннего предмета**  
*В. В. Барсков (д.т.н.), М. К. Канакин, Ю. В. Матвеев (к.т.н.), Е. И. Окунев — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
- 18** Газотурбинные установки  
**Предприятие «СТГТ»: современный облик и цели обновленной компании**  
*В. А. Конашков, В. В. Филиппов, П. Н. Сиротинкин — ООО «Современные технологии газовых турбин»*
- 22** Газотурбинные установки  
**Исследование взаимозаменяемости деталей, изготовленных методом 3D-печати из полимерных материалов, при осуществлении оперативного ремонта**  
*В. В. Барсков (д.т.н.), К. С. Котов (к.т.н.), М. А. Лаптев, Г. А. Рощенко, А. Г. Пулин — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
- 30** Газотурбинные установки  
**Развитие систем фильтрации и применение высокоэффективных НЕРА фильтров**  
*Е. В. Арахланов — Затонская ТЭЦ ООО «БГК»  
А. Р. Богдан — ООО «ЕМВ фильтртехник рус»  
В. Д. Буров, к.т.н. — НИУ «Московский энергетический институт» (МЭИ)  
В. И. Быличкин, Ю. А. Макаркин — ООО «Пауэр Инжиниринг Технолджиз»*
- 36** Газотурбинные установки  
**Первый опыт применения ГТУ-25П для производства СПГ**  
*М. А. Снитко, П. М. Морозов — АО «ОДК-Авиадвигатель»*
- 40** Эксплуатация, сервис  
**Увеличение межсервисного интервала для газовых турбин SGT5-2000E и SGT5-4000F**  
*А. Ю. Павлов, Н. А. Ефимов, В. Ю. Сазонов — ООО «Современные технологии газовых турбин»*



18



26



36

**42** Эксплуатация, сервис  
**НПП «Уральская лаборатория вибрации»: системный подход к построению системы управления жизненным циклом энергетического оборудования**

*М. А. Биялт (к.т.н.), Е. В. Бочкарев — ООО НПП «Уральская лаборатория вибрации»  
Д. С. Кшесинский — АО «Аппекслаб»  
А. Ю. Култышев, д.т.н. — АО «Конструкторское бюро «Рысь»*

**48** Эксплуатация, сервис  
**Локализация удаленных цифровых сервисов энергетических установок**

*А. Ю. Павлов, И. А. Фасхутдинов, А. Ю. Лошаков —  
ООО «Современные технологии газовых турбин»*

**52** Компрессорные установки  
**Исследование влияния эрозионного износа рабочих лопаток осевой компрессорной ступени на их прочностные характеристики**

*В. Л. Блинов (к.т.н.), Е. С. Бабкин, И. С. Зубков, Т. А. Недошивина (к.т.н.), И. Е. Алексеев —  
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»*

**58** Компрессорные установки  
**Поршневые и винтовые компрессорные установки разработки и изготовления ООО «ИНГК»**

*О. В. Бычков, С. В. Кудрявцев, М. И. Ладейщиков, И. А. Странкалс, И. И. Турусов — ООО «ИНГК»*

**64** Компрессорные установки  
**Программный комплекс для расчета рабочего колеса центробежного компрессора**

*В. В. Барсков (д.т.н.), А. И. Мариняк —  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

**72** От молодых специалистов  
**Обратный инжиниринг в авиационном двигателестроении: решение обратной задачи в проектировании компрессора**

*А. И. Мариняк, Г. А. Рощенко — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

**80** Гидротурбинные установки  
**Исследование влияния эжекции струйного насоса на истечение свободной струи**

*М. А. Бирюлин, А. В. Волков (д.т.н.), К. Е. Денисов, А. К. Лямасов (к.т.н.) —  
Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт» (МЭИ)*

**84** Паротурбинные установки  
**Совершенствование жизненного цикла паротурбинного оборудования**

*Д. С. Кшесинский, А. Ю. Култышев (д.т.н.) — АО «Конструкторское бюро «Рысь»*

**90** Выставки, конференции  
**II конференция по проблемам сохранения ресурса и повышению надежности работы ГТУ**

*Капралов Д. А. — журнал «Турбины и Дизели»*



70



89

# Турбины и Дизели

информация с пяти континентов

**Издатель ООО «Турбомашинь»**

**Главный редактор**  
Култышев А. Ю., д.т.н.

**Литературный редактор**  
Зинченко Г. М.

**Дизайн и верстка**  
Капралов А. Д.  
Понакушина А. Е.

**Учредитель ООО «Турбомашинь»**

**Генеральный директор**  
Капралов Д. А.

**Коммерческий директор**  
Троицкий А. А.

**Директор по маркетингу**  
Капралова Л. Е.

**Менеджер по работе с клиентами**  
Торицина Т. А.

**Генеральный партнер**  
ООО «Газпром энергохолдинг  
индустриальные активы»

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

**Адрес в сети Интернет**  
www.turbine-diesel.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

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

**ISSN** 2949-2971

Журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий ВАК №2682 от 19.12.2023 г.

Свободная цена.

Тираж 3 000 экземпляров.

**Подписные индексы** в объединенном каталоге «Пресса России»:

– журнал «Турбины и Дизели» – **87906**

– каталог оборудования

«Турбины и Дизели» – **87907**

Журнал отпечатан – ООО «Принтер»

Адрес типографии:  
Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Луговая, д.7

Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов публикации.

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов.

Дата выхода номера в свет 08.07.2024 г.

Электронные версии журнала (2018 - 2024 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»



## Развитие российского машиностроения в руках молодых инженеров и ученых

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

### In brief

**The development of Russian mechanical engineering in the hands of young scientists**

*In this issue of the magazine we present to your attention several articles about companies and their key products. In the issue you will be able to read the article MGTT Enterprise: the modern look and goals of the updated company. The MGTT company not only fulfills its contractual obligations for the service of gas turbines, but also expands.*

*The program for the development of production, repair and maintenance of equipment for combined-cycle power units is being implemented, which includes expanding the range of services provided to Russian generating companies.*

*In accordance with the traditions of the publication, we present an interview with Nikolai Dmitrievich Rogalev, Doctor of Technical Sciences, professor, rector of the NRU MEI, Chairman of the Scientific and Technical Council of the EEC.*

**Н**аши традиции – наша гордость. Наш профессиональный журнал с гордостью и уверенной стабильностью публикует статьи во всех, уже ставших традиционными для нас, рубриках.

В номере мы представляем вашему вниманию сразу несколько статей о компаниях и их ключевых продуктах. В выпуске вы сможете ознакомиться со статьей «Предприятие «СТГТ»: современный облик и цели обновленной компании». Компания «СТГТ» не только выполняет взятые на себя контрактные обязательства по сервису газовых турбин, но и расширяется. Реализуется программа освоения производства, ремонта и обслуживания оборудования парогазовых энергоблоков, она включает расширение спектра услуг, предоставляемых российским генерирующим компаниям

Статья «НПП «Уральская лаборатория вибрации»: системный подход к построению системы управления жизненным циклом энергетического оборудования» представлена консорциумом компаний – ООО «НПП «Уральская лаборатория вибрации», АО «Аппекслаб», АО «Конструкторское бюро «Рысь». Сложность задач, решаемых в рамках системы управления жизненным циклом оборудования, требует проведения комплексных исследований отраслевого масштаба. Концепция управления жизненным циклом должна базироваться на принципах персонализированного подхода к оценке технического состояния турбоустановок, позволяющего учитывать индивидуальные конструктивные особенности и условия эксплуатации оборудования.

В соответствии с традициями издания представляем интервью Рогалева Николая Дмитриевича, д.т.н., профессора, ректора НИУ «МЭИ», председателя научно-технического совета ЕЭС. МЭИ придерживается принципов фундаментальности и разносторонности подготовки, что позволяет выпускникам быстро адаптироваться к условиям труда на рабочих местах. Создавая образовательные программы, МЭИ взаимодействует с работодателями и старается учитывать их предложения и замечания при реализации учебного процесса. Такой подход обеспечивает очень

высокий уровень трудоустройства выпускников, который достигает 99,8 %.

Компания «ИНГК» представила поршневые и винтовые компрессорные установки собственной разработки. За период 2011 по 2024 гг реализовано значительное количество проектов с применением модульных КУ. В том числе более 60 установок на базе поршневых компрессоров с применением всех возможных вариантов приводов и 20 установок на базе винтовых компрессоров. Специалисты компании осуществляют ввод в эксплуатацию оборудования, его гарантийное и постгарантийное обслуживание.

В статье АО «ОДК-Авиадвигатель» мы расскажем о первом опыте применения ГТУ-25П для производства СПГ. С 2021 года на предприятии «Ямал-СПГ» эксплуатируется компрессорная установка для производства СПГ с приводом ГТУ-25П на базе двигателя ПС-90ГП-25. Специалисты НПК «Пермские моторы» выполнили большой объем работ по разработке и согласованию документации, программ испытаний и корректировке САУ.

Специалисты компании «ЕМВ фильтртехник рус» представляют результаты анализа влияния систем фильтрации воздуха ГТУ на ее эксплуатационные характеристики. В работе рассмотрена одна из основных проблем – качество подготовки рабочего тела ГТУ и защита двигателя от попадания инородных частиц. Последствиями некачественной подготовки воздуха являются загрязнение, эрозия и коррозия – эти процессы приводят к деградации мощности турбины. Для минимизации данного эффекта в КВОУ ГТУ устанавливаются высокоэффективные фильтры НЕРА.

С этого номера редакция начинает публикацию статей, посвященных работам, выполненным студентами и молодыми специалистами под руководством опытных наставников. В настоящем выпуске журнала представлены публикации студентов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Присоединяйтесь к нам на всех площадках, посещайте их чаще, следите за обновлениями! Будьте в курсе самых свежих событий и материалов! 



## ЯМЗ будет выпускать 12-цилиндровый двигатель мощностью 1054 л.с.

Модельный ряд Ярославского моторного завода пополнился новым 12-цилиндровым V-образным дизельным двигателем ЯМЗ-855. Мощность двигателя составляет 1054 л.с., крутящий момент – 4300 Н·м.

ЯМЗ-855 является первым 12-цилиндровым ярославским мотором с аккумуляторным впрыском. Двигатель может работать как на дизельном топливе, так и на газе. В моторах ЯМЗ-855 применен масляный насос повышенной производительности, в системе охлаждения основного контура двигателя увеличена производительность водяного насоса. Степень повышения давления поднята до 16.

В конструкции ЯМЗ-855 используется охладитель наддувочного воздуха типа «вода – воздух», который выведен из системы охлаждения двигателя в отдельный контур охлаждения с индивидуальным насосом и радиатором. Оптимизированы каналы системы охлаждения в блоке цилиндров. В двигателе применен турбокомпрессор новой конструкции с более высокой степенью сжатия.

Двигатель оснащен современной аккумуляторной системой подачи топлива. Параметры процесса подачи топлива обеспечивает микропроцессорная система управления на основе показаний датчиков, характеризующих режим и условия работы двигателя. В результате привод обладает хорошими пусковыми свойствами, оптимальным расходом топлива, низкими уровнями шума и выбросов вредных веществ. Ресурс нового двигателя составляет 50 тыс. моточасов.

Промышленные двигатели серии ЯМЗ-855 найдут самое широкое применение в газодобывающей и железнодорожной отраслях, в судостроении и машиностроении. Ими будут комплектоваться карьерные самосвалы, промышленные тракторы, бульдозеры, дизель-генераторные и насосные установки, газопоршневые энергоблоки.



## ТМХ поставил газопоршневой энергоблок 1-9ГМГ в Чувашию.

Коломенский завод («ТМХ-Энергетические решения») изготовил и направил заказчику – ГК «Трансэнергопром» газопоршневой двигатель-генератор 1-9ГМГ. Агрегат будет использоваться в качестве основного генерирующего оборудования ГПЭС, строящейся в с. Шоршелы Мариинско-Посадского муниципального округа Чувашской Республики. Электростанция создается в рамках соглашения между ООО «Трансэнергопром», правительством Чувашии и ГК «ТМХ-Энергетические решения».

Режим работы – базовый, с выдачей электроэнергии в энергосистему. ГПЭС будет введена в эксплуатацию в режиме параллельной работы с внешней сетью филиала ПАО «Россети Волга» – «Чувашэнерго».

Двигатель 1-9ГМГ разработан Инжиниринговым центром двигателестроения ТМХ в 2022 году, а в 2023-м на Коломенском заводе началось его серийное производство. Он предназначен для работы в составе стационарных и модульных электростанций в качестве источника электрической и тепловой энергии для нужд промышленных и коммунальных предприятий.

До 70 % деталей и узлов 1-9ГМГ унифицированы с дизельными двигателями типа Д49 – это обеспечивает высокую ремонтпригодность при относительно низкой стоимости обслуживания и запасных частей. Применение распределенной системы подачи топливного газа позволяет достичь более высоких показателей приемистости по сравнению с двигателями с внешней системой топливоподачи.

## Transmashholding delivered 1-9GMG gas engine power plant to Chuvashia.

Kolomna Plant (TMH-Energy Solutions) manufactured and delivered to the customer, Transenergoprom, a 1-9GMG gas engine power plant. It will be used as the main generating equipment of power station under construction in the village of Shorshely in the Mariiinsko-Posadsky municipal district of the Chuvash Republic. The power station is being constructed as part of an agreement between Transenergoprom, the Government of Chuvashia and TMH-Energy Solutions. The operating mode is basic with the supply of electricity to the power system. The station will be put into operation in parallel with the external power grid of Chuvashenergo, the branch of Rosseti Volga PJSC.



Рогалев Николай Дмитриевич,  
д.т.н., профессор,  
ректор НИУ «МЭИ»,  
председатель научно-  
технического совета Единой  
энергетической системы

### In brief

**The National Research University MPEI is the leader in training of the personnel for advanced sectors of the economy**

Qualified specialists are one of the most important components of the successful functioning and development of such complex high-tech knowledge-intensive industries as power and mechanical engineering. For many years the National Research University MPEI has been a leading university for the training of engineering and scientific personnel for energy and mechanical engineering: designers of power equipment, designers of thermal and nuclear power plants, autonomous power facilities, heat and power supply systems, as well as operating personnel of energy facilities. Providing high-tech sectors of the economy with highly qualified engineering and scientific personnel is the topic of the conversation with Nikolai Dmitrievich Rogalev, the rector of the National Research University MPEI.



# Национальный исследовательский университет «МЭИ» –

## лидер в подготовке кадров для передовых отраслей экономики

Квалифицированные специалисты – одна из важнейших составляющих успешного функционирования и развития таких сложных высокотехнологичных наукоемких отраслей, как энергетика и машиностроение. Национальный исследовательский университет «МЭИ» многие годы является ведущим вузом по подготовке инженерных и научных кадров для энергетики и машиностроения: конструкторов энергетического оборудования, проектировщиков тепловых и атомных электростанций, автономных энергообъектов, систем тепло- и электроснабжения, а также эксплуатирующего персонала объектов энергетики.

**О**беспечение наукоемких отраслей экономики высококвалифицированными инженерными и научными кадрами – тема нашей беседы с ректором Национального исследовательского университета «МЭИ» Николаем Дмитриевичем Рогалевым.

**Московский энергетический институт – ВУЗ с богатой историей и традициями в подготовке кадров для энергетики. В следующем году университет отмечает свое 95-летие.**

**Расскажите, пожалуйста, что представляет собой МЭИ сегодня?**

Действительно, МЭИ был образован в 1930 году с целью обеспечения кадрами активно развивавшуюся в тот период энергетическую отрасль. На начальном этапе подготовка в университете велась по теплотехническому, электротехническому и энергомашиностроительному направлениям. Стоит отметить, что в состав МЭИ с самого начала деятельности входил инженерно-экономический факультет, который действует и сегодня. Поскольку потребности активно развивающейся экономики страны в квалифицированных кадрах росли, в МЭИ открывались все новые направления подготовки.

Сегодня МЭИ является политехническим вузом, в состав которого входит 12 институтов, где ведется обучение специалистов, бакалавров и магистров почти по 30 различным направлениям. В университете обучается более 22 тысяч студентов.

**Довольно часто работодатели отмечают разрыв между знаниями выпускников вузов и желаемыми компетенциями принимаемых на работу специалистов. Существует ли такая проблема у выпускников МЭИ при трудоустройстве?**

На этот вопрос нет и в сложившихся условиях не может быть однозначного ответа. Работодателей много, все они имеют свою специфику деятельности. В некоторых слу-

чаях существует потребность в специалистах очень узкого профиля, и зачастую она небольшая. В силу отмеченных причин ВУЗы в целом не могут удовлетворить спрос каждого работодателя не потому, что не имеют возможности организовать соответствующую подготовку, а потому, что узконаправленные компетенции выпускника на рынке труда в большинстве случаев окажутся невостребованными, и у него возникнут сложности с трудоустройством.

По этой причине МЭИ придерживается принципов фундаментальности и разнонаправленности подготовки, что позволяет выпускникам легко трудоустроиться по завершении университета и быстро адаптироваться к условиям труда на рабочих местах. Так, например, наши выпускники, обучающиеся на программах в рамках укрупненной группы специальностей «Электро- и теплоэнергетика», успешно работают не только в эксплуатирующих энергетическое оборудование компаниях, но и в проектных институтах, конструкторских бюро машиностроительных предприятий, научных организациях. Создавая образовательные программы, мы, конечно же, взаимодействуем с работодателями и стараемся учитывать поступающие конструктивные предложения и замечания при реализации учебного процесса. Стоит отметить, что такой подход обеспечивает очень высокий уровень трудоустройства наших выпускников, который уже на протяжении ряда лет достигает 99,8 %.

**Что можете порекомендовать компаниям, которым нужны сотрудники, имеющие специальную подготовку?**

Проявлять инициативу. Способы подготовить необходимые кадры существуют и вполне доступны организациям совершенно разного масштаба. Мы ни в коем случае не отказываемся от подготовки специалистов узкой

направленности, но в этом случае инициатива, как правило, исходит уже от работодателя. Так, у нас есть несколько хорошо зарекомендовавших себя механизмов обучения.

Существуют отдельные программы подготовки, ориентированные на обучение специалистов для конкретных работодателей, которые могут по окончании университета трудоустроить всю выпустившуюся группу студентов. Такая программа есть, например, с компанией «Россети», которая сегодня насчитывает более 220 тысяч сотрудников.

Для машиностроительных организаций хорошо зарекомендовала модель создания на базе университета студенческих конструкторских бюро (СКБ). Такая модель включает две основные составляющие – образовательную и практическую. В рамках образовательной составляющей студенты, отобранные в СКБ совместно с работодателем, обучаются по специальной программе профессиональной переподготовки. Они изучают применяемые на предприятии программные комплексы, методики проектирования, номенклатуру производимой продукции и особенности оборудования, а уже в рамках практической части решают реальные задачи предприятия, которые определяются представителями конструкторских бюро предприятий. Практические навыки приобретаются на специально оборудованных для этого рабочих местах на территории университета, где студенты обучаются и работают в свободное от учебы время. Впервые такую форму взаимодействия мы реализовали с АО «Силловые машины», создав СКБ для подготовки конструкторов по восьми продуктовым направлениям компании.

Специальные навыки выпускников могут формироваться и индивидуально. Особенно эффективно это может быть реализовано для обучающихся по программам магистратуры, предусматривающих большой объем практик. Многие студенты уже во время обучения начинают работать по специальности, и если у работодателя есть заинтересованность в специальной подготовке, то студенту определяется соответствующая тема магистерской диссертации, формируется специальная программа практик, в рамках которых и приобретаются специальные знания и навыки.

При таких форматах взаимодействия роль работодателя в обучении достаточно велика, и в результате удается подготовить специалиста для решения конкретных задач компании.

Наряду с подготовкой кадров для предприятий, в МЭИ реализуется программа углубленной инженерной подготовки



 **Рис. 1.**  
Главный учебный корпус  
Московского энергетического  
института

«Эталон», на которую отбираются талантливые студенты с высокой успеваемостью и мотивацией. Задачей этой программы является подготовка кадров для научных центров, отделов исследований и разработок наукоемких предприятий машиностроения, высшей школы. Программа реализуется уже более пяти лет и показывает очень хорошие результаты: многие студенты успешно участвуют в научно-технических проектах, реализуемых в университете, проходят конкурсный отбор в СКБ, становятся победителями отраслевых конкурсов, лауреатами именных стипендий, а выпускники – успешно трудоустраиваются, что подтверждает высокий уровень подготовки, актуальность и востребованность приобретаемых компетенций.

**Сейчас в СМИ часто появляется информация о передовых разработках различных вузов. Расскажите, пожалуйста, об исследованиях и разработках, которые проводятся в МЭИ.**

В МЭИ работает большое количество научных коллективов и лабораторий, осуществляющих исследования и разработки в самых разных областях знаний. Мы работаем

 **Рис. 2.**  
Студенческое конструкторское  
бюро АО «Силловые машины»  
в НИУ «МЭИ»





**Рис. 3.**  
Открытие студенческого конструкторского бюро ООО «Дорогбужкотломаш» в НИУ «МЭИ»

с более чем 700 организациями, а годовой объем НИОКР в общей сложности составляет порядка 2 млрд рублей. Наши ученые и инженеры решают как текущие научно-технические задачи компаний, связанные с повышением надежности работы оборудования, улучшением его технико-экономических и экологических показателей, так и занимаются перспективными разработками.

В МЭИ уже не первый год действует внутренняя программа грантовой поддержки перспективных исследований и разработок «Технологии будущего», обеспечивающая создание научно-технического задела по перспективным направлениям развития науки и техники. Это позволяет формировать эффективные предложения в области исследований и разработок для многих наших заказчиков, создавать новые группы разработчиков в областях знаний, представляющих интерес для университета и наших промышленных партнеров.

Результаты работ научных коллективов НИУ «МЭИ» обладают высокой научной и практической ценностью. Приведу два

**Рис. 4.**  
Лекционная аудитория им. А. Ф. Дьякова



относительно недавних примера: первый из области решения важной для топливно-энергетического комплекса практической задачи, второй – результат перспективных разработок.

В 2021 году сотрудники университета в составе коллектива авторов были удостоены премии Правительства РФ в области науки и техники за разработку и освоение серийного производства автономного комплекса высокоэффективного оборудования для надежного функционирования системы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, получившего практическое применение на предприятиях ПАО «Транснефть».

В 2022 году коллектив молодых ученых НИУ «МЭИ» был удостоен премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых ученых за разработку комплекса научно-технических решений и высокоэффективных, экологически безопасных энергетических технологий для формирования низкоуглеродной энергетики.

Стоит отметить наличие в МЭИ неразрывной связи между созданием образовательных программ и проведением исследований мирового уровня: получаемые новые научные результаты непрерывно внедряются в процесс подготовки, обеспечивая актуальность реализуемых образовательных программ и современный уровень подготовки выпускников.

### **Сегодня перед энергетическим сектором и машиностроением стоит много сложных задач. В чем Вы видите выход из сложившейся ситуации?**

Да, согласен, ситуация действительно очень непростая: необходимо решить много задач в совершенно разных сферах деятельности. Убежден, что трудности преодолимы и скорейшего достижения целей можно достичь, действуя сообща, объединив усилия производства, науки и образования, внедряя инновационные решения во всех указанных областях. МЭИ является надежным партнером как в вопросах кадрового обеспечения предприятий энергетики и машиностроения, так и в решении научно-технических задач, возникающих в процессе эксплуатации установленного парка оборудования, создания новых отечественных образцов техники для обеспечения технологического суверенитета топливно-энергетического комплекса. Всегда рады расширению сфер взаимодействия с партнерами в решении важных для отечественной энергетики задач. Уверен, что общими усилиями мы сумеем достичь целей, стоящих перед энергетической и машиностроительной отраслями. **Т**

## Котельная в г. Калуге переведена в мини-ТЭС.

Энергосервисный контракт между администрацией г. Калуги и Калужским заводом энергетического машиностроения заключен на 12 лет, по истечении срока будет проведен капитальный ремонт тепловой электростанции. Затем контракт будет продлен еще на 10 лет, либо оборудование передадут в эксплуатацию заказчику.

Для модернизации котельной в районе дома № 29 по 1-му Академическому проезду специалисты Калужского завода энергетического машиностроения установили энергоблок ГЭ-50 мощностью 1 МВт производства АО «Волжский дизель имени Маминых». Энергоблок создан на базе газопоршневого двигателя 492ГД-1-01 производства ВДМ и генератора Stamford PI736F1.

Генподрядчиком и поставщиком оборудования выступило АО «ВДМ», генпроектировщик – АО «КЗЭМ». Стоимость работ и оборудования составила порядка 66 млн рублей, экономия МУП «Калугатеплосеть» составит 4 млн рублей в год.

Станция работает в параллель с энергосистемой. Топливо – природный газ.

## В Татарстане начнет работу предприятие по ремонту ГТУ.

В Зеленодольском районе Татарстана откроется первый из трех цехов завода группы «Амкор». Предприятие будет выполнять ремонт и восстановление элементов газотурбинных двигателей.

На первом этапе проекта будет организован восстановительный ремонт компонентов горячего тракта газовых турбин. С этой целью строится ремонтный цех площадью 1,5 тыс. м<sup>2</sup> для восстановительного ремонта двигателей зарубежного производства.

Площадь второго цеха, где будут выпускать запасные части горячего тракта, будет аналогичной.

На втором этапе, реализация которого намечена на III квартал 2024 года – IV квартал будущего года, будет создан участок по изготовлению частей горячего тракта. На третьем этапе, рассчитанном на 2025-27 годы, планируется создание участка по агрегатированию газовых турбин.

На сегодня в России установлено более 900 иностранных газовых турбин малой, средней и большой мощности.



## Для расширения ГТЭС на месторождении им. В. С. Черномырдина поставят энергоблоки Урал-6000.

АО «ОДК-Авиадвигатель» реализует контракт на поставку 4 энергоблоков Урал-6000 мощностью по 6 МВт для газового месторождения в ЯНАО. Заказчик – компания «Лукойл-Западная Сибирь». Оборудование изготовлено на предприятии, прошло цикл необходимых испытаний и отгружено заказчику.

Энергоблоки будут работать 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.

По инициативе заказчика АО «ОДК-Авиадвигатель» изготовит и поставит еще два энергоблока Урал-6000. В составе ГТЭС применяется российское оборудование, в том числе газотурбинные установки ГТУ-6П. Станция полностью обеспечит потребности инфраструктуры месторождения в электрической энергии.

Месторождение им. В. С. Черномырдина – один из самых перспективных проектов ТПП «Ямалнефтегаз». Промысел находится в междуречье Таза и Мессояхи, относится к классу крупных и имеет начальные геологические запасы порядка 300 млрд м<sup>3</sup> газа и 21 млн тонн конденсата.

## Ural-6000 power plants will be supplied to expand the station at the field named after V. S. Chernomyrdin.

UEC-Aviadvigatel JSC is implementing a contract for the supply of 4 Ural-6000 power plants with a capacity of 6 MW each for the gas field in the Yamalo-Nenets Autonomous Area. The customer is Lukoil-Western Siberia. The equipment was manufactured at the enterprise, passed a cycle of necessary tests and was shipped to the customer. The power plants will operate in an open area in the ambient temperature range from –52 °C to +33 °C. The modular design, developed by specialists of the Perm Design Bureau, ensures the most efficient use of the entire complex of power plant equipment.

At the initiative of the customer, UEC-Aviadvigatel JSC will manufacture and supply two more Ural-6000 power units. The units use Russian equipment, including GTU-6P gas turbine plants. The station will fully meet the needs of the field's infrastructure for electric energy.

# Методика исследования лопатки вентилятора авиационного газотурбинного двигателя на ударную прочность при попадании постороннего предмета

**В. В. Барсков, д.т.н – доцент, barskov\_vv@spbstu.ru**  
**М. К. Канакин – студент, kanakinmihail@gmail.com**  
**Ю. В. Матвеев, к.т.н. – доцент, matveev\_yuv@spbstu.ru**  
**Е. И. Окунев – старший преподаватель, okunev\_ei@spbstu.ru**  
**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**

## Ключевые слова:

двухконтурный  
двигатель,  
турбореактивный  
двигатель,  
защита от попадания  
посторонних  
предметов,  
попадание птиц

## Аннотация

Авиационный газотурбинный двигатель является наиболее подверженным попаданию посторонних предметов элементом летательного аппарата. В процессе эксплуатации ГТД их попадание может привести к частичному или полному разрушению двигателя.

В работе представлена классификация по причинам повреждения, по источникам повреждений, путям попадания посторонних предметов (ПП) в двигатель и мерам безопасности. Проанализировано явление попадания различных ПП в авиадвигатель гражданского лайнера, его причины и последствия.

Рассмотрены разные способы защиты двигателей. В исследовании сравниваются два профиля лопатки вентилятора ГТД одинаковой

высоты, с одинаковой хордой в корне (нового и старого поколения), применяемых в гражданской авиации, с тем чтобы разработать методику анализа влияния попадания ПП в проточную часть.

Были выбраны материал и форма предмета, который по своим свойствам с большой степенью достоверности моделирует возможные влияния на двигатель при столкновении с ПП.

В представленной работе смоделировано столкновение ПП с профилями обоих типов. Получены напряженно-деформированные состояния лопаток при попадании предмета на разной высоте лопатки. Исходя из результатов моделирования сделан вывод о преимуществе использования лопатки сложного профиля.

## The method of studying the fan blade of aviation gas turbine engine for impact strength when a foreign object strikes

**V. V. Barskov, Doctor of Engineering Science – Assistant Professor, barskov\_vv@spbstu.ru**  
**M. K. Kanakin – Student, kanakinmihail@gmail.com**  
**Yu. V. Matveev, PhD in Engineering – Associate Professor, matveev\_yuv@spbstu.ru**  
**E. I. Okunev – Head Teacher, okunev\_ei@spbstu.ru**  
**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**

## Key words:

turbofan engine,  
turbojet engine,  
protection from  
foreign objects,  
bird strike

## Abstract

Aircraft gas turbine is prone to the damage caused by the debris strike the most of all the elements of an airplane. During its operation, the foreign object debris (FOD) strike may cause local or complete destruction.

In the research the classification by reason of the damage, by the sources of the damage, by the passage of the damage and safety precautions are listed. As a result of the study the phenomenon, its reasons and consequences of the foreign object debris strike with the aircraft engine of civil aviation were analyzed.

Different protection systems were observed. During the study, two fan blade sections of the same height, same chord of the root section (old generation blade and new generation blade), used

in the civil aviation of the aircraft engine were compared as a reason to elaborate the methodology of analysis the influence of the collision between an object and blade section.

The material and the shape of the object were chosen according to its features which simulates, with a good authenticity, possible influence on an engine while colliding with FOD.

In represented study the collision of the object and both blades was simulated. The stress-strain behavior of the blade after the collision on different heights was received. The conclusion about the advantages of using irregular outline of the blade according to the results of the modelling was conducted.

Попадание посторонних предметов в авиационный двигатель – это серьезная проблема, значительно повышающая уровень опасности при эксплуатации летательного аппарата, вплоть до выхода из строя двигателей. В настоящее время зафиксировано множество случаев попадания ПП по разным причинам, и эта ситуация привела к усиленному изучению авиационной безопасности по данной проблеме.

Согласно исследованиям Федерального авиационного управления (FAA), попадание ПП является наиболее распространенной причиной, вызывающей авиационные инциденты и катастрофы [1]. Посторонние предметы находятся повсюду: в терминалах, на грузовых стоянках, рулежных дорожках, взлетных полосах и т. д. Они способны повредить самолет вследствие прямого контакта с фюзеляжем, стойками шасси и непосредственно с двигателем. По данным FAA, наиболее подвержены повреждению от попадания ПП авиадвигатели: доля их столкновения с ГТД составляет 44 %, с крыльями – 31 %, с лобовым стеклом – 13 %, с носовым обтекателем – 8 %, с фюзеляжем – 4 %.

Повреждение конструкции проточной части и входного устройства газотурбинного двигателя является актуальной проблемой в процессе его проектирования с точки зрения обеспечения надежности.

### Классификация посторонних предметов по источникам повреждений

В гражданской авиации выделяют три основных источника повреждений ГТУ природного происхождения. Исходя из исследований «Ростеха» [2], наиболее распространенной проблемой, преимущественно в северном полушарии, является обледенение элементов летательного аппарата во время полета. Согласно мировым данным по случившимся авиакатастрофам, обледенение является причиной более 40 % происшествий.

Процесс образования льда, как правило, происходит на высотах до 5000 м при попадании в области высокой влажности. При условиях низкой температуры за бортом в этих областях может находиться большой объем жидких капель, покрывающих все поверхности самолета ледяной коркой. Для ГТД основная опасность заключается в пластинах льда, нарастающих на воздухозаборнике силовой установки – это увеличивает массу и сопротивление, а также способствует снижению тяги. При некорректной работе противообледенительной системы толщина и масса льда

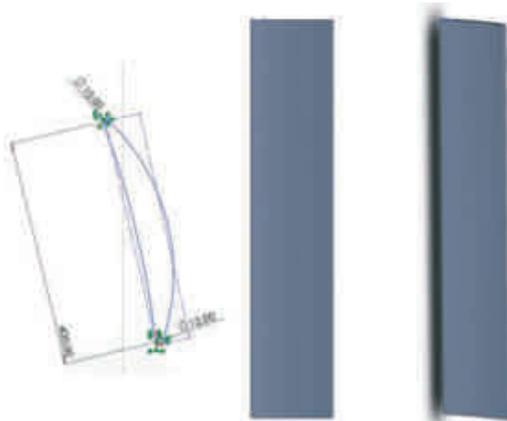


Рис. 1. Профиль лопатки старого поколения, используемой на двигателе Boeing 737-200

только увеличивается. При превышении допустимой массы льда, способной удержаться, куски льда срываются и попадают в проточную часть двигателя, что ведет к повреждению лопаток и выходу на ненормальные режимы.

Температура воздуха на разных высотах полета сильно колеблется, поэтому самолет может попасть в условия обледенения даже при плюсовой температуре на земле. Фюзеляж и крылья самолета оснащены необходимыми системами предупреждения и предотвращения последствий образования льда, однако двигатель и его внутренние элементы не обладают подобными системами. Таким образом, обледенение и попадание льда в ГТД является актуальной проблемой, требующей особого подхода при проектировании двигателя.

Двигатели в процессе сертификации проходят испытания ледяными кристаллами, чтобы исследовать влияние попадания кусков льда во внутренний контур ГТД. Кристаллы льда при попадании на детали высокой температуры образуют наросты, способные оторваться и попасть внутрь двигателя, повреждая элементы компрессора. Зона входного устройства и первой ступени вентилятора подвержены наибольшему скоплению льда. Общий признак проблемы проявляется в начальном накоплении

Рис. 2. Профиль лопатки нового поколения, используемой на двигателе Boeing 737-8 max

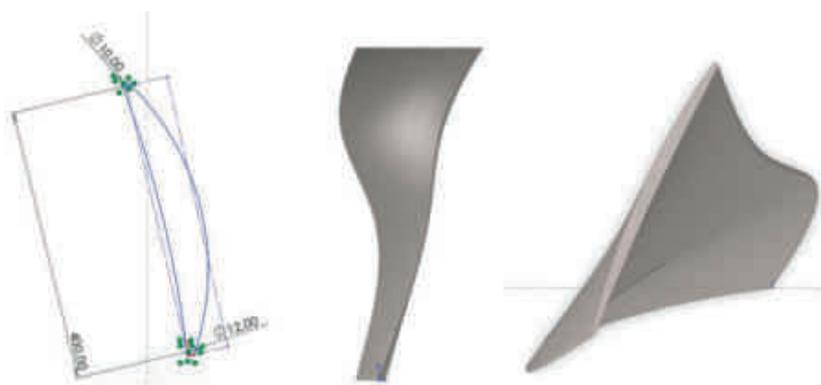


Рис. 3.  
Модель ПП, используемая  
в проводимом исследовании  
и ее массо-объемные  
характеристики

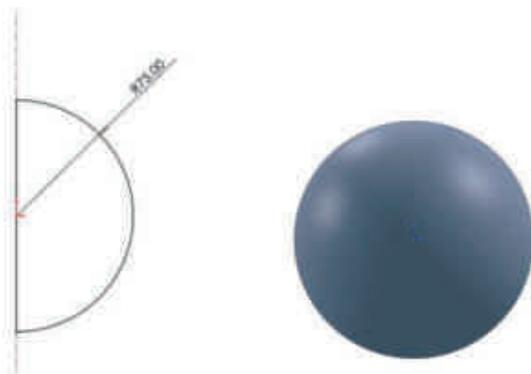
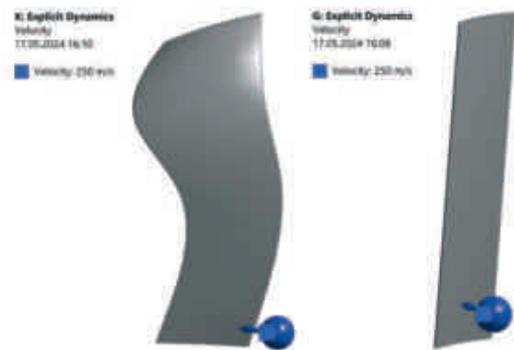


Рис. 4.  
Расчетные модели  
столкновения для  
двух профилей лопаток



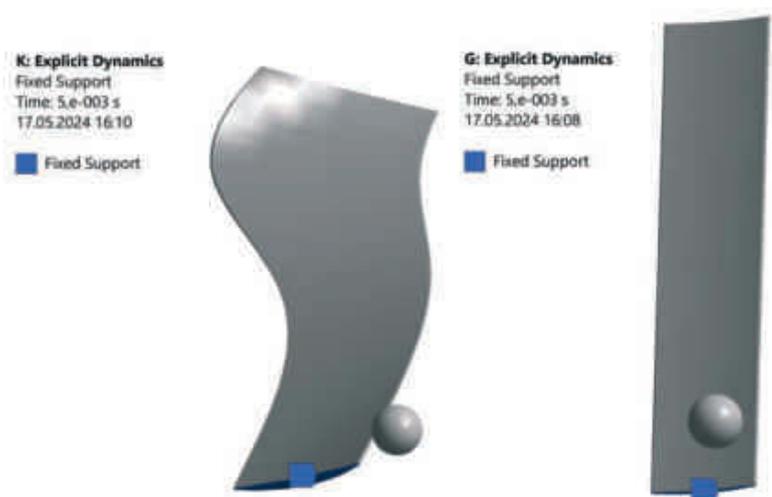
нии ледяных кристаллов в компрессоре низкого давления. Образовавшийся лед может блокировать поток воздуха во внутренний контур двигателя или забрасываться в компрессор высокого давления, камеру сгорания.

Следующей проблемой является столкновение самолета с птицами, что связано с увеличением полетов и стало частым явлением в гражданской авиации. Для двигателя попадание одной птицы, даже крупной, не будет критичным – опасно столкновение со стаей птиц, которые могут вывести из строя все силовые установки. Столкновение также может привести к повреждению деталей корпуса, обшивки или обрыву gondoly.

Для получения сертификата годности двигатель должен пройти проверку на «птицестойкость» – это стендовое испытание, когда из пневматической пушки производят выстрел в двигатель, работающий на взлетном режиме, чтобы смоделировать вероятное последствие столкновения.

Еще одной проблемой является попадание самолета в облако вулканического пепла. Исходя из статистики, приведенной ГК «Ростех», гражданские самолеты в среднем сталкиваются с областью, насыщенной вулканической пылью, несколько раз в год.

Рис. 5.  
Закрепление лопаток  
различного профиля в корне



Опасной для двигателей является большая концентрация пепла, сосредоточенная в одной области [3]. Этот пепел представляет собой измельченную магму, состоящую из мельчайших частиц твердых горных пород, минералов и стекла. Он налипает на стенки и полости ГТД, нарушая поток воздуха и снижая в целом производительность турбины. Кроме того, пепел обладает абразивными свойствами и может повреждать поверхности самолета.

### Пути попадания ПП в двигатель

Рассматривая проблему попадания ПП внутрь ГТД, необходимо понять, каким образом посторонний предмет может попасть в тракт двигателя. Самыми опасными являются периоды взлета и посадки, когда внутрь воздухозаборника может всасываться все, что находится в радиусе действия силовой установки. Распространенным путем попадания ПП является заброс предметов с поверхности взлетно-посадочной полосы от передней стойки шасси [4].

С поверхности взлетно-посадочной полосы периодически подбрасываются предметы под действием струй воздуха от действия реверса тяги. В случае его запоздалого включения возможно попадание ПП в установку.

### Меры безопасности

Для защиты двигателей от нежелательного попадания различных предметов внутрь разработаны различные системы, способствующие повышению безопасности при эксплуатации авиационной техники.

В случаях вихреобразования основным путем повышения безопасности будут эксплуатационные ограничения при движении по взлетно-посадочной полосе. В частности, это запрет на выход за пределы опасных оборотов двигателя, при которых начинается образование вихревого жгута и всасывание в воздухозаборник посторонних предметов. Для каждого типа двигателя обороты определяются в руководстве по летной эксплуатации.

Помимо эксплуатационных ограничений, инженеры активно используют различные конструктивные меры предотвращения попадания ПП в тракт двигателя. На различных типах самолетов существуют свои конструктивные особенности защиты силовой установки: например, такие взаиморасположение передней стойки и двигателей, при котором конус брызг разброса предметов из-под стойки переднего шасси минимизирует их попадание в потенциально опасную область.

Другим конструктивным методом защиты ГТД является система «самозащищенных» двигателей, для которых создаются специальные широкохордные лопатки вентилятора. Передняя кромка лопаток упрочнена (часто специальным покрытием), и они имеют большую ширину и толщину корневого сечения. Их конфигурация при воздействии центробежной силы позволяет отбрасывать посторонний предмет во второй контур [5].

Для более эффективного отражения подбрасываемых предметов стойками шасси были созданы специальные защищающие щитки пластинчатого типа [6]. Благодаря особенностям такой конструкции предметы, подхватываемые стойками шасси, подбрасываются вверх, врезаются в щиток и отлетают обратно в направлении взлетно-посадочной полосы. Таким образом, исключается вероятность заброса ПП из-под колес передней стойки шасси на вход в двигатель.

Другой способ защиты от образования воздушных вихрей в военной авиации – это специальные защитные механизмы в виде закрывающихся панелей во время запуска двигателя и перемещения воздушного судна до достижения определенной высоты и скорости.

## Официальные стандарты безопасности

Федеральным авиационным управлением установлены следующие стандарты для производителей авиадвигателей [7].

1. Силовая установка должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить продолжение безопасного полета и посадку (для категории А) или безопасную посадку (для категории В) после столкновения с птицей весом около одного килограмма, когда скорость самолета, относительно птицы вдоль траектории его полета, равна VNE или VH (в зависимости от того, что меньше) на высотах до 2500 метров (VNE – скорость, которую самолет не должен превышать из-за риска разрушения конструкции, VH – максимальная скорость самолета, находящегося на режиме максимальной тяги при нормальных атмосферных условиях).

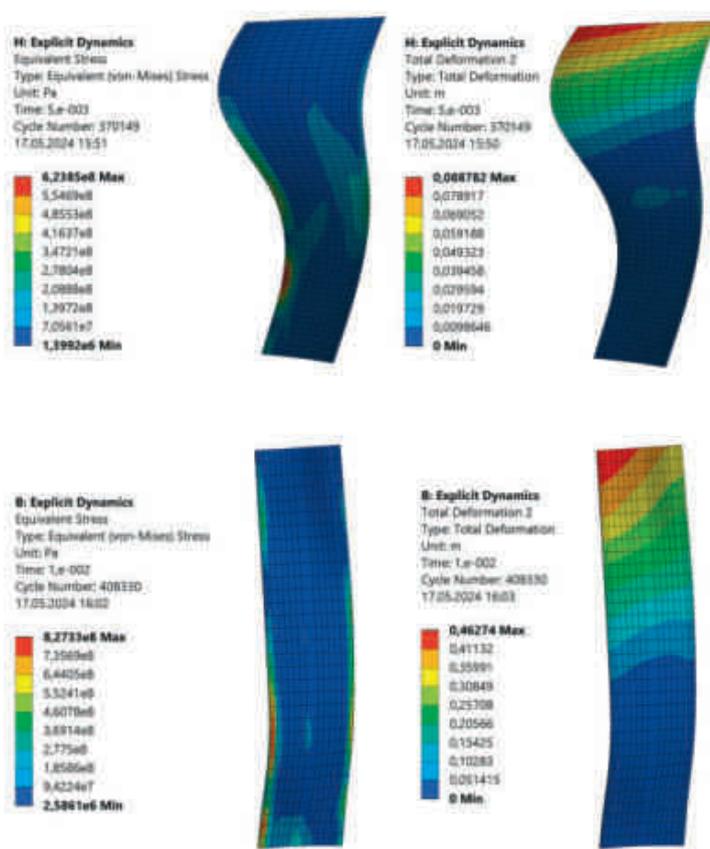


Рис. 6. Эпюры напряжения и деформации в лопатках различного профиля после столкновения со сферой в периферийной части

2. Для опор двигателей, пилонов и прилегающих несущих конструкций планера самолета необходимо учитывать предельное состояние нагружения, которое сочетает в себе полетные нагрузки величиной в 1g с наиболее критическими переходными динамическими нагрузками и вибрациями, определяемыми динамическим анализом, возникающими в результате разрушения лопасти, вала, подшипника или столкновения с птицей. Любая остаточная деформация, вызванная этими предельными нагрузками, не должна препятствовать дальнейшему безопасному полету и посадке.

## История вопроса

Один из первых натурных опытов в мировой авиации провел американский ученый J.P. Barber в 1975 году [8]. В своем исследовании он моделировал попадание птицы на жесткую пластину и, исходя из полученных результатов, доказал, что максимальное давление пропорционально квадрату приложенной скорости. Со временем методы исследования совершенствовались, и попадание ПП стало моделироваться при помощи компьютерных моделей предметов – одним из первых это сделал S. B. Rayhan [9]. С помощью метода конечных элементов ему удалось получить модель косоугольного удара ПП по лопатке вентилятора.

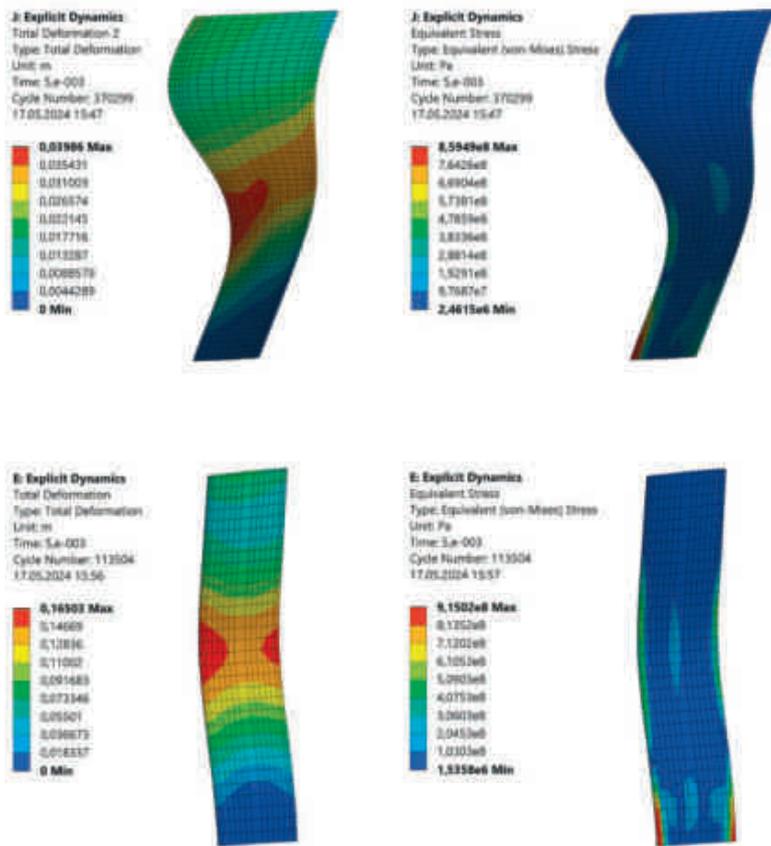


Рис. 7.  
Эпюры напряжения  
и деформации в лопатках  
различного профиля после  
столкновения со сферой  
в средней части

В России проводятся специальные натурные испытания двигателей на «стенде-пушке», из которой производится выстрел птицей. В зависимости от размеров двигателей выбирают размеры птицы: чем больше двигатель, тем больше должна быть масса птицы, которую двигатель должен выдержать [10]. Согласно нормам, испытания с крупной птицей считаются успешными, если разрушения двигателя локализованы [11].

Из проведенного анализа отечественной литературы, находящейся в открытом доступе, был сделан вывод о том, что информация об этих исследованиях и методиках оценки попадания ПП в авиадвигатель методом конечных элементов отсутствует.

### Исследование столкновения лопаток различных профилей с предметом

Объектом исследования является лопатка вентилятора турбореактивного двухконтурного двигателя гражданской авиации.

Цель исследования – сравнить геометрические профили лопаток вентилятора авиационного газотурбинного двигателя нового и старого поколений по ударной прочности при столкновении на разной высоте лопатки: в периферийной части, средней и корневой. Обосновать эффективность современных профилей вентиляторных лопаток.

### Методика исследования

Метод основывается на общепринятых в мировой авиации моделях ПП, которые должны выдерживать лопатки. В исследовании используются два профиля лопаток. Для чистоты эксперимента взяты лопатки вентилятора двигателя гражданской авиации одинаковой высоты, с одинаковой хордой в корне, но с разным профилем по высоте. Лопатка старого поколения имеет прямой профиль (рис. 1) – за основу была взята модель лопатки вентилятора двигателя самолета Boeing 737-200, у лопатки нового поколения сложный профиль – за основу взята модель лопатки вентилятора двигателя самолета Boeing 737-8 max (рис. 2).

### Постановка граничных условий

В качестве модели ПП была выбрана сфера диаметром 150 мм (общепринятый размер [11]), чертеж модели представлен на рис. 3. Материалом сферы является резина, так как она имитирует характеристики реального объекта (птицы) по массе и плотности достаточно хорошо. Масса полученной модели равна 1,76 кг. Моделируются три варианта столкновения лопаток и сферы, на трех разных высотах: в корневой части, средней и периферийной.

Скорость столкновения сферы со статичной лопаткой равняется 250 м/с. Такая величина выбрана из векторной суммы средней скорости полета птицы и скорости V<sub>2</sub>, безопасной при взлете. Расчетные модели представлены на рис. 4.

Материалом для лопаток обоих профилей выбран титановый сплав, способ закрепления – в корневом сечении (рис. 5).

### Результаты исследования

При столкновении резиновой сферы и статичной лопатки в периферийной части сфера разлетается, создавая концентратор напряжения в момент столкновения, что соответствует реальному процессу столкновения ПП с лопаткой.

В лопатке сложного профиля наибольшее значение напряжения доходит до 623 МПа, а в лопатке прямого профиля оно равно 827 МПа. Перемещения в осевом направлении после столкновения лопатки сложного сечения и сферы составляют 89 мм, а в лопатке прямого профиля – 463 мм, что практически в 5,3 раза больше, чем у сложного профиля (рис. 6).

При столкновении резиновой сферы и статичной лопатки в средней части сфера разлетается, создавая концентратор напряжения в момент столкновения, что соответствует реальному процессу столкновения ПП с лопаткой.

В лопатке сложного профиля наибольшее значение напряжения доходит до 859 МПа, а в лопатке прямого профиля оно равно 915 МПа. Перемещения в осевом направлении после столкновения лопатки сложного сечения и сферы составляют 40 мм, а в лопатке прямого профиля – 165 мм, что практически в 3,5 раза больше, чем у сложного профиля (рис. 7).

При столкновении резиновой сферы и статичной лопатки в корневой части сфера разлетается, создавая концентратор напряжения в момент столкновения, что соответствует реальному процессу столкновения ПП с лопаткой.

В лопатке сложного профиля наибольшее значение напряжения доходит до 646 МПа, а в лопатке прямого профиля оно равно 911 МПа. Перемещения в осевом направлении после столкновения лопатки сложного сечения и сферы составляют 10 мм, а в лопатке прямого профиля – 105 мм, что практически в 3,5 раза больше, чем у сложного профиля (рис. 8).

## Заключение

Проведенное исследование позволяет создать методику моделирования попадания ПП в лопатку вентилятора турбореактивного двухконтурного двигателя. На его основе можно изменять граничные условия, рассматривать различные профили лопаток и различные посторонние предметы разной формы и материала, а также выбирать разные места столкновения ПП и лопатки. Также в ходе исследования доказано, что использование лопаток нового типа значительно эффективнее и безопаснее на современных лайнерах гражданской авиации при столкновении по высоте лопатки. 

### Список использованных источников

1. Kraus D. C., Watson J. *Guidelines for the Prevention and Elimination of Foreign Object Damage/Debris (FOD) in the Aviation Maintenance Environment through Improved Human Performance* // Federal Aviation Administration, 2001.

2. Официальный сайт РОСТЕХ [Электрон. ресурс] // URL: <https://rostec.ru/news/led-ptitsy-i-pepel-kak-ispytyvayut-dvigateli-dlya-samoletov/> (дата обращения 13.04.2024).

3. Попова Д. Д. Воздействие вулканического пепла на авиационный газотурбинный двигатель // Д. Д. Попова, А. Н. Саженов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2022. – 70.

4. О проблеме попадания посторонних предметов в двигатель летательного аппарата [Электрон. ресурс] // URL: <https://avia-sim->

[ply.ru/popadanie-postoronnih-predmetov-v-dvigatel/](https://avia-sim-ply.ru/popadanie-postoronnih-predmetov-v-dvigatel/) (дата обращения 13.04.2024).

5. Иноземцев А. А., Сандрацкий В. Л. *Газотурбинные двигатели.* – Пермь: Авиадвигатель, 2006.

6. Комов А. А. *Защищенность двигателей от твердых посторонних предметов, забрасываемых колесами шасси* // ВНТК «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского. – Москва. – 2015.

7. Официальный сайт Федерального управления гражданской авиации США [Электрон. ресурс] // URL: <https://www.faa.gov/> (дата обращения 13.04.2024).

8. Barber J. P., Taylor H. R., Wilbeck J. S. *Characterization of Bird Impacts on a Rigid Plate: Part 1; National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce: Alexandria, VA, USA, 1975.*

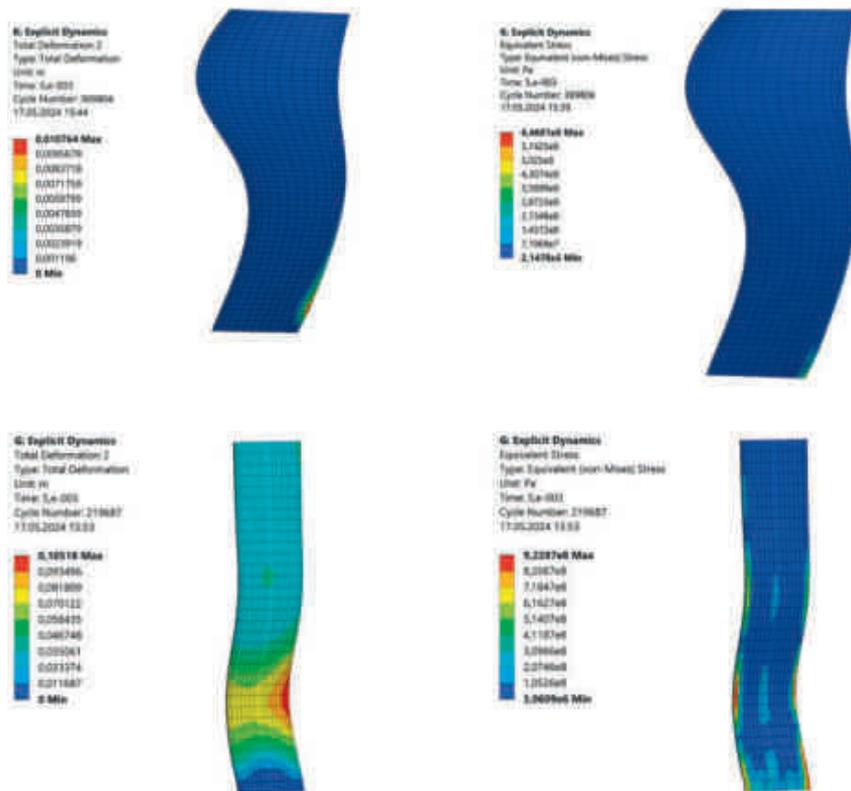
9. Rayhan S. B. *Finite element analysis of oblique bird strike on leading edge of aircraft wing.* AIP Conf. Proc. 2018, 1980, 030009.

10. Нормы летной годности двигателей воздушных судов НЛГ 33 от 17.11.2022, № 820-П.

11. Yella G. *Bird-Strike Analysis on Hybrid Composite Fan Blade: Blade-Level Validation* [Электрон. ресурс] / G. Yella, P. Jadhav, C. Lande // Aerospace, 2023. – V10, № 5. – 13 p. – URL: <https://doi.org/10.3390/aerospace10050435/> (дата обращения 13.04.2024).

 Рис. 8.

Эпюры напряжения и деформации в лопатках различного профиля после столкновения со сферой в корневой части



## Предприятие «СТГТ»: современный облик и цели обновленной компании

**В. А. Конашков, В. В. Филиппов, П. Н. Сиротинкин – ООО «Современные технологии газовых турбин»**

Российское высокотехнологичное предприятие «Современные технологии газовых турбин» постоянно расширяет ассортимент выпускаемой продукции – элементов газотурбинных установок большой мощности, а также наращивает объемы ремонта и обслуживания энергетического оборудования – газовых и паровых турбин, электрогенераторов.

Компания обеспечивает надежную эксплуатацию все большего количества парогазовых электростанций, являющихся базовыми в энергосистеме Российской Федерации.

### In brief

#### **MGTT enterprise: the modern look and goals of the updated company**

Modern Gas Turbines Technologies, the Russian high-tech enterprise, is constantly expanding the range of products - elements of heavy duty gas turbine plants, as well as increasing the volume of repair and maintenance of energy equipment - gas and steam turbines, electric generators. The company provides reliable service of an increasing number of combined-cycle gas power plants, which are the basic ones in the energy system of the Russian Federation.

**К**омпания «Современные технологии газовых турбин» работает на рынке уже более 12 лет. Она была создана в 2011 году как центр компетенций по производству газовых турбин, их обслуживанию, исполнению проектов и инженерным услугам. В октябре 2022 года доля иностранного учредителя ООО «СТГТ» была приобретена группой «Интер РАО». Продолжая активно заниматься сервисом газовых турбин, «СТГТ» расширяет свои компетенции в области всех видов ремонтов и пусконаладки газовых турбин, пополняет склад запчастей, сохраняет и постепенно наращивает уникальную производственную базу. Компания не только сохранила весь комплекс специализированного оборудования, технологии и высококвалифицированный персонал, но и продолжает освоение как производства, так и сервиса газовых турбин большой мощности.

### Производство

ООО «СТГТ» в 2023 году увеличило производственную загрузку более чем в полтора раза по сравнению с 2022 годом. Основная часть производственной деятель-

ности связана с массовым изготовлением узлов и деталей для энергетических газовых турбин большой мощности. Среди компонентов, изготавливаемых компанией, это прежде всего роторная группа: диски компрессора и турбины, полые валы, роторные кольца.

На данный момент в производственной программе предприятия 8 полных комплектов компонентов ротора, каждый из которых состоит из 22 крупных деталей. Кроме того, предприятие обрабатывает обоймы турбины; обоймы, диффузор и корпус подшипника компрессора. Это практически все основные корпусные и роторные части мощной газовой энергетической турбины.

В производственном цехе изготавливаются смесители для выносных камер сгорания турбины большой мощности: успешно освоен ответственный сварной узел со сложной геометрией из никелевого сплава. Всего для турбин аналогичного типа на предприятии ранее было изготовлено 16 комплектов камер сгорания.

Производственный комплекс ООО «СТГТ» оснащен современным оборудованием для сварки, термообработки, дробеструйной

очистки, механической обработки и покраски для изготовления корпусных деталей и роторов газовых турбин. Станочный парк включает универсальное оборудование (расточное, фрезерное, карусельное, токарное) с программным управлением и специальное оборудование – например, станок для шлифовки хиртовых зацеплений и уникальный протяжной станок для изготовления пазов в дисках роторов. С целью повышения качества и производительности все процессы и цеховые операции максимально автоматизированы за счет применения поворотных столов и промышленных роботов.

Важным направлением работы производственного комплекса «СТГТ» является поддержка департамента сервиса и технического обслуживания предприятия. Коллектив завода принимает непосредственное участие во всех ремонтных мероприятиях либо задействован в поставке запасных частей и приспособлений. Так, один из последних примеров – комплект деталей для модернизации изоляции выходного корпуса ГТУ для Северо-Западной ТЭЦ. Для Челябинской ТЭЦ-3 было изготовлено более 700 малых деталей и элементов крепежа в рамках импортозамещения.

## Сервис

Обеспечение обслуживания газовых турбин иностранного производства – одна из наиболее сложных и актуальных проблем сегодня. Компания «СТГТ» осуществляет плановое техническое обслуживание энергетического оборудования и АСУ ТП, ремонт компонентов ротора и статора как на объекте эксплуатации, так и в заводских условиях, на собственных производственных мощностях в Ленинградской области. Работы по всем видам инспекций выполняются руководителями проектов, высококвалифицированными сервисными специалистами, в том числе и в полевых условиях. К середине 2022 года портфель ООО «СТГТ» содержал 16 долгосрочных договоров на техническое обслуживание энергоблоков, включающих 25 газовых турбин типа SGT5-2000E /ГТЭ-160/V94.2 и SGT5-4000F, 13 паровых турбин, 27 генераторов, а также АСУ ТП и электрооборудование.

Стратегия компании по локализации сервиса на территории РФ, реализация которой проводилась с 2013 по 2021 год, позволила в этот непростой для российской энергетики момент быть уверенным в готовности выполнить свои контрактные

обязательства перед заказчиками и обеспечить работоспособность генерирующего оборудования.

К концу 2021 года департамент сервиса полностью сформировал свою структуру, позволяющую выполнять самостоятельно любой объем работ по обслуживанию и ремонту газовых турбин SGT5-2000E/ГТЭ-160/V94.2 и SGT5-4000F. В составе департамента сформированы группы по продажам и управлению проектами, инженерный отдел, осуществляющий техническую подготовку и поддержку инспекций, команда высококвалифицированных специалистов полевого сервиса.

ООО «СТГТ» также имеет свой центр специального инструмента, который содержит весь спектр оборудования, необходимого для выполнения технического обслуживания газовых и паровых турбин, генераторов. Оно также может применяться при проведении приемочных и гарантийных испытаний объектов генерации, электрических высоковольтных испытаний генераторного оборудования, при разборке и транспортировке крупногабаритных компонентов, ремонте паровых клапанов и выполнении стандартных технологических операций.

Склад запасных частей, включающий стратегический запас и насчитывающий несколько тысяч номенклатурных позиций, позволил в 2022–2023 гг. выполнить свои обязательства перед заказчиками.

*В конце апреля, во Всемирный день охраны труда, в компании «СТГТ» отметили важную дату – 800 дней работы без несчастных случаев. Это результат хорошей организации производственных процессов, высокой культуры производства, дисциплины и ответственного отношения к вопросам безопасности и охраны труда.*

 Рис. 1.

**Камера сгорания газотурбинного двигателя на стапеле**



В настоящее время этот запас активно пополняется качественными компонентами российского производства, а также за счет импортной продукции.

ООО «СТГТ» осуществляет ремонт и восстановление компонентов горячего тракта ГТУ в собственном сервисном центре в Ленинградской области, открытом в 2018 году. Здесь полностью освоены такие технологические операции, как входной контроль и дефектация, удаление отработавшего ресурс покрытия, в том числе методом химического травления, слесарно-сварочный ремонт, напыление нового, модернизированного теплозащитного покрытия и финальная оценка качества ремонта с контролем системы охлаждения и собственных частот лопаток.

В 2023 году компанией выполнены заказы по ремонту более 2500 лопаток ГТУ, проведено 26 малых инспекций на электростанциях, осуществлены главные инспекции 5 газовых турбин и 2 генераторов.

Критически важно было оперативно реагировать на изменяющиеся условия ведения бизнеса и не допустить срывов исполнения сервисных контрактов. Задача была выполнена, что подтверждается рекордной загрузкой и двухсменной работой сервисного центра (некоторые участки работают в три смены). Одновременно с напряженной производственной деятельностью сервисный центр непрерывно осваивает новые технологии и новые продукты. Например, завершены работы по освоению производства материала для металлического теплозащитного покрытия.

Рис. 2.

Изготовление элементов  
корпуса газовой турбины



Таким образом, специалисты ООО «СТГТ» продолжают осуществлять плановое техническое обслуживание энергетического оборудования, АСУ ТП и электрооборудования, ремонт компонентов ротора и статора как на объектах эксплуатации, так и в заводских условиях, на собственных производственных мощностях. Компания расширяет парк обслуживаемого оборудования: в 2023–2024 гг. были заключены договоры на обслуживание дополнительных 13 газовых турбин и двух генераторов.

По состоянию на июнь 2024 года в департаменте сервиса и технического обслуживания ООО «СТГТ» работает более 130 высококвалифицированных специалистов, которые обеспечивают обслуживание газовых и паровых турбин, генераторов, АСУ ТП. Учитывая увеличение портфеля заказов на техническое обслуживание, штат персонала активно расширяется.

График работ департамента сервиса ООО «СТГТ» в 2024 году включает восемь крупных инспекций – от инспекции горячего тракта ГТУ до главной инспекции – на Верхнетагильской ГРЭС, Грозненской ТЭС, Киришской ГРЭС, Калининградской ТЭЦ-2, Северо-Западной ТЭЦ, Невинномысской ГРЭС, а также средние инспекции нескольких генераторов. Помимо этого, запланировано более 35 малых инспекций и различных дополнительных работ.

В планах сервисного центра – увеличить количество отремонтированных лопаток Е- и F-класса до 3000 штук в 2024 году. Потребность рынка также диктует требования по расширению номенклатуры восстанавливаемых и ремонтируемых деталей. В текущем году будет завершено освоение ремонта металлической плитки камеры сгорания SGT5-4000F, направляющих колец и других компонентов газовых турбин. В связи с существенными ограничениями по импорту, идет активная работа по освоению производства порошков для термобарьерного покрытия.

В целом, компания «СТГТ» не только продолжает выполнять взятые на себя контрактные обязательства по сервису газовых турбин, но и расширяется: она готова принять новые вызовы, связанные как с обслуживанием ГТУ, так и со значительным увеличением объема производства. Реализуемая предприятием программа максимального освоения производства, ремонта и технического обслуживания основного оборудования парогазового энергоблока включает существенное расширение спектра услуг, предоставляемых российским генерирующим компаниям. **TD**

## Эксплуатация двигателей Wartsila на аммиаке начнется в 2025 году.

Компания Wartsila представила новый 4-тактный судовой двигатель, работающий на аммиаке, который создан на базе платформы Wartsila 25. Контракт на поставку первых двигателей подписан с судостроительной компанией Viridis Bulk Carriers. Сегодня аммиак входит в число главных альтернативных видов топлива, которые судоходные компании рассматривают как средство для снижения выбросов углекислого газа.

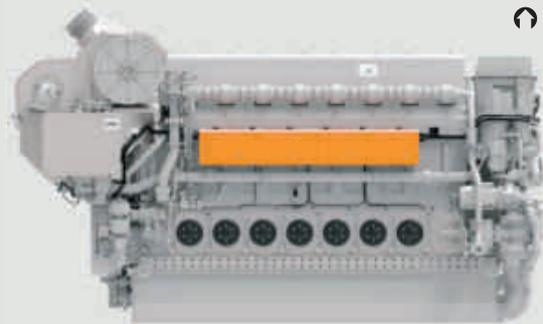
Дополнительно в рамках реализации проекта Wartsila применит новые технологические решения в системах подачи топливного газа AmmoniaPac, снижения выбросов аммиака WARMS и подавления эмиссии NO<sub>x</sub> для дополнительной очистки выхлопных газов. Контракт на поставку двигателей предусматривает гарантийное техническое обслуживание и ремонт оборудования в процессе эксплуатации.

При использовании аммиака в качестве топлива выбросы парниковых газов будут снижены на 30 % по сравнению с традиционными дизельными двигателями. Опытно-промышленная эксплуатация двигателей в составе судовой пропульсивной системы начнется в 2025 году. По оценкам компании, рост популярности двигателей на аммиаке прогнозируется на 2030-е годы.

### **The operation of Wartsila ammonia engine will start in 2025.**

Wartsila has announced that its 4-stroke, ammonia-fueled marine engine is now commercially available as part of the Wartsila 25 engine platform. Viridis Bulk Carriers will be the first shipowner to benefit from the new ammonia solution, and the two organisations are planning to sign a commercial contract in early 2024.

Beyond the engine, Wartsila technology offerings include the AmmoniaPac fuel gas supply system, the Wartsila Ammonia Release Mitigation System (WARMS), and the Wartsila NO<sub>x</sub> Reducer for exhaust after-treatment.



## На Невском заводе создан программно-технический комплекс системы автоматического управления ГПА-32 «Ладога».

На Невском заводе развернут полигон системы автоматического управления ГПА-32 «Ладога» на базе отечественного оборудования фирмы «Текон». Это необходимый этап в рамках разработки и совершенствования собственной САУ газоперекачивающего агрегата.

В состав комплекса входят шкафы управления ГПА, блок управления газотурбинным двигателем, серверный шкаф, коммуникационное оборудование, система бесперебойного питания, автоматизированные рабочие места, необходимое системное и инструментальное программное обеспечение.

Программно-технический комплекс (ПТК) позволяет создать модель как единичного сигнала или исполнительного механизма, так и двигателя, компрессора или всего газоперекачивающего агрегата и связать ее с контроллерами шкафов управления. Модель создается внутри вычислительной машины и обменивается данными с контроллерами посредством локальной информационной вычислительной сети. Контроллеры при этом работают будто с реальным оборудованием на компрессорной станции, а программисты получают возможность до отгрузки настроить прикладное программное обеспечение до максимальной готовности к проведению пусконаладочных работ.

Основная цель создания ПТК – получить инструмент для разработки и полноценной отладки прикладного программного обеспечения САУ ГПА, выполняющей функции регулирования, контроля и управления основным и вспомогательным оборудованием газоперекачивающего агрегата.

Также комплекс планируется использовать для обучения молодых специалистов инженерного центра, участвующих в монтажных и пусконаладочных работах ГПА-32 «Ладога», и технического персонала заказчиков.

В конце прошлого года проведены приемочные испытания блока управления газотурбинным двигателем Т32, входящего в состав САУ ГПА и разработанного для замены САУ Mark VIe. Также разработан головной образец САУ ГПА, который проходит комплекс испытаний на компрессорной станции «Малоперанская» ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Ухта».

Проведение необходимых испытаний и начало серийного производства собственной САУ на базе отечественных программно-технических средств осуществляется в рамках программы изготовления ГПА-32 «Ладога».

## Исследование взаимозаменяемости деталей, изготовленных методом 3D-печати из полимерных материалов, при осуществлении оперативного ремонта

**В. В. Барсков, д.т.н – доцент, barskov\_vv@spbstu.ru**  
**К. С. Котов, к.т.н – старший научный сотрудник, drcattt@yandex.ru**  
**М. А. Лаптев – ассистент, mikhail.laptev@outlook.com**  
**Г. А. Рощенко – инженер, glebikroshenko@gmail.com**  
**А. Г. Пулин – лаборант, pulin.anton.g@gmail.com**  
**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**

### Ключевые слова:

оперативный ремонт,  
аддитивные  
технологии,  
3D-печать,  
мобильные ремонтные  
комплексы,  
обратный  
инжиниринг,  
газотурбинные  
двигатели,  
прочность,  
гармонические  
колебания,  
тепловое состояние

### Аннотация

Сегодня одним из приоритетов технологического прогресса является развитие передовых технологий. К таким технологиям относится аддитивное производство, которое может быть реализовано в автономных мобильных комплексах для выполнения оперативного ремонта. Такие комплексы предназначены для экстренного восстановления работоспособного состояния объекта в случае удаленности от ремонтных цехов. Ремонтные комплексы активно применяются во многих странах, что позволяет повысить срок службы и ресурс эксплуатируемых объектов.

В статье исследуется целесообразность применения деталей, изготовленных из полимерных материалов с помощью аддитивных технологий, для осуществления оперативного

ремонта на примере детали, установленной на газотурбинном двигателе (ГТД).

Исследование производится путем численного моделирования реальных рабочих условий для двух геометрически идентичных деталей, выполненных из разных материалов (силумин и полиамид-12), с последующей оценкой теплового состояния, статической и динамической прочности.

Авторами были смоделированы приближенные к реальности условия работы корпуса, проведена оценка полученных результатов и сделан вывод о возможности и целесообразности применения деталей, выполненных из полимерного материала, для проведения оперативного ремонта.

## Investigation of interchangeability of parts made by 3D printing from polymeric materials in the process of operational repair

**V.V. Barskov, Doctor of Engineering Science – Associate Professor, barskov\_vv@spbstu.ru**  
**K.S. Kotov, PhD in Engineering – Senior Researcher, drcattt@yandex.ru**  
**M.A. Laptev – Assistant, mikhail.laptev@outlook.com**  
**G.A. Roshchenko – Engineer, glebikroshenko@gmail.com**  
**A.G. Pulin – Laboratory Assistant, pulin.anton.g@gmail.com**  
**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**

### Key words:

operational repair,  
additive technologies,  
3D-printing,  
mobile repair  
complexes,  
reverse engineering,  
gas turbine engines,  
strength,  
harmonic vibrations,  
thermal state

### Abstract

In the modern world one of the priorities of technological progress is the development of advanced production technologies, one of such technologies is additive manufacturing, which can be realized in autonomous mobile complexes for operational repair. The essence of such complexes is in emergency recovery of the working state of the object, in cases of distance from repair centers. Such complexes are actively used in many countries, which allowed them to increase the service life and resource of operating objects.

This article studies the feasibility of using parts made of polymeric materials with the help of addi-

tive technologies for operational repair on the example of a part installed on a gas turbine engine (GTE).

The study is carried out by numerical modeling of real working conditions for two geometrically identical parts made of different materials (silumin and polyamide-12), with the following estimation of thermal state, static and dynamic strength.

The authors have modeled close to reality operating conditions of the case, evaluated the results obtained and concluded about the possibility and feasibility of using parts made of polymer material for operational repair.

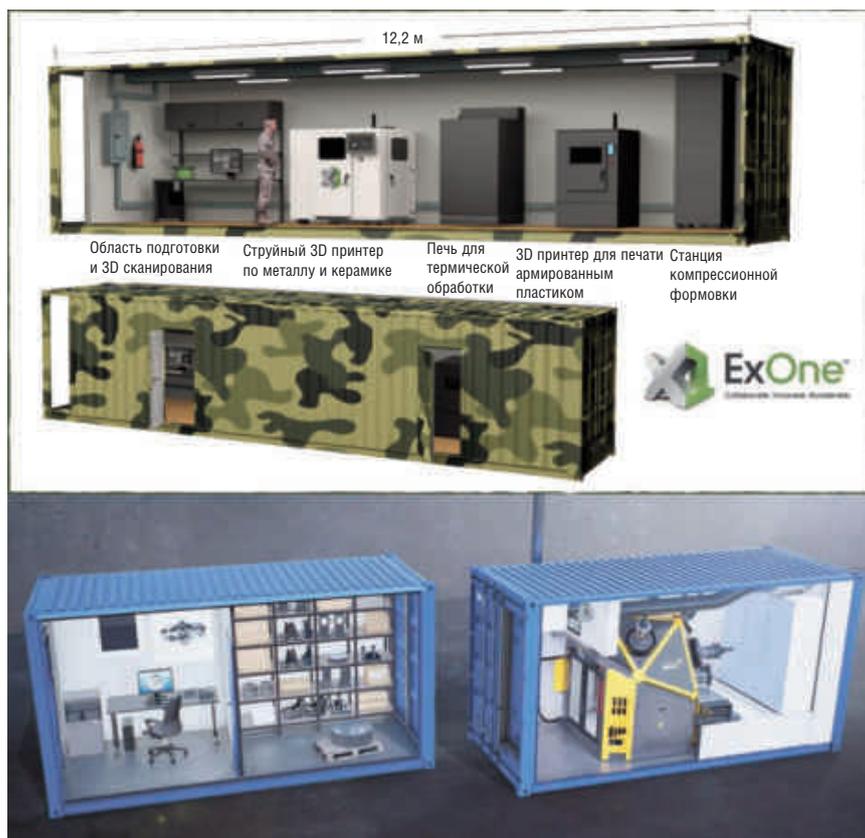
Ремонт – это процесс обнаружения, диагностики и восстановления поврежденного, неисправно работающего или вышедшего из строя объекта до его рабочего состояния. Для устранения дефектов, неполадок, замены неисправных компонентов необходимы технические знания и инструменты. Особое место в условиях быстрого проведения ремонтных мероприятий занимает оперативный ремонт, основная цель которого не предупреждение возникновения дефектов от действующих нагрузок, а быстрое восстановление вышедшего из строя объекта. Особенно это важно для многофункциональных производственных комплексов, где простой оборудования приводит к существенным убыткам или потерям.

Так, например, в газотурбинном двигателе, являющемся сложным высокотехнологичным устройством, повреждение каждого отдельного элемента может привести к выходу из строя всей установки. Можно оценить трудоемкость ремонта каждого отдельного узла в условиях нахождения энергетической установки рядом с ремонтным цехом, где ремонт может занимать от нескольких часов до нескольких месяцев (табл. 1).

Однако приведенные нормы в условиях внепланового оперативного ремонта неприменимы, так как в удалении от основного места базирования специализированных ремонтных комплексов сроки ремонта могут значительно увеличиваться или в целом ремонтные мероприятия невозможны.

В зарубежной практике с конца 2010-х годов такие фирмы, как Siemens, ALOtec Dresden GmbH, Optomec Design, Huffman, ExOne, Daimler AG, Omniplus и многие другие [1], активно применяют специализированные ремонтные контейнеры, оснащенные 3D-принтерами и сканерами, рабочей платформой оператора-технолога и станками для проведения первичной механической обработки. На рис. 1 представлены примерные варианты компоновки подобных контейнеров, применяемых в США и Германии [2, 3].

Используемое в данном контейнере оборудование связано с одним из возможных способов осуществления оперативного ремонта – реверс-инжинирингом. Реверс-инжиниринг – это процесс разборки и анализа устройства, системы или отдельного узла с целью дублирования или расширения возможностей изделия. Широкий перечень эксплуатируемого оборудования может быть воспроизведен двумя способами: а) печать из предварительно созданной базы деталей; б) 3D-сканирование.



Оба способа являются эффективными с точки зрения воссоздания вышедших из строя элементов, однако первый способ более затратный в связи с необходимостью предварительного создания полной базы используемых деталей.

Рис. 1. Мобильные ремонтные комплексы, производства США (вверху) и Германии (внизу)

Преимущества своевременного и технологичного оперативного ремонта:

- наличие материально-технических комплексов или подразделений для осуществления оперативного ремонта снижает зависимость от ремонтных цехов и позволяет выполнять ремонт непосредственно в местах дислокации оборудования;
- возможности оперативного ремонта позволяют использовать поврежденное оборудование, что продлевает ресурс объекта в полевых условиях, делая его изначальное производство более экономически выгодным;
- основной целью оперативного ремонта является краткосрочная замена оригиналь-

Ремонтируемый объект	Трудоемкость
Рабочие и сопловые лопатки	1–10 месяцев
Жаровая труба	4–30 дней
Подшипники	20 дней
Маслосистема охлаждения	2–4 дня
Контрольно-измерительная система	От нескольких часов до 2 дней

Табл. 1. Трудоемкость работ при ремонте узлов и элементов газотурбинных двигателей

Рис. 2.

Корпус для крепления  
тахогенератора  
(исследуемая деталь)



ной детали, т.е. вышедшее из строя или поврежденное оборудование может быть восстановлено до рабочего состояния в короткие сроки.

В данной статье представлено исследование о возможности использования элементов, изготовленных из полимерных материалов, для замены вышедших из строя элементов газотурбинного двигателя. Использование полимерных материалов для оперативного ремонта связано с уникальными свойствами полимеров: малая плотность, высокая пластичность, упругость, термо- и износостойкость, химическая и радиационная стойкость, низкая электро- и теплопроводность, трещиностойкость в условиях высокоинтенсивных нагрузок и др. [4]. Благодаря таким преимуществам полимеры активно используются во многих отраслях: согласно статистическим

данным Росстата и Comtrade, только за последние 10 лет объем производства полимеров в мире увеличился более чем в два раза и к 2022 году превысил 400 млн тонн [5].

Применение полимеров в машиностроении позволяет не только снизить массу конструкций и улучшить энергоэффективность, но и повысить их надежность и срок службы. Особый интерес в двигателестроении представляют высокотемпературные полимеры. По своим некоторым физико-механическим свойствам эти материалы превосходят металлы, что позволяет применять их для решения ряда специфических задач [6]. В настоящее время разработаны полимеры с постоянной температурой эксплуатации в диапазоне от  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$  с кратковременным превышением температуры более  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  [7].

Кроме того, из-за свойств отдельных пластиков при определенных условиях изменять форму и полимеризоваться более широкое распространение приобретают аддитивные технологии. В настоящее время с помощью 3D-принтера из достаточно обширного спектра полимеров можно изготовить практически любые изделия, что открывает неограниченные возможности для авиакосмической, автомобильной, судостроительной, медицинской и других отраслей.

Помимо изготовления готовых деталей, крупные промышленные предприятия и научно-исследовательские институты проводят исследования по использованию аддитивных технологий, в том числе и для выполнения ремонтных работ с использованием полимеров – оперативного ремонта. Такие способы нашли применение в машиностроении, авиакосмической и тяжелой промышленности, однако полный потенциал аддитивного ремонта до сих пор не исследован.

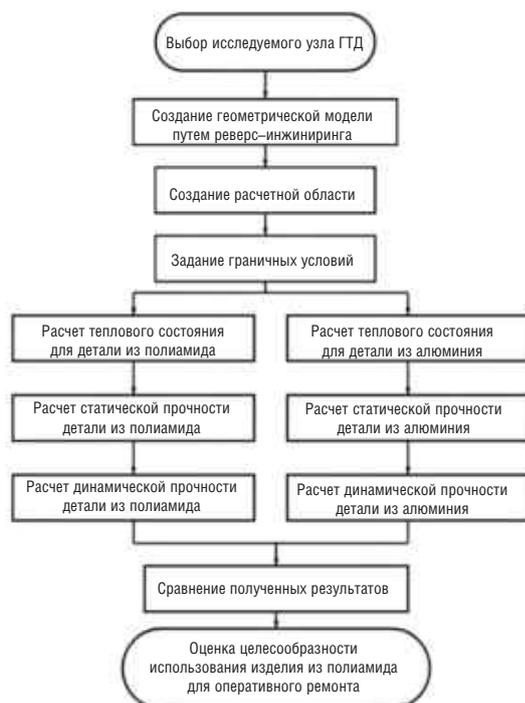
На базе СПбПУ проводится исследование о возможности использования элементов газотурбинного двигателя, изготовленных из полимерных материалов, в случае повреждений, дефектов или отказов.

### Постановка задачи

Цель исследования – с помощью численного метода оценить целесообразность использования деталей, изготовленных методом 3D-печати из пластика, взамен вышедших из строя оригинальных деталей путем моделирования реальных условий эксплуатации одного из элементов ГТД, с дальнейшей оценкой полученных результатов. Расчет был произведен для двух деталей с идентичной геометрией, при одинаковых граничных условиях, но с разными материалами самого изделия – алюминиевый сплав и полимер.

Рис. 3.

Алгоритм расчета и оценки  
результатов использования  
деталей из полиамида



Предполагается печать запасных деталей из полимерного материала – полиамида-12 (ПА-12) по SLS технологии (Selective Laser Sintering – технология, основанная на послойном спекании порошковых материалов (полиамиды, пластик) с помощью луча лазера [10]). Изделия, напечатанные из полимерных материалов, обладают всеми необходимыми характеристиками для выполнения оперативного ремонта: короткий срок изготовления, высокая точность построения, высокие термические свойства получаемых прототипов (температура плавления 172...180 °С), способность выдерживать высокие статические и динамические нагрузки, высокая стойкость к воздействию различных химических веществ, в том числе масел, жиров, нефти и бензина, возможность печати тонкостенных прототипов (от 0,5 мм) [8].

Более того, уже проводились успешные натурные испытания одноступенчатой турбины с элементами проточной части, изготовленными из ПА-12 по технологии SLS, что также доказывает целесообразность применения данной технологии и материала для достижения поставленной цели [9].

### Объект исследования и методология

Объектом исследования является корпус для крепления тахогенератора (рис. 2), который устанавливается на газотурбинный двигатель. Оригинальное изделие изготовлено из силумина и крепится к двигателю с помощью четырех болтов. Через шестеренчатые передачи, расположенные во внутренней части корпуса, передается вращение на тахогенератор, который крепится на исследуемую деталь (с помощью резьбового соединения и крепления хомутом к выступающей из корпуса полки).

Оценить целесообразность использования изделия из полиамида для оперативного ремонта возможно только путем сравнения с последующей оценкой теплового состояния и прочностных характеристик изделий из разных материалов, но с одинаковой геометрией и при одинаковых граничных условиях. Схема с алгоритмом расчета и оценки результатов представлена на рис. 3.

### Создание геометрии и расчетной области

Геометрия была получена путем 3D-сканирования оригинального объекта с последующим получением сшитой полигональной поверхности, с помощью которой была построена твердотельная модель (рис. 4). Аналогичные операции были выполнены для передней крышки. После сборки двух деталей была получена полноценная твердотельная

CAD-модель корпуса, которая может использоваться для численных исследований.

После получения твердотельной модели корпуса тахогенератора была построена расчетная область для моделирования реальных условий эксплуатации изделия.

Были достроены тела для моделирования течения масла в корпусе и для моделирования теплоотдачи от корпуса ГТД. Также была построена условная модель тахогенератора с сохранением оригинальной геометрии в местах контакта с корпусом и с сохранением массы объекта. Для моделирования теплообмена с окружающей средой построена расчетная модель атмосферы.

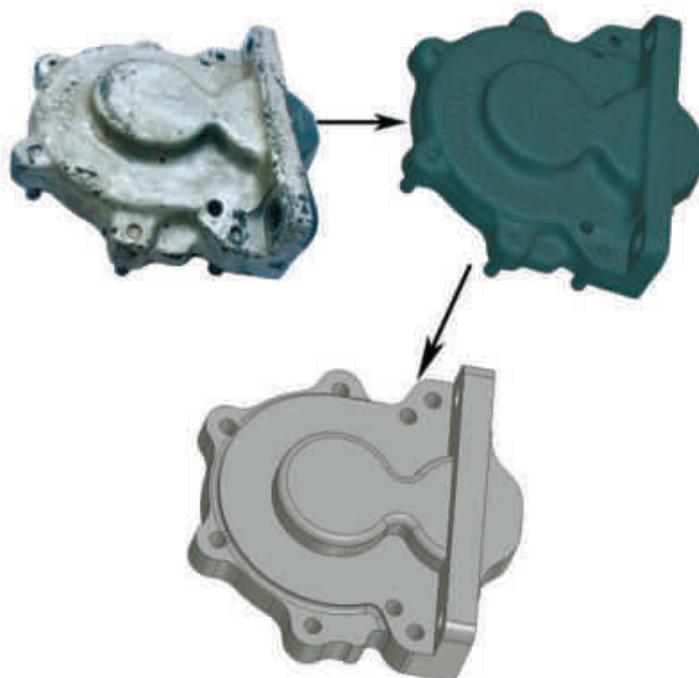
Для моделирования реальных условий эксплуатации корпуса необходимо было задать нагрузки, которые воздействуют на него. В данном случае их можно разделить на три группы: преднапряженное тепловое состояние, статическая нагрузка, динамическая нагрузка. Для моделирования каждого вида нагрузки были заданы необходимые граничные условия.

### Моделирование и расчет теплового состояния

Для получения достоверной картины теплового состояния корпуса был выполнен расчет следующих процессов:

- естественный конвективный теплообмен корпуса и тахогенератора с атмосферой при нормальных условиях для учета теплоотдачи в окружающую среду;

Рис. 4. Этапы создания твердотельной модели задней крышки корпуса



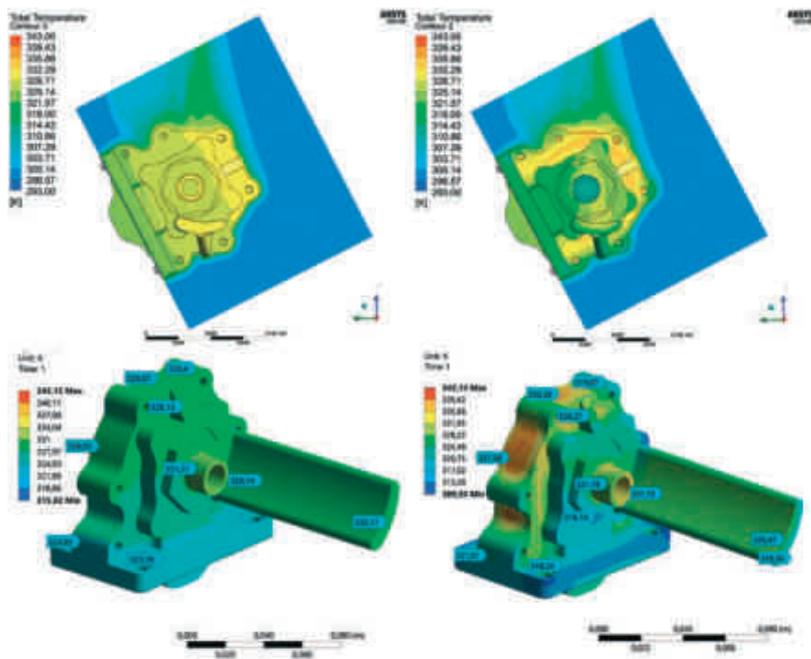
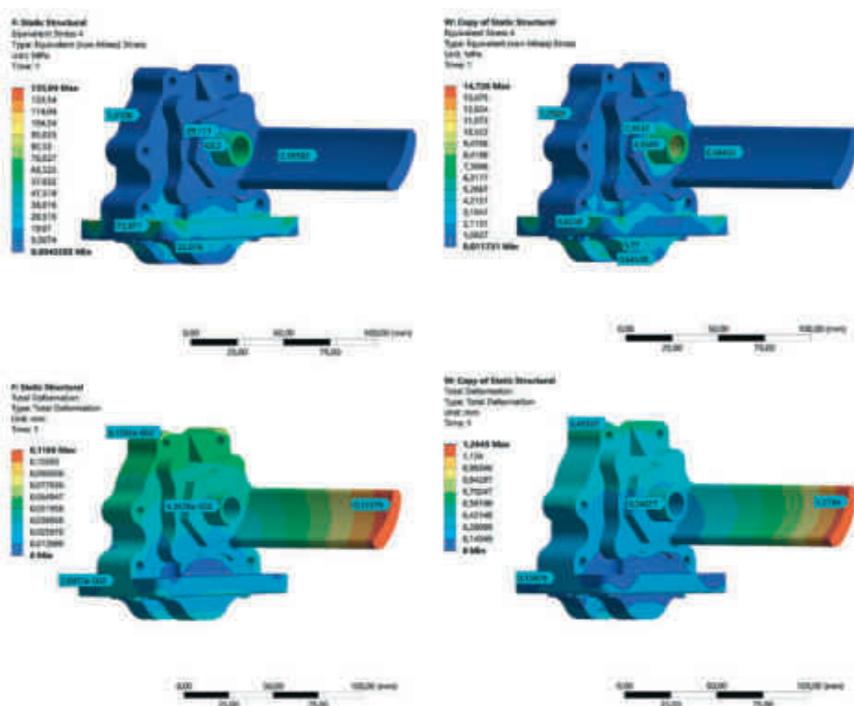


Рис. 5.  
Эпюры распределения температур (силумин - слева, полиамид-12 - справа)

- течение горячего масла во внутренней части корпуса. Тело во внутренней полости корпуса для имитации течения масла, нагретого до 70 °С, по стенкам корпуса, для моделирования теплообмена между нагретым маслом и корпусом;
- теплообмен между ГТД и корпусом насоса. Температура нижней части пластины 50 °С, имитируя нагрев от работающего газотурбинного двигателя;
- теплообмен между тахогенератором и корпусом. Температура внутренней полости тахогенератора 60 °С, имитируя нагрев тахогенератора во время работы.

Рис. 6.  
Эпюра распределения напряжений по корпусу (вверху) и распределения деформаций по корпусу (внизу)



Для решения поставленной задачи были выбраны завышенные температуры, предполагая критический режим работы.

На основе установленных граничных условий был произведен расчет теплового состояния корпуса из силумина и из полиамида-12. По итогам расчета было получено распределение температур. Эпюры температур по всей расчетной области и по поверхности корпуса представлены на рис. 5. Средняя температура по корпусу, выполненному из силумина и полиамида-12, составляла 55,2 и 56,2 °С соответственно.

В ходе выполненного теплового расчета для корпусов из полиамида были получены картины теплового состояния каждого из корпусов. Средние температуры практически идентичны, однако распределение температур отличается достаточно сильно. Корпус из силумина имеет более равномерное распределение температур, а из полиамида – локальную зону больших температур в области контакта с маслом.

Различие температурных полей может быть объяснено физико-химическими свойствами материалов: полиамид обладает существенно меньшим коэффициентом теплопроводности (117 Вт/(м·К) для силумина и 0,2583 Вт/(м·К) для ПА-12) и большей удельной теплоемкостью (962,8 Дж/(кг·К) для силумина и 1700 Дж/(кг·К) для ПА-12) – следовательно, происходит менее интенсивный перенос теплоты между частицами тела и необходимо большее количество теплоты для изменения температуры по сравнению с силумином. Это приводит к тому, что изделие из полиамида нагревается от масла медленнее и менее равномерно распределяет тепло по всему телу, также теплообмен с внешней окружающей средой менее интенсивен.

### Расчет статической конструкционной прочности

Для оценки статической нагрузки был выполнен учет силы тяжести, чтобы определить возникающие напряжения и деформации под действием собственной массы и массы тахогенератора.

Результатом теплового расчета выступает тепловое состояние, которое является граничным условием для конструкционного расчета, так как присваивается для всего тела корпуса для учета преднапряженного теплового состояния при оценке статической прочности. Также для учета давления от масла внутри корпуса было задано избыточное давление 0,05 МПа по всей внутренней поверхности корпуса.

Максимальные напряжения у детали из силумина сконцентрированы в области контакта тахогенератора и корпуса в области резьбового соединения и в местах крепления детали к корпусу ГТД. Максимальные напряжения – 133,0 МПа сконцентрированы в области крепления детали, средние напряжения по корпусу – 17,6 МПа. Характер распределения напряжений у детали из ПА-12 – идентичный, однако порядок величин существенно ниже. Максимальные напряжения – 8,8 МПа также сконцентрированы в области крепления детали, средние напряжения по корпусу – 1,7 МПа. Распределение напряжений и деформаций для деталей, изготовленных из силумина и ПА-12, представлено на рис. 6.

В результате проведенного сравнительного анализа было установлено, что максимальные эквивалентные напряжения в обоих случаях не превышают установленные для каждого материала пределы текучести (250...300 МПа для силумина и 35...45 МПа для ПА-12). Исследование проводилось в рамках упругой постановки, вследствие чего критерием для оценки статической конструкционной прочности является коэффициент запаса прочности. Как было установлено, он находится в рекомендуемом диапазоне.

Максимальные эквивалентные напряжения, выведенные на эпюрах в п. 5.2 и 5.3, не показывают возникновения напряжений в местах крепления тахогенератора к ГТД, так как они преимущественно локализованы в местах острых кромок, где расчет статической прочности методом конечных элементов дает заведомо завышенные результаты.

Характер распределения напряжений схож и локализуется преимущественно в местах закрепления и контакта. Величина эквивалентных напряжений для изделия из полиамида существенно меньше, чем из силумина, что можно обосновать различием физико-механических свойств:

- разная плотность материала: изделие из полиамида намного легче, следовательно, нагрузка от собственного веса существенно ниже;
- разница модулей Юнга: у изделия из полиамида модуль упругости в 70 раз меньше, чем из силумина, следовательно, жесткость изделия из пластика намного ниже, а возникающие в детали деформации, соответственно, больше – это приводит к перераспределению внутренних сил в рамках большей площади, что является следствием более низких напряжений.



Рис. 7.  
Система координат корпуса

### Расчет динамической прочности

Для моделирования колебаний, передающихся от работающего газотурбинного двигателя, были смоделированы гармонические колебания. Так как характер и амплитуда колебаний работающего двигателя заранее неизвестны, было принято решение смоделировать колебания по отдельности вдоль каждой оси в системе координат корпуса (рис. 7), чтобы оценить возникающие в каждом направлении напряжения. Виброускорение было задано  $5 \text{ м/с}^2$ , что соответствует заметному уровню вибрационных воздействий для стационарных объектов в соответствии с ГОСТ 30631-99 [11].

Для каждого варианта исполнения корпуса были определены первые десять собственных частот и определены коэффициенты массового участия для каждой формы колебаний и каждого из трех направлений, представленных на рис. 6. Такое количество частот было выбрано для того, чтобы суммарный коэффициент массового участия по каждому направлению был больше 0,8 – это позволило охватить весь динамический отклик исследуемого объекта.

Исследуемая деталь крепится на ГТД, рабочий диапазон частот которого 500...560 Гц, следовательно, необходимо, чтобы собственные частоты корпуса не попадали в данный диапазон во избежание резонансных колебаний, способных привести к разрушению детали.

В табл. 2 и 3 представлено распределение коэффициентов массового участия по частотам для корпуса, выполненного из силумина и ПА-12 соответственно.

Собственные частоты изделия из силумина и ПА-12 не попадают в непосредственный диапазон работы ГТД, однако при выходе на номинал возбуждающие частоты изделия из силумина могут кратковременно совпадать с частотой первых двух мод, а изделия из ПА-12 – с частотой первых семи мод, но при кратковременном воздействии этим можно пренебречь.

Также восьмая мода находится вблизи рабочей области частот, то есть не обеспечивается отстройка от резонанса, однако на основе информации из табл. 3 коэффициенты

Табл. 2.  
Распределение коэффициентов  
массового участия по частотам  
для корпуса, выполненного  
из силумина

Мода	Частота (Гц)	X	Y	Z
1	209,66	0,02253	0,46995	0,00105
2	290,34	0,00029	0,00002	0,49529
3	594,91	0,66552	0,00729	0,00157
4	1094,00	0,00002	0,00139	0,01114
5	1420,70	0,01401	0,08394	0,00025
6	2382,30	0,04798	0,00077	0,04048
7	2551,20	0,00427	0,07402	0,21071
8	3296,60	0,05706	0,14009	0,04426
9	3530,40	0,03441	0,03188	0,00668
10	4374,20	0,00552	0,00038	0,03317
Сумма		0,923	0,905	0,911

Табл. 3.  
Распределение коэффициентов  
массового участия по частотам  
для корпуса, выполненного из  
полиамида-12

Мода	Частота (Гц)	X	Y	Z
1	20,465	0,01777	0,60166	0,00122
2	47,098	0,00140	0,00302	0,63371
3	84,9	0,82631	0,00682	0
4	170,55	0,00052	0,00870	0,01853
5	269,96	0,00197	0,12909	0,00005
6	401,1	0,00004	0,02716	0,22652
7	449,31	0,00262	0,05967	0,00380
8	561,52	0,00032	0,00055	0,00110
9	646,76	0,07206	0,06776	0,02054
10	896	0,00003	0,00065	0,00599
Сумма		0,852	0,810	0,845

массового участия на данной частоте по всем трем осям имеют достаточно малые значения, следовательно, этим также можно пренебречь.

На рис. 8 представлено распределение эквивалентных напряжений при резонансных режимах работы детали по трем основным осям, соответствующих максимальным всплескам амплитуд во всем исследуемом частотном диапазоне.

Как видно из представленных эюр, характер распределения напряжений для двух деталей идентичен, наиболее нагруженной областью является место крепления тахогенератора к корпусу, так как между ними установлено контактное соединение, учитывающее трение двух рабочих поверхностей. Максимальные напряжения для изделия из силумина и из ПА-12 равны 11,5 МПа и 15,4 МПа соответственно, что значительно меньше предела текучести, критерий прочности в виде коэффи-

циента запаса прочности находится в рекомендуемом диапазоне, дальнейший расчет на усталостную прочность нецелесообразен.

В ходе проведенных расчетов динамической прочности для корпуса тахогенератора, выполненного из алюминиевого сплава (силумина) и из полиамида-12, можно сделать вывод, что распределение и величины напряжений у них идентичны. Главное отличие при расчете заключается в существенном различии собственных частот, что является логичным следствием смены материала, так как собственная частота прямо пропорциональна жесткости закрепления и обратно пропорциональна массе исследуемой детали.

Плотность полиамида в 2,7 раз ниже, чем силумина, следовательно, уменьшение массы должно приводить к увеличению собственных частот, однако разница физико-механических свойств исследуемых материалов, по которым

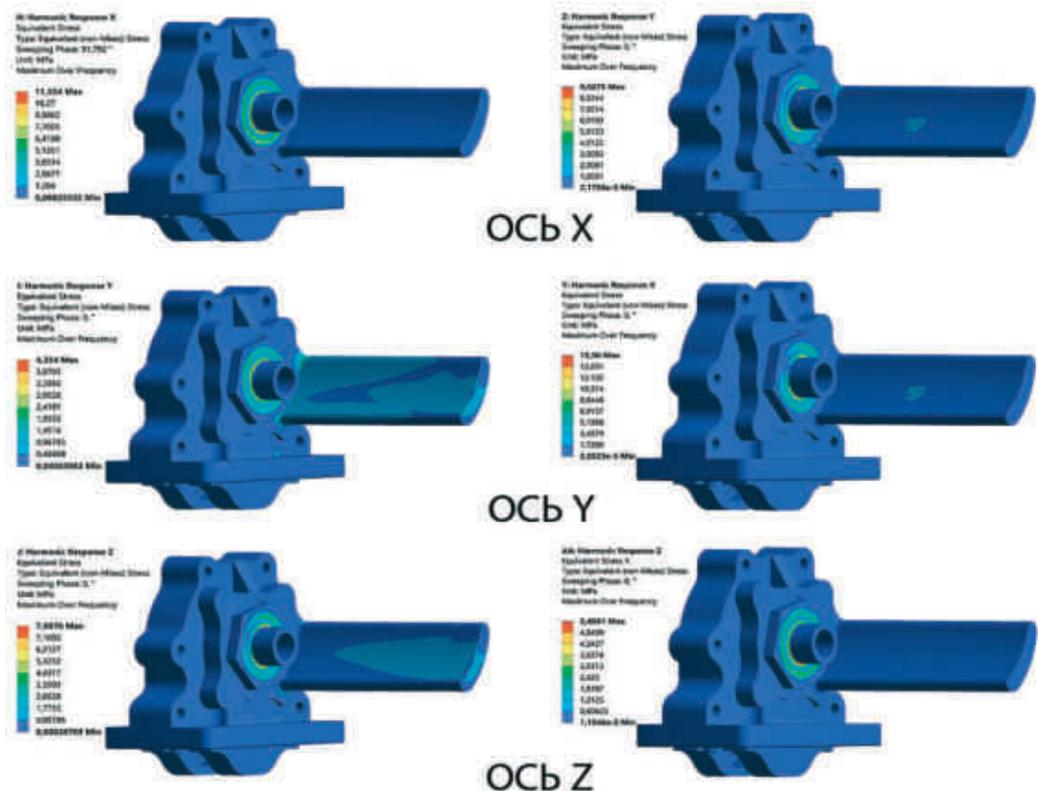


Рис. 8.  
Эюры распределения  
эквивалентных напряжений  
при гармоническом нагружении  
(силумин – слева,  
полиамид – 12 – справа)

определяется жесткость закрепления, намного больше (модуль Юнга для полиамида 1,2 ГПа, для силумина 71 ГПа). Это приводит к тому, что собственные частоты изделия из полиамида будут намного ниже аналогов, изготовленных из металла.

Таким образом, результаты расчета динамической прочности исследуемой детали показывают, что изделие из полиамида удовлетворяет условиям вибронадежности.

## Заключение

В результате проведенного исследования было установлено, что при комплексном воздействии – силовом, гидродинамическом и тепловом – изделие из полиамида-12 удовлетворяет условиям конструкционной и вибрационной прочности и может использоваться для замены оригинального металлического изделия.

Положительный результат, полученный в ходе расчетов, может стать основанием для дальнейшего развития направления оперативного ремонта изделий, вышедших из строя, путем замены их пластиковым аналогом, который соответствует основному назначению оригинальной детали.

Для масштабирования данного направления нужно создавать отечественные автономные мобильные ремонтные комплексы, осуществляющие оперативный ремонт оборудования. Это имеет следующие преимущества:

- наличие ремонтного комплекса вблизи обслуживаемого оборудования позволит снизить время простоя в случае его поломки или выхода из строя и сэкономит время, необходимое для отправки его в ремонтный цех или ожидания доставки необходимых деталей;
- низкая стоимость ремонта вследствие отсутствия затрат на логистику;
- удельный вес пластика до 10 раз меньше, чем металла, следовательно, изготовленные детали будут гораздо легче, что является преимуществом для оборудования, где масса изделия является важным фактором.

В целом, применение данной технологии позволит сократить временные и материальные затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования, что повысит его эффективность и эксплуатационную надежность. **Д**

### Список используемых источников

1. *Additive manufacturing scores well in repairs and sustainability* [Электрон. ресурс]. – URL: <https://spaener.com/en/article/additive-manufacturing-scores-well-in-repairs-and-sustainability> (дата обращения 01.03.2024).

2. *2H. Everett, 3D printing included in white house's updated list of critical and emerging tech-*

*nologies* [Электрон. ресурс]. – URL: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-included-in-white-houses-updated-list-of-critical-and-emerging-technologies-204227/> (дата обращения: 01.03.24).

3. *Rojas H. A. The Mobile Smart Factory – A Unique Portable CNC Machine Solution* [Электрон. ресурс]. – URL: <https://metrom.com/mobile-smart-factory-portable-cnc-machine-solution/> (дата обращения: 01.03.24).

4. *Анализ обеспеченности российского рынка пластиками / Под. рук. С.В. Головановой / Институт анализа предприятий и рынков НИУ «ВШЭ», 2023.*

5. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. Учебное пособие / Под общ. ред. А.А. Берлина. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2014. – 592 с.*

6. *Пластмассы со специальными свойствами. Сборник научных трудов / Под общ. ред. Н.А. Лаврова. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. – 344 с.*

7. *TECASINT (PI) 4000* [Электрон. ресурс]. – URL: <https://polimer1.ru/catalog/vysokoeffektivnye-polimery/tecasint-pi-4000> (дата обращения 01.03.2024).

8. *Барсков В.В. Применение аддитивных технологий при создании газотурбинных двигателей для кораблей военно-морского флота РФ / В.В. Барсков, В.С. Котов, А.В. Панкратов // Судостроение. – 2018. – № 5.*

9. *Барсков В.В. Результаты исследований возможности использования полимеров для создания элементов корабельных газотурбинных двигателей с использованием аддитивных технологий / В.В. Барсков, В.С. Котов, А.В. Панкратов // Труды Крыловского государственного научного центра. – Т. 4, № 390. – 2019.*

10. *SLS – технология 3D-печати из полимерных порошков* [Электрон. ресурс]. – URL: <https://globatek.ru/3d-wiki/3d-printing-technologies/sls> (дата обращения 01.03.2024).

11. *ГОСТ 30631-99. Межгосударственный стандарт. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации.*

12. *Дубинов Ю.С. Моделирование демпфирующих свойств материалов для изготовления нефтегазового оборудования с применением САПР SolidWorks: учебно-методическое пособие / Ю.С. Дубинов, А.К. Прыгаев, Р.Л. Байтемиров [и др.] // ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина». – 2021.*

## Развитие систем фильтрации и применение высокоэффективных HEPA фильтров

**Е. В. Арахланов<sup>1</sup>** – главный инженер, ztec@bgkrb.ru

**А. Р. Богдан<sup>2</sup>** – эксперт, a.bogdan@emwtech.ru

**В. Д. Буров<sup>3</sup>**, к.т.н. – профессор, BurovVD@mpei.ru

**В. И. Быличкин<sup>4</sup>** – управляющий, bylichkin.v@pe-tech.ru

**Ю. А. Макаркин<sup>4</sup>** – инженер, y.makarkin@pe-tech.ru

<sup>1</sup>Затонская ТЭЦ ООО «БГК»

<sup>2</sup>ООО «ЕМВ фильтртехник рус»

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (МЭИ)

<sup>4</sup>ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз»

### Ключевые слова:

газотурбинная установка, комплексное воздухоочистительное устройство, фильтрация рабочего тела ГТУ, загрязнение воздуха, деградация мощности ГТУ

### Аннотация

В работе рассмотрена одна из основных проблем газовых турбин – качество подготовки рабочего тела ГТУ и защита двигателя от попадания инородных частиц. Как известно, в атмосферном воздухе содержится огромное количество примесей, поэтому системы фильтрации входящего воздуха необходимы для любой ГТ. Из простых систем удаления грубых твердых частиц они эволюционировали в сложные системы фильтрации, удаляющие как твердые, так и жидкие частицы. Это обусловлено тем, что газовые турбины становятся все более чувствительными к попадающим в нее инородным частицам, что в свою очередь связано с повышением рабочих температур и увели-

чением расхода воздуха при работе современных ГТУ. Низкое качество входящего воздуха может существенно повлиять на работу, производительность и срок службы ГТУ.

Последствиями некачественной подготовки воздуха являются загрязнение, эрозия и коррозия – эти процессы приводят к деградации мощности газовой турбины. Для минимизации данного эффекта в КВОУ ГТУ устанавливаются высокоэффективные фильтры HEPA в качестве финишной ступени очистки. Но из-за широкого диапазона размеров частиц, содержащихся в атмосферном воздухе, одного высокоэффективного фильтра недостаточно – необходимы фильтры предварительной очистки.

## Evolution of filtration systems and use of highly effective HEPA filters

**E. V. Arakhlanov<sup>1</sup>** – Chief Engineer, ztec@bgkrb.ru

**A. R. Bogdan<sup>2</sup>** – Expert, a.bogdan@emwtech.ru

**V. D. Burov<sup>3</sup>**, PhD in Engineering – Professor, BurovVD@mpei.ru

**V. I. Bylichkin<sup>4</sup>** – Managing Director, bylichkin.v@pe-tech.ru

**Yu. A. Makarkin<sup>4</sup>** – Engineer, y.makarkin@pe-tech.ru

<sup>1</sup>Zatonskaya CСPP, Bashkir Generation Company LLC

<sup>2</sup>EMW Filtrertechnik Rus LLC

<sup>3</sup>National Research University MPEI

<sup>4</sup>Power Engineering Technologies LLC

### Key words:

gas turbine plant, inlet air filtration system, preparation of the GTP working fluid, air pollution, GTP power degradation

### Abstract

The paper considers one of the main problems of gas turbines – the quality of preparation of the working fluid of gas turbine plant and protection of the engine from ingress of foreign particles. Atmospheric air contains a huge amount of impurities, so incoming air filtration systems are necessary for any gas turbine. From simple coarse particulate removal systems, they have evolved into sophisticated filtration systems that remove both solid and liquid particles. This is due to the fact that gas turbines are becoming increasingly sensitive to foreign particles entering it, which in turn is associated with an increase in operating temper-

atures and an increase in air consumption during operation of modern gas turbine engines. The poor quality of the incoming air can significantly affect the operation, performance and service life of the gas turbine engine.

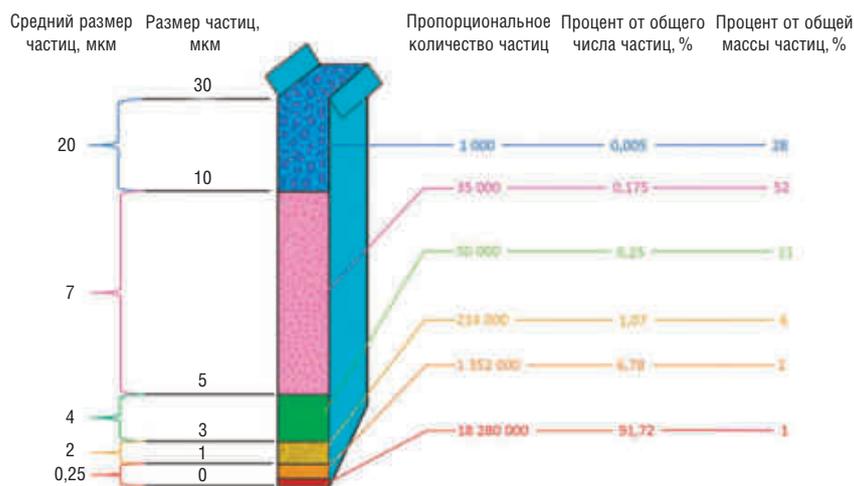
The consequences of poor-quality air treatment are pollution, erosion and corrosion – these processes lead to degradation of gas turbine power. To minimize this effect, high-performance HEPA filters are installed in the inlet air filter unit of GTP as the final stage of purification. But due to the wide range of particle sizes contained in atmospheric air pre-cleaning filters are necessary.

Газовая турбина в общем виде – это двигатель внутреннего сгорания, работающий на газообразном или жидком топливе. Посредством вращающегося вала получаемая энергия передается электрическому генератору, компрессору или другому механизму. В области электроэнергетики газотурбинные установки (ГТУ) становятся основной технологией преобразования ископаемого топлива в электроэнергию. Обычные паросиловые блоки, работавшие на газе или мазуте, заменяются парогазовыми установками (ПГУ) комбинированного цикла, в которых газовая турбина используется для сжигания топлива и генерации 2/3 электрической мощности блока ПГУ, а выхлопной поток газа от ГТУ используется для генерации пара в паросиловой части, где генерируется оставшаяся 1/3 мощности ПГУ.

В течение последнего десятилетия доля таких технологий в энергобалансе России только возрастает. И если в 2012 году доля блоков ГТУ и ПГУ составляла 6 % от общей генерации, то в 2022-м она возросла до 20,95 % (4,88 % ГТУ и 16,07 % ПГУ) [1, 2]. Причиной развития подобных технологий является высокий коэффициент полезного действия блоков ПГУ, который может достигать 65 %. Кроме того, современные газовые турбины отличаются низким значением выбросов оксидов углерода и азота, в связи с чем удовлетворяют всем экологическим требованиям [3].

За последнее время единичная мощность газовой турбины возросла до 571 МВт, а температура газов на входе в проточную часть турбины – до 1600 °С (для ГТУ GE 9HA.02). Рабочим телом в цикле ГТУ является смесь сжатого в осевом компрессоре (ОК) воздуха и продуктов сгорания топлива. Доля топлива от общего расхода газозооной смеси, в зависимости от турбины, обычно составляет около 3 % – остальные 97 % приходятся на забираемый компрессором атмосферный воздух. Чем мощнее ГТУ, тем большее количество воздуха требуется для ее работы. В табл. приведены турбины различной мощности и расходы воздуха через ОК при 100 %-й нагрузке [4].

Атмосферный воздух – это смесь газов, содержащая примерно 21 % кислорода, 78 % азота, 1 % аргона и углекислого газа, а также другие газы. Помимо этого, в его составе присутствуют так называемые распыленные аэрозоли (взвесь твердых или жидких частиц, распыленных в воздухе). Наиболее важным свойством аэрозоля является размер его частиц:



чем меньше частицы, тем сложнее отделить эти примеси от газовой фазы, в которой они взвешены [5]. Атмосферные частицы можно разделить на три основных вида:

- грубые частицы размером более чем 3 мкм – обычно образуются в результате механического распада твердых веществ, преимущественно природных и химически инертных;
- тонкие частицы размером от 1 до 3 мкм – более сложные с точки зрения химии, так как образуются в результате химических реакций или конденсации газов;
- ультратонкие частицы менее 0,1 мкм – появляются в результате реакции газов с другими частицами или распада более крупных частиц.

Концентрация частиц различного размера обычно измеряется в единицах массы или в количестве этих частиц. Методы и стандарты испытаний для фильтров основаны на этих двух способах. На рис. 1 представлено процентное распределение частиц различного размера по массе и по количеству в образце атмосферного воздуха [6].

Как видно из рисунка, наибольшее количество частиц находится в диапазоне размеров от 0,1 до 2,0 мкм (98,5 от общего числа частиц), при этом массовая доля этих частиц составляет всего 3 % от общей массы. Тогда

Марка турбины (Производитель)	Мощность ГТУ, МВт	Расход воздуха через ОК ГТУ, кг/с
H-25(42) (Mitsubishi Power)	42	109
6F.03 (GE Vernova)	88	208
ГТЭ-170.1 (Силовые машины)	155	521
SGT5-4000F (Siemens Energy)	385	709
9HA.02 (GE Vernova)	571	970

Рис. 1. Типичное распределение по размерам образца атмосферной пыли

Табл. Увеличение расхода воздуха через компрессор в зависимости от мощности ГТУ

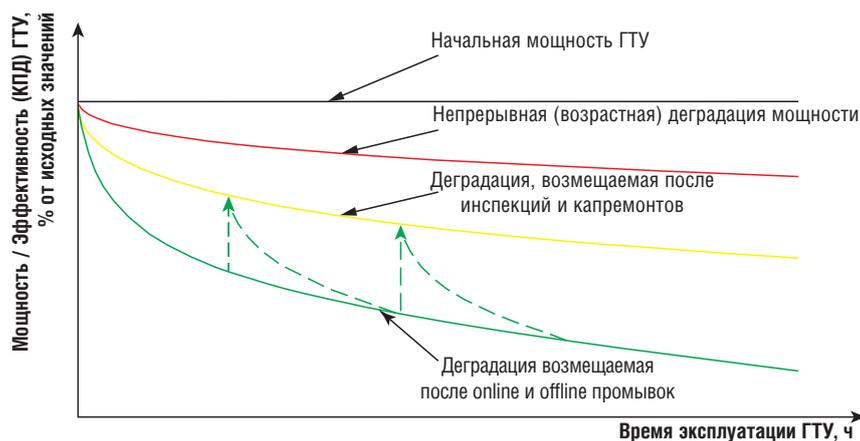


Рис. 2.  
Деградация характеристик ГТУ  
с течением времени

при работе турбины ГТЭ-170.1, при расходе воздуха 425 м<sup>3</sup>/с, ежегодно вместе с воздухом в воздуховод будет попадать около 5300 кг различных примесей.

Для предотвращения попадания такого огромного количества примесей, содержащихся в атмосферном воздухе, в ГТУ применяется система фильтрации. Качественная система фильтрации разрабатывается и подбирается для предотвращения снижения производительности ГТУ (и даже ее разрушения). Чтобы оценить важность системы фильтрации циклового воздуха ГТУ, нужно понимать, к каким последствиям приводит плохая система фильтрации или ее отсутствие. Разнообразие частиц как по размеру, так и по механизму их образования может вызвать ряд проблем, отрицательно влияющих на надежность и производительность ГТУ. На различных элементах газовой турбины могут появляться загрязнения, коррозия, эрозия и повреждения крупными частицами [6].

Повреждение крупными частицами может наблюдаться при отсутствии качественной фильтрации всасываемого воздуха в ОК газовой турбины. Данное явление наиболее заметно на первых ступенях компрессора. Плохо спроектированные комплексные воздухоочистительные установки (КВОУ), включающие фильтры, могут допускать повреждения подобными частицами.

Эрозия – процесс, вызванный попаданием частиц размером от 5 до 10 мкм и более на металлические поверхности. Самой типичной причиной появления эрозии являются частицы песка. Подобные твердые частицы сталкиваются с аэродинамическим профилем лопаток статора и ротора и постепенно удаляют частицы металла, в конечном итоге изменяя форму детали. Изменение формы лопаток и других деталей проточной части компрессора изменяет пути потока воздуха, делает поверхности шероховатыми, создает области концентрации напряжений. Процесс

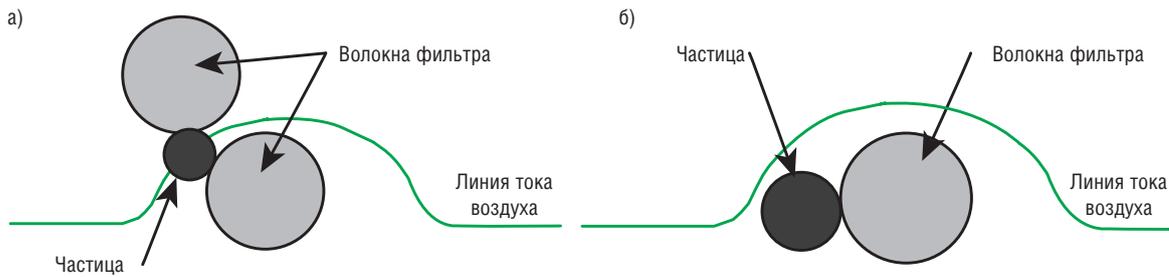
эрозии необратим, и единственный способ вернуть лопатки в исходное состояние – это их полная замена. Современные системы фильтрации позволяют эффективно очищать воздух от частиц, вызывающих эрозию. Наиболее эффективными для удаления частиц подобного размера являются самоочищающиеся или импульсные фильтры.

Если вместе с всасываемым воздухом в тракт ГТУ попадают химически активные соединения, такие как соли, минеральные кислоты, а также газы, содержащие оксиды хлора и серы, может начаться процесс холодной коррозии. Все эти соединения вместе с влагой, содержащейся в атмосферном воздухе, вступают в химическую реакцию с металлическими поверхностями проточной части компрессора – это может привести к отслоению части металла с поверхности детали. Результаты коррозии схожи с эрозией, за исключением того, что процесс коррозии может протекать в трещинах металла, ускоряя другие разрушающие процессы. Процесс коррозии необратим, поэтому, как и при эрозии, единственный способ вернуть исходное состояние деталей – полная их замена.

По мере уменьшения размера, а также твердости всасываемых компрессором частиц характер их влияния на элементы проточной части ОК меняется от эрозии до загрязнения. Загрязнения являются одним из основных механизмов, снижающих производительность газовых турбин. Мелкодисперсные частицы, содержащиеся в атмосферном воздухе, вместе с парами нефтепродуктов, масла, воды или других вязких веществ образуют вязкую субстанцию, которая прилипает к поверхностям ОК. В результате меняется аэродинамический профиль лопаток, закупориваются охлаждающие каналы газовой турбины, появляются локальные зоны перегрева, что в свою очередь вызывает высокотемпературную коррозию.

Результатом всех вышеперечисленных процессов, происходящих на поверхностях лопаток ОК, охлаждающих каналов ротора и лопаток газовой турбины, является падение мощности ГТУ. Последствия при этом могут быть следующие:

- снижение производительности, устраняемое чисткой или промывкой;
- снижение производительности, устраняемое после проведения инспекций и капитальных ремонтов;
- постоянное (возрастное) ухудшение характеристик, которое нельзя остановить в результате капитального ремонта и восстановления зазоров, замены деталей и т.п.



**Рис. 3.**  
**Фильтрация циклового воздуха для частиц размером более 1 мкм:**  
 а) механизм сита;  
 б) инерционный механизм

Во время проведения капитального ремонта ГТУ очищают все компоненты турбины, затирают повреждения на отдельных элементах или полностью их заменяют новыми. Однако после завершения ремонта выясняется, что мощность и эффективность восстановленной ГТУ ниже, чем у новой турбины, полученной от производителя. Это обусловлено устареванием и изнашиванием отдельных деталей ГТУ, что в результате приводит к непрерывному снижению производительности турбины.

При работе турбины частицы, которые прошли мимо системы фильтрации воздуха, осаждаются и скапливаются на поверхностях газоздушного тракта ГТУ. Помимо этого, если возникла утечка масла, нефтепродуктов или любых других химикатов, на всасывающем патрубке ОК, на лопатках входного направляющего аппарата (ВНА) и последующих ступенях образуется слой липких отложений, который с течением времени увеличивается в результате налипания мелкодисперсных частиц. Для очистки проточной части ОК от подобных загрязнений применяют промывочные жидкости. При этом частота проведения промывок и расход промывочной жидкости напрямую зависят от системы фильтрации циклового воздуха ГТУ. Дegradация характеристик ГТУ с течением времени показана на рис. 2.

Помимо устранения последствий присутствия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, важно очищать всасываемый воздух. Качественная подготовка воздуха значительно сокращает количество частиц, попадающих на лопатки, а также на другие элементы газовой турбины. В результате замедляется снижение

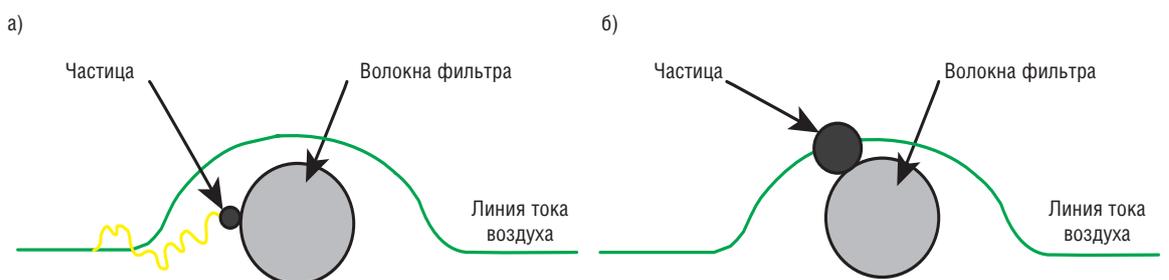
производительности турбины, увеличивается ресурс ее работы.

Для того чтобы улавливать частицы, имеющие очень широкий диапазон размеров, в воздушных фильтрах применяются разные механизмы фильтрации. Самый простой механизм улавливания частиц – сито (рис. 3а). Если размер частицы больше, чем расстояние между волокнами фильтра, она не пройдет дальше.

Механизм инерционного улавливания (рис. 3б) применим к частицам, размер которых превышает 1 мкм. При прохождении фильтра поток воздуха огибает его волокно, а тяжелые частицы, по причине своей массы и скорости, огибают волокно по дуге большего радиуса, попадая на него.

Приведенные механизмы в основном применимы к крупным и тяжелым частицам. Для частиц размером менее 0,1 мкм работает механизм диффузии. Согласно справочнику ASHRAE, переносимые по воздуху частицы пыли размером менее 0,1 мкм ведут себя как газ и поэтому находятся в хаотичном броуновском движении [5]. Траектория движения таких частиц хаотично колеблется относительно потока воздуха. В ходе таких колебаний частица выходит из потока, касается волокна и осаждается (рис. 4а).

В составе атмосферного воздуха наибольшее количество приходится на частицы с «промежуточным» размером – около 0,25 мкм (рис. 1). Для подобных частиц механизм инерции работает неполно из-за их небольшой массы, а эффект диффузии меньше, чем для частиц размером 0,1 мкм, либо вовсе отсутствует. Поэтому такие частицы с боль-



**Рис. 4.**  
**Фильтрация циклового воздуха для частиц размером менее 0,1 мкм:**  
 а) механизм диффузии;  
 б) механизм зацепления

шей вероятностью остаются в потоке и огибают волокна вместе с воздухом. Их называют частицами с наибольшей проникающей способностью, или Most Penetrating Particle Size (MPPS). И для их осаждения на фильтре наибольшее влияние оказывает механизм зацепления (рис. 4б). Данный механизм работает, когда частица приблизилась к поверхности волокна на расстояние своего радиуса – такого соприкосновения достаточно для осаждения частицы.

Последний механизм фильтрации – электростатический заряд. Фильтрация осуществляется за счет действия кулоновских сил, когда частица и фильтр обладают противоположными по знаку зарядами, за счет чего частица притягивается к волокну и осаждается. Этот механизм эффективен для всего рассматриваемого диапазона частиц. Заряд на фильтре создают в процессе его производства. С течением времени эксплуатации фильтр постепенно нейтрализуется и теряет свой заряд из-за осаждающихся на него частиц.

В реальном фильтре все эти механизмы работают одновременно. Конечный показатель эффективности фильтра складывается из эффективности осаждения частиц для отдельных механизмов. Однако в одних фильтрах преобладают механизмы для осаждения крупных частиц, а в других – для мелкодисперсных частиц.

Фильтры грубой очистки (ФГО) предназначены для очистки воздуха от грубодисперсных частиц или пыли. К ФГО относятся фильтры классов G1–G4. Класс ФГО определяется по пылезадерживающей способности: отношение массы пыли, задержанной фильтром, к общей массе пыли. Например, для фильтра класса G4, пылезадерживающая способность которого более 95 %, из 100 граммов пыли, поданной на фильтр, 95 граммов осаждаются на волокна фильтра, а оставшиеся 5 граммов проходят вместе с воздухом.

К фильтрам средней очистки относятся фильтры классов M5–M6. Классификация таких фильтров производится по эффективности осаждения частиц размером 0,4 мкм. Для фильтра класса M6, имеющего эффективность в диапазоне от 60 до 80 %, из 100 частиц размером 0,4 мкм, поданных на фильтр, около 70 частиц осадут на фильтре, а 30 пройдут через него. Эффективность ФГО классов F7–F9 определяется таким же образом.

Фильтры классов G1–G4, M5–M6, F7–F9 определяются согласно стандарту ГОСТ Р ЕН 779-2014. В процессе испытаний эффективность определяется только по частицам размером 0,4 мкм. Такие высокоэффек-

тивные фильтры, как EPA (Efficient Particulate Air) и HEPA (High Efficient Particulate Air), определяются согласно ГОСТ Р ЕН 1822-2010. Отличие от предыдущего стандарта заключается в методологии испытания фильтра.

При испытаниях пылью с различным размером частиц определяется размер MPPS, а затем эффективность фильтра от частиц этого размера – интегральная эффективность. Для высокоэффективных фильтров размер MPPS обычно составляет 0,1...0,3 мкм. Для фильтра класса E10, эффективность которого 85 %, из 100 частиц размера MPPS на фильтре осадит 85 из них. При этом остальные частицы осаждаются с вероятностью почти 100 %.

К EPA фильтрам относятся фильтры классов E10–E12, а к HEPA – фильтры классов H13–H14. Также разделяют фильтры ULPA (Ultra Low Particle Air), эффективность которых стремится к 100 %-й очистке от частиц MPPS и, соответственно, от частиц других размеров. Однако по причине своей высокой стоимости они не применяются в составе КВОУ энергетических ГТУ.

При сравнении фильтров важно сравнивать одинаково рассчитанную эффективность, т.е. рассчитанная по отношению массы или по площади (пятно пыли) эффективность не может сравниваться с рассчитанной по количеству частиц. Как было сказано выше, эффективность фильтра класса F9 составляет 95 %, а эффективность (интегральная) фильтра E10 – 85 %. Чтобы понять, чем отличаются данные значения и почему фильтр E10 пропускает меньше частиц, рассмотрим следующий пример. В воздухе содержится 101 сферическая частица одинаковой плотности. Из них у 100 частиц диаметр 0,1 мкм, а у одной – диаметр 1 мкм. Допустим, фильтр уловил только одну частицу диаметром 1 мкм, объем и масса которой в 1000 раз больше, чем у частицы размером 0,1 мкм. Площадь частицы 1 мкм больше в 100 раз площади частицы 0,1 мкм. Рассчитаем эффективность по массе, площади и числу частиц:

эффективность по массе

$$\left(\frac{1000}{1000 + 100}\right) \cdot 100\% = 90,91\%;$$

эффективность по площади

$$\left(\frac{100}{100 + 100}\right) \cdot 100\% = 50,00\%;$$

эффективность по числу частиц

$$\left(\frac{1}{1 + 100}\right) \cdot 100\% = 0,99\%.$$

Исходя из данного примера, а также из состава атмосферной пыли (рис. 1) становится очевидно, что для предотвращения попадания огромного количества мелкодисперсных частиц в качестве последней ступени очистки воздуха нужно применять высокоэффективные ЕРА и НЕРА фильтры. Диапазон размеров частиц, которые необходимо отфильтровать, составляет от 0,01 мкм до 3 мм. Такой разброс размеров соответствует соотношению размеров 10-рублевой монеты и горы высотой 3000 м. Эта аналогия объясняет причину применения многоступенчатых конфигураций систем фильтрации воздуха [7].

При работе воздушных фильтров осаждаемые частицы остаются на поверхности волокна и уменьшают площадь для прохождения воздуха, из-за этого снижается ресурс работы фильтра и увеличивается создаваемое им аэродинамическое сопротивление. Поэтому недостаточно установить один высокоэффективный фильтр в КВОУ газовой турбины – он быстро потеряет свой ресурс, и его придется заменить. В связи с этим для продления ресурса работы последней ступени применяют фильтры предварительной очистки.

В качестве фильтров предварительной очистки применяются упомянутые выше фильтры, класс которых определяется согласно ГОСТ Р ЕН 779-2014. При этом фильтры предварительной очистки должны быть на три-четыре класса ниже, чем следующие за ними [8]. Например, перед фильтром финишной очистки класса Е10 должен стоять предварительный фильтр класса F7 или F8, а перед ними, в свою очередь, фильтры класса G4 или M5. Смысл подобной системы заключается в следующем. Фильтр первой ступени в виде ФГО класса G2–M6 задерживает грубодисперсные частицы (самые крупные и тяжелые). Фильтр второй ступени в виде ФТО класса F7–F9 осаждает тонкие частицы размером около 0,4 мкм. Третья ступень представляет собой ступень финишной очистки в виде фильтра класса Е10–Н14, очищающего воздух от самой многочисленной группы частиц размером около 0,25 мкм.

Таким образом, волокна высокоэффективного фильтра не забиваются крупными и тяжелыми частицами, и фильтр работает по своему назначению, очищая воздух от мелкодисперсной пыли размером МППС. Важно отметить, что в данном случае речь идет только о классе фильтра при испытаниях. Конструкция и механизм фильтрации могут быть разными – инерционный пылеуловитель, импульсная система или статические системы фильтрации, получившие широкое распространение в области энергетических ГТУ.

## Выводы

Газотурбинные технологии продолжают активно развиваться. Новейшие модели становятся более чувствительными к качеству воздуха, в цикле ГТУ. Современный уровень развития фильтрационных технологий позволяет практически устранить такие явления, как коррозия и эрозия в воздушном тракте осевого компрессора и в охлаждающих каналах лопаток газовой турбины.

Исходя из соотношения размеров частиц, содержащихся в атмосферном воздухе, применение высокоэффективных НЕРА фильтров необходимо. Это позволяет снизить интенсивность загрязнения лопаток компрессора и, как следствие, замедлить снижение технико-экономических показателей ГТУ, вызванное деградацией мощности. Несмотря на то что конечная эффективность фильтрации воздуха зависит от эффективности последней ступени, фильтры предварительной очистки необходимы. И поскольку они осаждают крупные частицы, фильтрующий материал высокоэффективных НЕРА фильтров не теряет свой ресурс и очищает воздух от тонких частиц. **Т**

### Список использованных источников

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2011 году [Электрон. ресурс] – URL: UES report 2011 (so-ups.ru) (дата обращения: 27.02.2024).
2. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году [Электрон. ресурс]. – URL: Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году (so-ups.ru) (дата обращения: 27.02.2024).
3. Цанев С. В., Бузов В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: под ред. С. В. Цанева – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584 с., ил.
4. Каталог энергетического оборудования «Турбины и дизели». – 2023.
5. NAFA Guide to Air Filtration Sixth Edition, Chapter 1, National Air Filtration Association, 2021.
6. Wilcox M. Guideline for gas turbine inlet air filtration systems / M. Wilcox, R. Baldwin, A. Garcia-Hernandez, K. Brun // Southwest Research Institute. – 2010.
7. Schroth T. Economical Benefits of Highly Efficient Three-Stage Intake Air Filtration for Gas Turbines / T. Schroth, M. Cagna // Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air. – 2008.
8. Маскромфт Ф. Воздушные фильтры для ГТУ: оптимальный выбор // Турбины и дизели. – 2008. – № 6. – с. 46-50.

# Первый опыт применения ГТУ-25П для производства СПГ

М. А. Снитко, П. М. Морозов – АО «ОДК-Авиадвигатель»

С 2021 года в проекте «Ямал-СПГ» (ПАО «НОВАТЭК») эксплуатируется газоперекачивающий агрегат для производства сжиженного природного газа (СПГ). Приводом компрессорной установки по производству СПГ является газотурбинная установка ГТУ-25П с двигателем ПС-90ГП-25 разработки и производства предприятий «ОДК-Авиадвигатель» и «ОДК-Пермские моторы» (входят в объединенную двигателестроительную корпорацию Ростеха).

## In brief

### The first experience of GTU-25P application for LNG production

Since 2021, the Yamal LNG project (NOVATEK PJSC) has been operating gas pumping unit for the production of liquefied natural gas (LNG). The drive of the LNG compressor unit is a GTU-25P gas turbine unit with a PS-90GP-25 engine developed and manufactured by UEC-Aviadvigatel and UEC-Perm Motors (part of the United Engine Corporation Rostec). The production and sale of liquefied natural gas is one of the most rapidly developing segments of the global energy sector. Today, LNG production in Russia is based on licensed technologies implemented by foreign contractors using imported gas turbine, compressor and heat exchange equipment. Therefore, LNG production in the Russian Federation is critically dependent on imported technologies. Their use is directly associated with significant risks of both a price nature (due to changes in exchange rates) and sanctions pressure.

Производство и продажа сжиженного природного газа – один из самых бурно развивающихся сегментов мировой энергетики. Сегодня производство СПГ в России основано на лицензионных технологиях, которые реализуют зарубежные подрядчики, применяя для этого импортное газотурбинное, компрессорное и теплообменное оборудование. Поэтому производство СПГ в РФ имеет критическую зависимость от импортных технологий. Их использование напрямую сопряжено с существенными рисками как ценового характера (вследствие изменения валютных курсов), так и санкционного давления. Создание отечественной технологии крупнотоннажного производства СПГ на базе оборудования российских предприятий – важная задача нефтегазовой отрасли.

Одна из компаний, сделавших первые шаги к созданию отечественной технологии производства СПГ, – ПАО «НОВАТЭК». В 2018 году компания получила российский патент на технологию сжижения природного газа «Арктический каскад», которая легла в основу создания завода по производству СПГ с применением отечественного основного оборудования. Процесс сжижения газа по данной техно-



логии обеспечивает высокую энергоэффективность за счет максимального использования условий арктического климата.

В технологии «Арктический каскад» используются основные физические процессы:

- конденсация этана в воздушных охладителях;
- предварительное охлаждение газа до  $-84^{\circ}\text{C}$  в этановых испарителях;
- доохлаждение и переохлаждение газа азотом до температуры  $-137^{\circ}\text{C}$ ;
- дросселирование переохлажденного газа до атмосферного давления.

Данную технологию производства СПГ целесообразно применять при среднегодовых температурах ниже  $+5^{\circ}\text{C}$  – при температуре наружного воздуха выше  $+20^{\circ}\text{C}$  она малоэффективна.

Для реализации такой технологической схемы потребовалось разработать и изготовить компрессорную установку для компримирования семи видов газа: этана пяти различных параметров, азота и природного газа. Организация данной технологической схемы на нескольких автономных компрессорных установках не только привела бы к значительному усложнению блока компримирования, но и снизила бы надежность работы установки по производству СПГ в целом.

Были проанализированы возможные способы реализации технологии, после чего принято решение разработать и применить интегрированную компрессорную установку с приводом от одного газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт.

В процессе разработки технологической линии для упрощения конструкции и повышения надежности работы компрессорной установки решено было использовать интегрированную установку на базе многовалвных мультипликаторов.

Рис. 1.

Газотурбинная установка ГТУ-25П  
в сборочном цехе НПК «Пермские моторы»

Предлагаемая кинематическая схема имеет следующие преимущества:

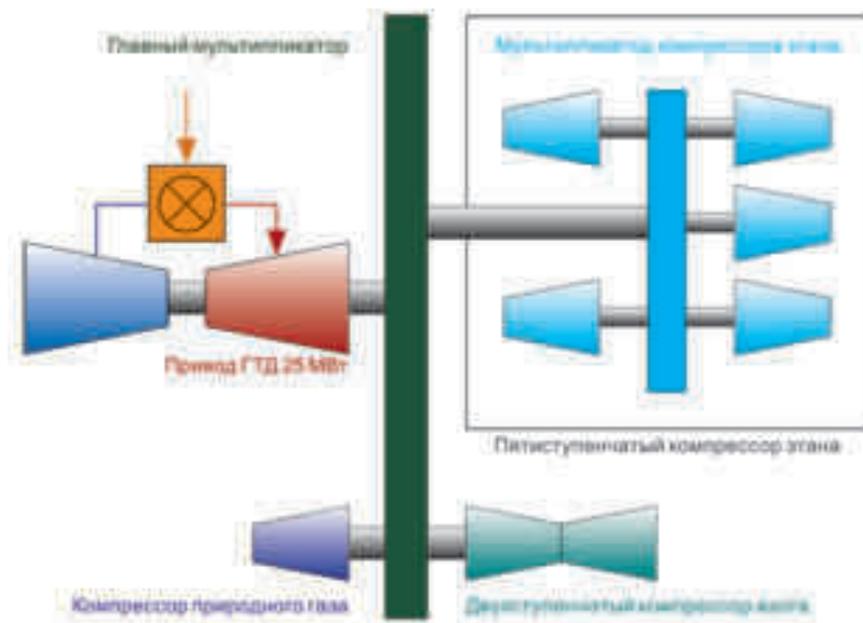
- возможность привода всех компрессоров от одного двигателя;
- различная частота вращения на номинальном режиме для отдельных ступеней компрессоров;
- компактность и малая металлоемкость;
- высокая надежность и живучесть компрессорной установки;
- высокая эффективность отдельных ступеней и компрессорной установки в целом;
- короткая линия вала;
- широкий диапазон регулирования по частоте вращения (70...105 % от номинальной);
- простота технического обслуживания;
- значительные резервы совершенствования и применения.

В качестве привода компрессорной установки по производству сжиженного природного газа применена газотурбинная установка ГТУ-25П с двигателем ПС-90ГП-25 разработки и производства предприятий научно-производственного комплекса «Пермские моторы». Данная ГТУ была выбрана не случайно: установки такой мощности и их модификации с 2004 года успешно эксплуатируются на объектах крупнейших газотранспортных, добывающих и энергетических компаний России. Суммарная наработка парка ГТУ-25П превышает два миллиона часов.

Применение ГТУ в составе газоперекачивающего агрегата (ГПА) и в составе газотурбинной электростанции имеет свои особенности. Для ГПА важна возможность регулирования производительности нагнетателя путем изменения частоты вращения выходного вала силовой турбины в пределах от 70 до 105 % номинальной. Для привода электрогенератора в составе электростанции требуется длительная устойчивая работа с номинальной мощностью при отклонении частоты вращения выходного вала привода генератора от 98 до 101 % номинальной.

В отличие от ГПА и ГТЭС, на установках сжижения природного газа требования к приводу компрессоров сырьевого газа и компонентов холодильного агента объединяют все вышеуказанные требования в отношении регулирования частоты вращения выходного вала и устойчивой работы на номинальной мощности.

В проекте «Ямал–СПГ» ГТУ-25П впервые применена в компрессорной установке по производству сжиженного газа. Поскольку для специалистов НПК «Пермские моторы» это был первый подобный опыт, потребовалось выполнить большой объем работ по разработке и согласованию проектной документации, программ испытаний и корректировке системы



автоматического управления. В результате в 2021 году объект был успешно введен в эксплуатацию.

В марте 2024 года наработка установки с двигателем ПС-90ГП-25 превысила 22 000 часов. Результаты эксплуатации опытно-промышленного образца технологической линии по производству СПГ «Арктический каскад» позволяют сделать вывод о надежности и эффективности предложенных технических решений. Это открывает большие перспективы для дальнейшего развития проекта «Ямал–СПГ», а также новый рынок для применения пермских промышленных двигателей в сфере производства сжиженного природного газа.

Следует отметить, что проект был реализован в сотрудничестве ПАО «НОВАТЭК», АО «Казанькомпрессормаш», АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» и НПК «Пермские моторы». Сегодня эти предприятия воплощают в жизнь очередной проект по производству СПГ на базе ГТУ-25П – на ЮжноТамбейском газоконденсатном месторождении. **TD**

Параметр	Значение
Мощность на валу силовой турбины, МВт	25,6
КПД на валу силовой турбины, %	39,2
Степень сжатия	27,8
Частота вращения силовой турбины, об/мин	5000
Температура газа на выходе из двигателя, °С	488
Расход рабочего тела через двигатель, кг/с	79,6
Ресурс до капитального ремонта, ч	25 000
Ресурс назначенный, ч	100 000
Габариты, ДхШхВ, мм	13716х2438х4500
Масса, кг	20 000

Рис. 2.

Схема интегрированной компрессорной установки на базе многовальных мультипликаторов

Табл.

Технические параметры ГТУ-25П в условиях ISO



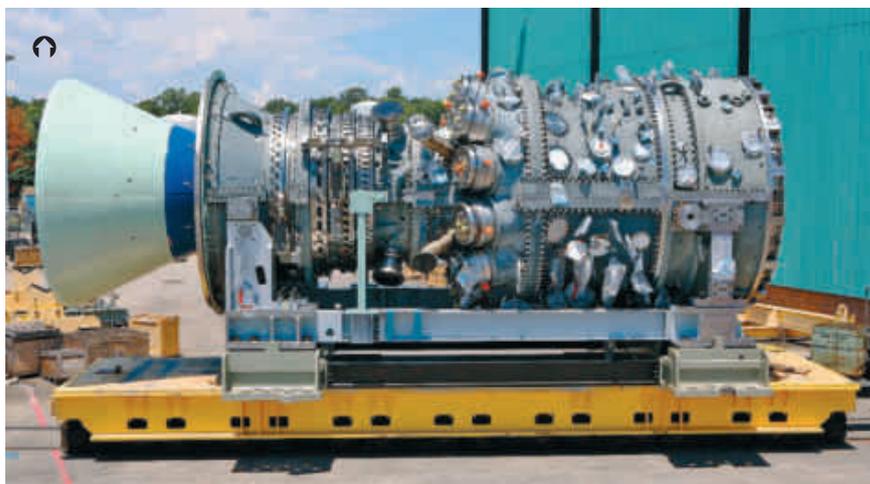
### Siemens и GE построят электростанции в Саудовской Аравии.

Четыре газотурбинные электростанции комбинированного цикла Taiba 1, Taiba 2, Qassim 1 и Qassim 2 мощностью по 2 ГВт будут построены в центральном и западном регионах страны. GE Vernova поставит оборудование для электростанций Taiba 1 и Qassim 1, Siemens Energy – для Taiba 2 и Qassim 2.

В рамках контракта, заключенного с SEPCOIII Electric Power Construction, GE поставит шесть ГТУ 7HA.03 и две ГТУ 7E.03. Компания SEPCOIII выступает генеральным подрядчиком по строительству электростанции Taiba 1 в г. Медина и Qassim 1 в г. Бурайда. Собственником и оператором станций будет компания National Operations & Maintenance – дочернее предприятие ACWA Power.

Ввод станций в коммерческую эксплуатацию запланирован на 2026 год. GE заключила также контракт на техническое обслуживание и ремонт оборудования в процессе эксплуатации в течение 21 года. В перспективе планируется работа ГТУ на топливной смеси с содержанием водорода до 50 %.

ГТУ, паровые турбины и электрогенераторы для электростанций Taiba 2 и Qassim 2 будут поставлены компанией Siemens Energy. Генподрядчиком по данным проектам выступит China Energy International Group. Новые электростанции будут введены в эксплуатацию в простом цикле в 2026 г., в 2027-м планируется их перевод в комбинированный цикл. Они заменяют ТЭЦ, использующие мазут в качестве топлива и выработавшие ресурс. Siemens заключила контракт на техобслуживание и ремонт электростанций в течение 25 лет, общая стоимость контракта составляет \$1,5 млрд.



### Завершены инспекции турбин SGT5-4000F на Лукомльской и Березовской ГРЭС.

Специалисты ООО «Современные технологии газовых турбин» («СТГТ») завершили две малые инспекции газовых турбин SGT5-4000F на Лукомльской ГРЭС (Витебскэнерго) и на Березовской ГРЭС (Брестэнерго) в Белоруссии.

Во время плановых работ специалисты компании провели оценку состояния деталей проточной части турбины, камер сгорания и вспомогательных систем ГТУ. Произведена замена дефектной жаропрочной плитки в камерах сгорания. На Лукомльской ГРЭС выполнена очистка горелочных устройств по оригинальной методике производителя – с применением специализированного ультразвукового оборудования. Данное оборудование является уникальным на российском рынке, также как и технология очистки горелочных устройств. После завершения работ выполнена пусконаладка во всем диапазоне нагрузок.

Работы на Березовской ГРЭС были осуществлены в течение 5 дней, на Лукомльской ГРЭС – в течение 14 дней, включая демонтаж, очистку и обратный монтаж горелочных устройств.

По мнению заказчиков, специалисты ООО «СТГТ» оперативно отреагировали на возникшие трудности, устранили выявленные непредвиденные дефекты камеры сгорания и в кратчайшие сроки доставили необходимый инструмент и запчасти, что позволило выполнить все договорные обязательства. Успешное завершение двух малых инспекций в Республике Беларусь в очередной раз доказало готовность компании обеспечивать обслуживание газовых турбин большой мощности за счет высокой локализации сервиса.

### ООО «Газовые машины» построит ТЭС в Краснодарском крае.

Электростанция будет обеспечивать собственные нужды крупного фермерского хозяйства. ГПЭС мощностью 1,5 МВт производства ООО «Газовые машины» (г. Ярославль) будет работать в базовом режиме. Внешняя сеть выступает в качестве резерва.

В состав станции входит газопоршневой энергоблок на базе двигателя 12M55G6N0/5 производства Moteurs Baudouin. Тепловая энергия будет использоваться в технологическом процессе рыбного хозяйства

Мини-ТЭС полностью обеспечит предприятие электрической и тепловой энергией.



**Выполнены монтажные работы на второй очереди ГТЭС предприятия «Арктик СПГ-2».**

Проект реализуется компанией «ОДК-Авиадвигатель» по контракту с ПАО «НОВАТЭК» и его дочерним предприятием – «Арктик СПГ-2». В ходе строительства первой очереди станции введены 4 энергоблока, созданные на базе ГТУ-12ПГ-2. Разработчиком и изготовителем энергоблоков ЭГЭС-12СА является АО «ОДК-Авиадвигатель».

ГТУ-ТЭС работает в составе локальной энергосистемы. Специалисты предприятия выполнили пусконаладочные работы и ввели в эксплуатацию систему утилизации тепла электростанции. Утилизация тепла выхлопных газов ГТУ осуществляется с помощью КУ производства Ухтинского экспериментально-механического завода.

Энергоблоки размещаются в просторных индивидуальных легкосборных зданиях, обеспечивающих температурный режим эксплуатации, комфортные условия работы обслуживающего персонала. Топливо – природный газ.

Ввод второй очереди станции в составе двух газотурбинных установок ЭГЭС-12СА планируется в 2024 году. Мощность ТЭС вырастет до 72 МВт.

**Installation works have been completed at the second stage of Arctic LNG-2 enterprise.**

The project is being implemented by UEC-Aviadvigatel under a contract with NOVATEK PJSC and its subsidiary Arctic LNG-2. During the construction of the first stage of the station, 4 power plants developed on the base of GTU-12PG-2 were commissioned. The designer and manufacturer of the EGES-12SA power plants is UEC-Aviadvigatel JSC. CHP station works as part of the local power system.

РЕКЛАМА

# Увеличение межсервисного интервала для газовых турбин SGT5-2000E и SGT5-4000F

А. Ю. Павлов, Н. А. Ефимов, В. Ю. Сазонов – ООО «Современные технологии газовых турбин»

Реализация опций гибких интервалов межсервисного обслуживания газовых турбин является в настоящее время одной из наиболее востребованных разработок ООО «СТГТ» для энергообъектов России. Данное решение реализуется квалифицированными специалистами за счет корректировки программного обеспечения в системе автоматического управления ГТУ с изменением температуры в камере сгорания. Благодаря наличию собственного программно-аппаратного стенда-симулятора, специалистам ООО «СТГТ» в результате работы удается достичь поставленной цели без какого-либо риска повреждения основного оборудования и обеспечить непрерывность работы энергообъектов.

## In brief

### Increasing the maintenance interval for SGT5-2000E and SGT5-4000F gas turbines

Since 2002, MGTT LLC has been engaged in its own department of service engineers for automation systems of power units. During this time, they have carried out a complex of works at more than 30 power plants.

Currently, the company's specialists carry out design-oriented development and modernization of the hardware and software of gas turbine plants automatic control system according to customer requirements, preparation and conducting acceptance tests of the GTP control equipment using their own software and hardware simulator.

В ООО «СТГТ» системами автоматизации энергоблоков с 2002 года занимается собственное подразделение сервисных инженеров по АСУ ТП. За это время они провели комплекс работ более чем на 30 электростанциях. В настоящее время специалисты предприятия осуществляют проектно-ориентированную разработку и модернизацию аппаратного и программного обеспечения САУ ГТУ по требованиям заказчика, подготовку и проведение приемосдаточных испытаний оборудования САУ ГТУ с использованием собственного программного и аппаратного симулятора. Выполняют пусконаладочные работы САУ ГТУ и системы защит на объектах заказчика, включая настройку основных функций регулятора ГТУ, пусковые операции и наладку режимов горения.

Проведение испытаний ОПРЧ, НПРЧ, ЧДА и передача ГТУ в промышленную эксплуатацию, системное администрирование САУ ГТУ, наладка серверного оборудования АСУ ТП, подключение и настройка сетевых компонентов, прошивка контроллеров – все это также является ответственностью

специалистов ООО «СТГТ». Следует отметить, что все работы по данным направлениям проводятся без ограничений как на АСУ ТП зарубежного изготовления, так и будут осуществляться на вновь устанавливаемых российских АСУ ТП (во исполнение Указа Президента РФ № 166 от 30.03.2022).

Одно из востребованных в настоящее время решений по автоматизации, разработанное специалистами «СТГТ» для своих заказчиков, – реализация на операторских станциях автоматизированных рабочих мест (АРМ) и в турбинном контроллере алгоритма переключения режима эксплуатации газовых турбин ГТЭ-160 и SGT5-2000E с межсервисного интервала 33 000 экв. часов (33 МАС) на 41 000 (41 МАС) и обратно, а также газовых турбин SGT5-4000F с интервала 33 000 экв. часов (33 МАС) на 50 000 (50 МАС), в зависимости от конфигурации оборудования для конкретного объекта.

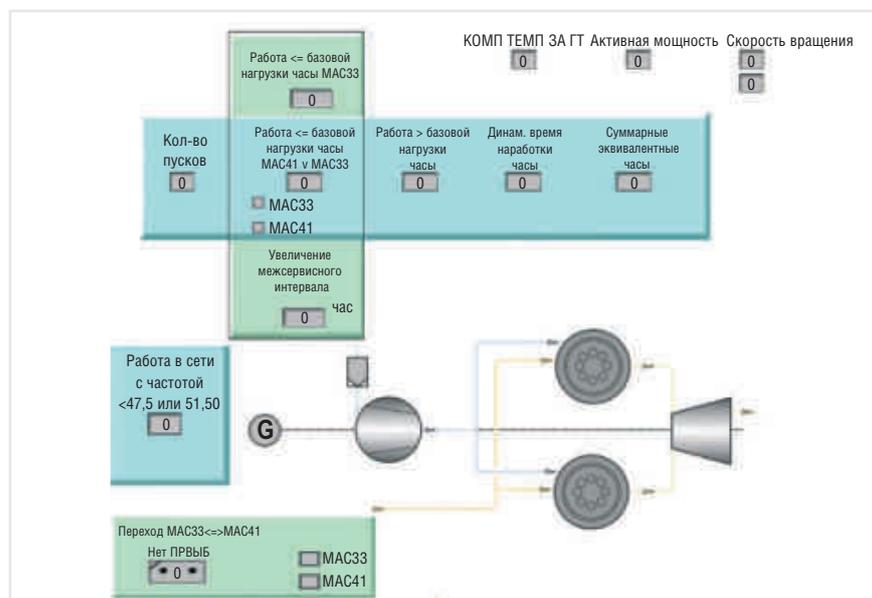
Переключение между режимами эксплуатации переводит работу газовой турбины на пониженную температуру в камере сгорания. Выбор режима эксплуатации осуществляется как на остановленной ГТУ, так и на всех режимах работы оборудования под нагрузкой. При этом на видеодиаграммах «Эквивалентные часы наработки» (рис. 1) и «Газовая турбина» (рис. 2) оператору становится доступна кнопка переключения режима работы и индикация активного состояния.

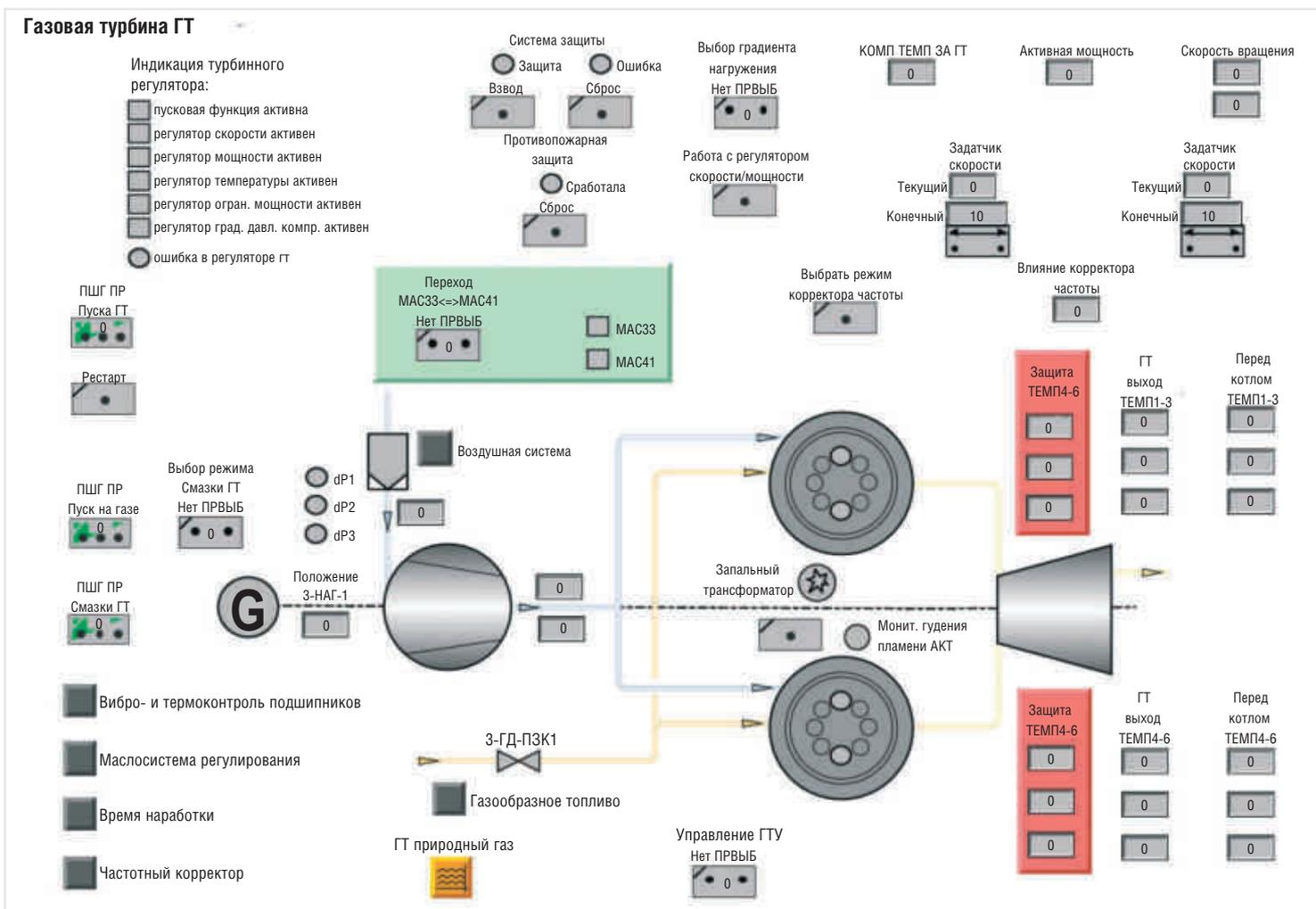
Пояснения к видеодиаграмме на рис. 1:

Параметр «Работа <= базовой нагрузки часы МАС33» показывает суммарное количество эквивалентных часов при работе ГТУ на нагрузке, меньшей или равной базовой, по алгоритму без учета понижающего коэффициента, независимо от выбранного режима работы – МАС33 или МАС41.

Рис. 1.

Пример видеодиаграммы «Эквивалентные часы наработки» ГТЭ-160, SGT5-2000E с кнопкой переключения режима работы





Параметр «Работа <= базовой нагрузки часы МАС41 – МАС33» – показывает суммарное количество эквивалентных часов при выбранном активном режиме «41 000 ЭЧЭ» или «33 000 ЭЧЭ» и работе ГТУ на нагрузке, меньшей или равной базовой. Данный параметр учитывается в подсчете суммарных эквивалентных часов.

Параметр «Увеличение межсервисного интервала» – показывает, на сколько увеличился межсервисный интервал при условии, что ГТУ работала на режиме «41 000 ЭЧЭ».

Пояснения к видеограмме рис. 2 «Переход МАС33 – МАС41» – предвыбор, позволяющий оператору-машинисту АРМ производить ручное переключения режима эксплуатации газовой турбины с 33 МАС на 41 МАС и обратно. Индикаторы:

«МАС33» – активен при работе ГТУ на режиме «33 000 ЭЧЭ»;

«МАС41» – активен при работе ГТУ на режиме «41 000 ЭЧЭ».

Изменение уставки температуры регулятора ВНА при переключении режима эксплуатации осуществляется плавно, что позволяет выполнить переход без резких изменений температурного режима и колебаний активной мощ-

ности генератора. При увеличении межсервисного интервала в расчете часов «Работа – базовой нагрузки» учитывается понижающий коэффициент, поэтому изменение времени выполняется медленнее, чем при выборе режима 33 МАС с коэффициентом интегрирования 1,0. Указанный и предложенный специалистами «СТГТ» метод подсчета эквивалентных часов позволяет сохранить неизменной величину интервалов наработки эквивалентных часов между инспекциями при работе газовой турбины в режиме «Работа – базовой нагрузки».

## Выводы

- Реализация предложенного алгоритма увеличения межсервисного интервала позволяет:
- увеличить срок между сервисными инспекциями газовых турбин без риска повреждения основного оборудования;
  - снизить риски температурного разрушения термозащитных плиток камеры сгорания и выходного диффузора вследствие контролируемого и плавного снижения температуры рабочего тела;
  - сократить расходы на техническое обслуживание газовой турбины. **ТД**

Рис. 2. Пример видеограммы «Газовая турбина» для ГТ3-160, SGT5-2000E с кнопкой переключения режима работы

## НПП «Уральская лаборатория вибрации»: системный подход к построению системы управления жизненным циклом энергетического оборудования

**М. А. Биялт (к.т.н.), Е. В. Бочкарев – ООО НПП «Уральская лаборатория вибрации»**  
**Д. С. Кшесинский – АО «Аппекслаб»**  
**А. Ю. Култышев, д.т.н. – АО «Конструкторское бюро «Рысь»»**

Научность и сложность задач, которые требуется решить в рамках построения системы управления жизненным циклом турбинного оборудования на текущем этапе развития энергетической инфраструктуры, диктует необходимость проведения комплексных исследований отраслевого масштаба. Они должны быть направлены на совершенствование существующих и разработку принципиально новых подходов и методов мониторинга, диагностики, наладки, а также организации ремонтно-технического обслуживания. Современная концепция управления жизненным циклом должна отвечать текущим реалиям и базироваться на принципах персонализированного подхода к оценке технического состояния турбоустановок, позволяющего максимально учитывать индивидуальные конструктивные особенности и условия эксплуатации оборудования.

### In brief

**Ural Vibration Laboratory  
NPP: a systematic approach  
to building a life cycle  
management system  
for power equipment**

The knowledge intensity and complexity of the tasks that need to be solved within the framework of building a life cycle management system for turbine equipment dictates the need for comprehensive research on an industry scale. They should be aimed at improving existing and developing fundamentally new approaches and methods for monitoring, diagnostics, commissioning, as well as organizing repair and maintenance services. The modern concept of life cycle management should meet current realities and be based on the principles of a personalized approach to assessing the technical condition of turbine plants.



Текущий этап развития энергоотрасли характеризуется поиском решений, направленных на переход от системы планово-предупредительного ремонта (ППР) к ремонту по техническому состоянию. Данная тенденция обусловлена не только сложившимся кадровым дефицитом в области ремонтно-технического обслуживания, но и значительным расширением номенклатуры используемого энергетического оборудования (в т.ч. импортного), а также существенными различиями в условиях его эксплуатации.

Высокая востребованность в услугах по диагностике и наладке турбинного оборудования, свойственная отечественному энергетическому рынку последних лет, стала основой развития научно-производственного предприятия «Уральская лаборатория вибрации» (НПП «УЛВ»), профиль которой сегодня сформирован следующими основными направлениями деятельности (применительно к энергетическому оборудованию):

- эксплуатационный мониторинг технического состояния (ТС), в т.ч. на принципах удаленного доступа;
- диагностика и механическая наладка;
- расчетно-аналитические и экспериментальные исследования энергетических объектов;
- динамическое обследование фундаментов;
- разработка специализированного технологического оборудования; малой модернизации тепломеханического оборудования;
- реверсивный инжиниринг систем, узлов и деталей оборудования различных отраслей промышленности;
- разработка и внедрение специализированного программного обеспечения.

НПП «УЛВ» основано 26 октября 2015 года группой единомышленников – инженеров и ученых, имеющих значительный практический и исследовательский опыт в области обеспечения надежности и прочности паровых и газовых турбин.

Компания выполняет инженерно-диагностическое сопровождение энергетического оборудования на различных этапах жизненного цикла, что обеспечивает непрерывность технологических процессов.

### На этапе эксплуатации:

- эксплуатационный мониторинг: выявление событий и тенденций, характеризующих изменение ТС;
- режимный мониторинг: состояние проточной части и вспомогательного оборудования турбоустановки;
- комплексное диагностическое обследование (вибрационное определение тепловых деформаций);
- инженерный анализ: экспертная оценка текущего ТС, разработка рекомендаций по повышению качества эксплуатации и объема ремонтных работ.

### При выводе в ремонт:

- вибрационное обследование турбоагрегата: оценка ТС валопровода, подшипниковых узлов, опорной системы агрегата, статора генератора, контактных колец генератора;
- диагностика системы тепловых расширений: оценка тепловых деформаций турбины;
- тепловые испытания: оценка ТС проточной части и вспомогательного оборудования установки;

- инженерный анализ: уточнение объема ремонтных работ и обоснование мероприятий по повышению надежности в период их проведения, формирование базовых эталонных характеристик для использования в дальнейшем для оценки качества и эффективности ремонта.

**В период проведения ремонта:**

- технологическое сопровождение ремонта: инструментальный контроль и дефектация, разработка и обоснование технических решений;
- конструкторское сопровождение ремонта: расчеты на прочность элементов конструкции и узлов с учетом фактического ТС, оценка допустимости выявленных дефектов, разработка карт контроля и, в случае необходимости, технических требований, расчет уравнивающих систем с учетом зафиксированного остаточного прогиба роторов;
- анализ линии валопровода: анализ текущих центровок агрегата и их изменений в межремонтный период, назначение индивидуальных расцентровок, расчет по критериям нагруженности и устойчивости валопровода на смазочном клине (рис. 1);

- балансировка роторов на станке и валопровода в собственных опорах.

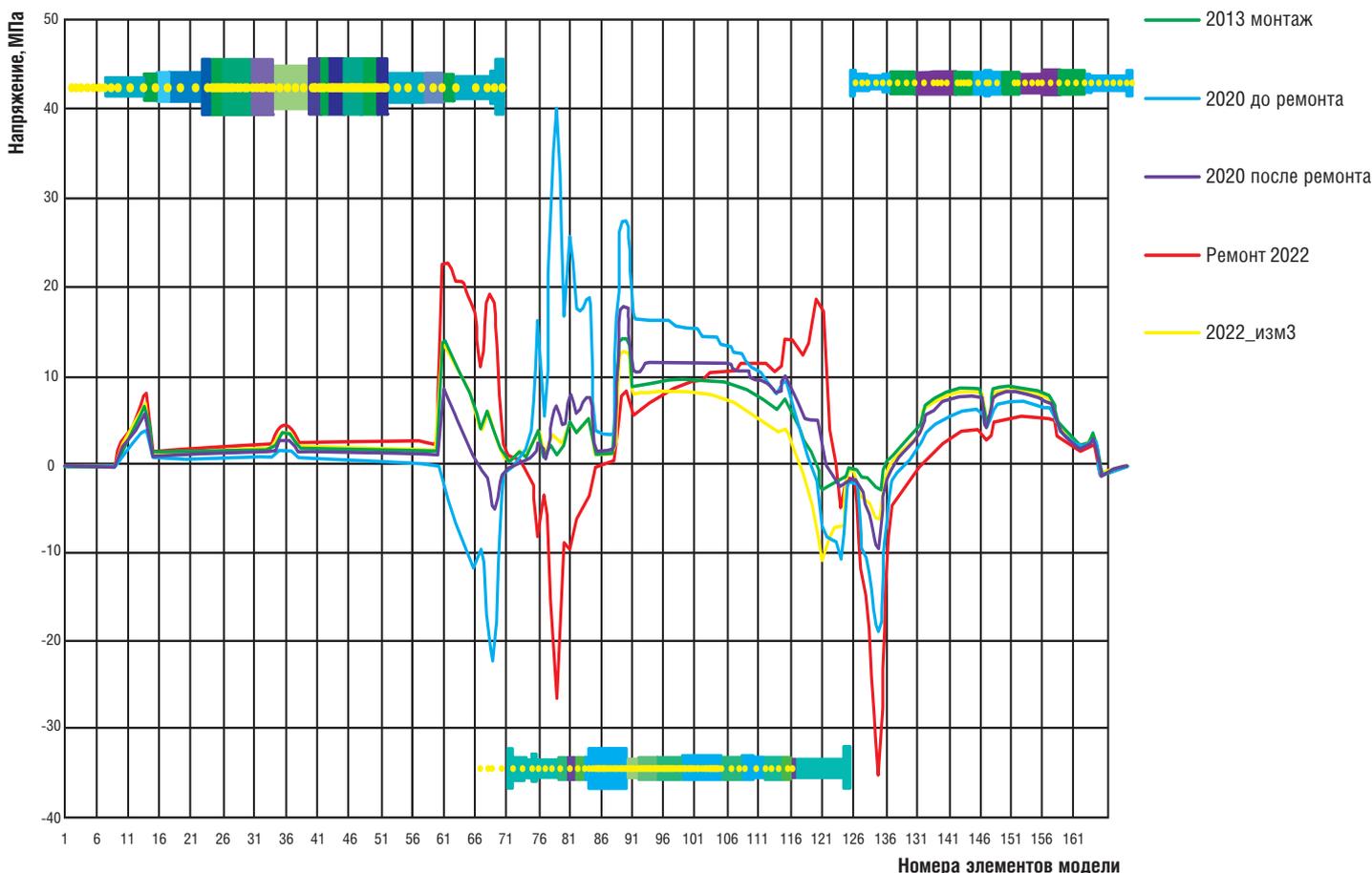
**При выходе из ремонта:**

- вибрационное обследование турбоагрегата: оценка ТС валопровода, подшипниковых узлов, опорной системы агрегата, статора генератора, контактных колец генератора;
- диагностика системы тепловых расширений: оценка работы системы тепловых расширений;
- тепловые испытания: оценка технического состояния проточной части и вспомогательного оборудования установки;
- инженерный анализ: оценка качества выполненного ремонта, формирование базовых эталонных характеристик для использования в дальнейшем для мониторинга ТС в межремонтный период.

За период существования компании коллективом УЛВ выполнено: более 150 балансировок турбоагрегатов; более 300 диагностических обследований турбоагрегатов; более 10 динамических испытаний фундаментов турбоагрегатов.

Также успешно было освоено направление диагностики и вибрационной наладки паровых и газовых турбин, компрессоров иностранного производства с прямым подключением к штат-

**Рис. 1.**  
**Анализ напряжений в валопроводе при различных схемах центровки**





**Рис. 2.**  
Примеры экранов платформы  
APPEXLAB Monitoring/Micro

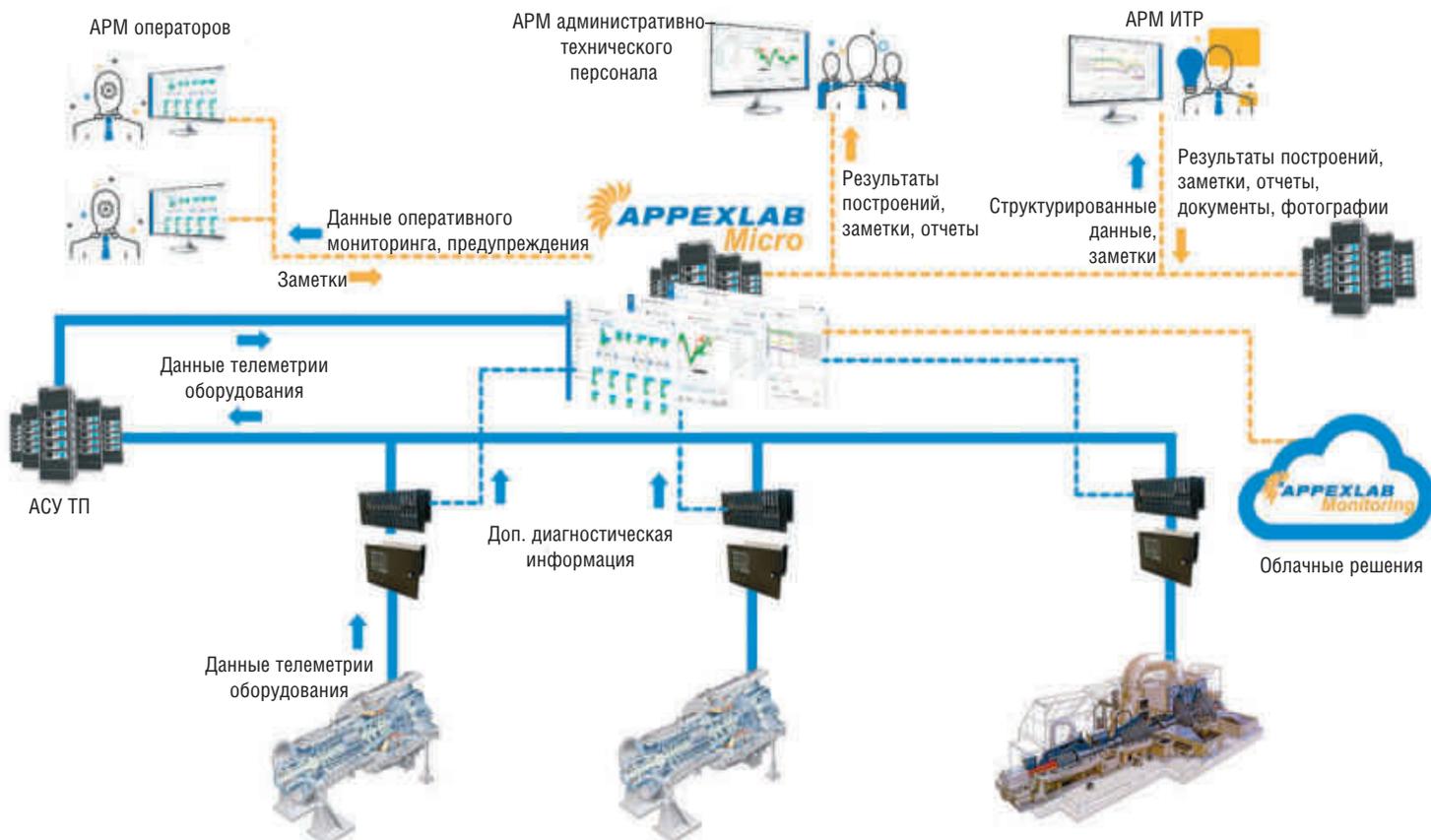
ным средствам контроля с целью расширения диагностического среза информации. Это позволило частично компенсировать возникший дефицит узких специалистов по данному направлению в сфере энергетики.

С целью реализации идей основателей НПП «УЛВ» и развития компетенций в области разработки целого комплекса специализированного программного обеспечения для автоматизации технологических процессов, а также технического обслуживания и мониторинга основного и вспомогательного энергетического оборудования 17 ноября 2017 года была основана компания APPEXLAB (LABoratory of EXpert APPLICATION – Лаборатория экспертных приложений). Ключевым направлением деятельности компа-

нии является разработка и внедрение платформы интеллектуального мониторинга APPEXLAB. При экспертно-диагностическом сопровождении эксплуатации роторного оборудования с применением данной платформы осуществляется оценка технического состояния паровых и газовых турбин, компрессоров, насосов и др., для чего проводится ретроспективный анализ изменения динамических и статистических характеристик, параметров и показателей работы агрегатов. По результатам выполненного анализа формируется комплексная периодическая отчетность и разрабатываются рекомендации по эксплуатации и ремонту оборудования.

APPEXLAB – платформа интеллектуального мониторинга энергетического оборудования, построенная на основе единой методологии. Платформа позиционируется как совокупность инструментов и подходов, позволяющих реализовать концепцию персонализированного (индивидуального) управления жизненным циклом оборудования на основе методологии инженерно-диагностического сопровождения (как базовой функции управления). Концепция предполагает реализацию методологического подхода к организации ТОиР по фактическому состоянию, оптимизацию работы оборудования с учетом индивидуальных условий его эксплуатации и фактического состояния.

**Рис. 3.**  
Архитектура  
организации системы  
APPEXLAB.Micro



Инструменты платформы APPEXLAB позволяют автоматизировать процессы подготовки и выдачи результатов мониторинга, что сокращает длительность и повышает качество процесса экспертно-диагностического сопровождения эксплуатации оборудования. Использование данных инструментов обеспечивает:

- оперативный контроль за состоянием оборудования и технологическими процессами;
- выявление событий и тенденций, характеризующих изменение технического состояния оборудования;
- ускоренное формирование аналитической отчетности.

Платформа (рис. 2) использует информационную базу, в которой аккумулируются данные с текущих показаний штатных систем и приборов, а также из отчетов, подготовленных по результатам предыдущих исследований.

На базе платформы с использованием концепта APPEXLAB.Micro (рис. 3) реализуются локальные системы сбора, мониторинга и анализа, что позволяет применять штатную систему мониторинга параметров оборудования в рамках локальной вычислительной сети передачи данных с обеспечением автоматической идентификации режимов работы оборудования и поиска событий, а также ведение сквозных журналов обслуживания, ремонтов, отклонений в работе оборудования для оперативного контроля его состояния и технологических процессов оборудования.

С использованием другого концепта APPEXLAB.Monitoring реализуется уже распределенный облачный центр мониторинга и анализа с обеспечением автоматического ранжирования режимов работы оборудования, отклонений параметров и событий. В организованных распределенных центрах мониторинга ТС и технологических процессов ведутся сквозные журналы ремонтов, обслуживания и эксплуатации оборудования с использованием расширенного перечня автоматических и автоматизированных средств обработки и обмена данными.

Всего с использованием платформы в настоящее время уже выполняется техническое сопровождение 25 турбинных установок мощностью от 5 до 800 МВт. Необходимо отметить, что платформа APPEXLAB является полностью российским продуктом, позволяющим в рамках интеллектуального мониторинга оценить ТС оборудования, что снижает вероятность риска внеплановых остановов за счет рекомендаций, выданных экспертами по итогам контроля и своевременного анализа



Рис. 4.  
Стенд вибрационного  
контроля рабочих лопаток

отклонений параметров и показателей, выявляемых в ходе эксплуатации оборудования.

С 2020 года в НПП «УЛВ» начала формироваться конструкторская группа, основной целью которой на первоначальном этапе были расчетные задачи, возникающие в процессе инженерно-диагностического сопровождения турбинного оборудования, а также разработка специализированной оснастки и оборудования для нужд производства и ремонта турбинного оборудования, а именно:

- стенд вибрационного контроля рабочих лопаток и измерительный комплекс, осуществляющий контроль методом свободных колебаний единичных лопаток для определения собственных частот (рис. 4);
- стенд моментной развески рабочих лопаток и программный комплекс комплектации, осуществляющий измерение статического момента лопаток для определения абсолютного значения тангенциального и аксиального статических моментов лопаток.

Растущие потребности отрасли в новых разработках и расширение спектра решаемых конструкторской группой задач привели к созданию 22 августа 2023 года АО «Конструкторское бюро «Рысь». Были определены цели компании: развитие потенциала коллектива в области конструкторско-технологической подготовки производства, направленной на разработку пакетов модернизации турбинного оборудования; проектирование специализированной оснастки и приспособлений (рис. 5), используемых на производственно-ремонтных предприятиях, развитие компетенций в проектировании специализированного станочного и испытательного оборудования, а также конструкторское сопровождение ремонтов турбоагрегатов с разработкой ремонтной документации, карт контроля, технических требований и др.

В настоящий момент компания имеет референции и предлагает следующие решения по широкому спектру задач:

Рис. 5.

Технологический вкладыш подшипника для разгонно-балансировочного стенда (РБС)



- разработка малой модернизации тепломеханического оборудования;
- реверсивный инжиниринг систем, узлов и деталей оборудования различных отраслей промышленности;
- проектирование специализированного оборудования и приспособлений;
- расчетно-аналитические работы;
- разработка расчетных методик и их автоматизация.

Рис. 6.

Пример процесса лазерного 3D-сканирования вкладыша подшипника турбоагрегата



Создание КБ «Рысь» позволило реализовать отдельное направление деятельности – реверсивный инжиниринг тепломеханического и нефтегазового оборудования, при этом были освоены следующие компетенции:

- инструментальный контроль геометрии деталей и узлов;
- лазерное 3D-сканирование геометрии (рис. 6);
- подбор материалов с учетом условий работы;
- расчетно-аналитический анализ характеристик оборудования;
- проектирование систем и оборудования;
- авторский надзор за производством и вводом в эксплуатацию отдельных компонентов и всего оборудования.

За девять лет работы коллектив НПП «УЛВ» освоил целый ряд уникальных компетенций и технологий по сопровождению жизненного цикла паротурбинных и газотурбинных установок, была сформулирована идеология системного подхода к организации сервиса турбинного оборудования.

Для решения задач, связанных с изготовлением разработанного оборудования, осуществляется тесная кооперация с ведущими промышленными предприятиями страны.

С момента основания коллектив НПП «УЛВ» успешно справился с различными инженерными и научными задачами, возникающими в процессе жизненного цикла турбинного, компрессорного и насосного оборудования. Спектр таких задач широк: расчетная оценка роторной динамики турбоагрегатов, расчет и оптимизация центровки валопроводов мощных турбомашин, расчетно-аналитические исследования характеристик узлов и деталей тепломеханического оборудования, экспертиза по расследованию отказов оборудования, разработка и изготовление сложной технологической оснастки и приспособлений, проектирование специализированного поверочного, калибровочного и испытательного оборудования и многие другие уникальные задачи.

Сегодня НПП «УЛВ», АО «Аппекслаб», КБ «Рысь» – это уже консорциум инженерных компаний, имеющий тесные связи с заказчиками и партнерами из топливно-энергетического комплекса страны, с предприятиями нефтегазовой отрасли и ремонтно-сервисными организациями, что позволяет направить знания и опыт специалистов компаний на решение самых актуальных задач. Следуя традициям отечественного научно-технического сообщества, представители нашего коллектива открыты для сотрудничества и воплощения инженерных идей. **ТД**

### ООО «СТГТ» – лауреат рейтинга крупнейших генерирующих и сетевых компаний в номинации «Газовые турбины».

По итогам опроса крупнейших российских компаний энергетической отрасли лучшим поставщиком материалов и услуг для предприятий теплоэнергетического комплекса признано ООО «Современные технологии газовых турбин».

Агентство «ТЭК-Рейтинг» проводит ежегодные опросы генерирующих и сетевых компаний, которые оценивают изготовителей энергетического оборудования. Основная задача рейтинга – выявить лучших производителей продукции и поставщиков услуг путем прямого опроса потребителей. Это способствует развитию конкурентности рынка оборудования для ТЭК, повышению его прозрачности и открытости, обмену информацией о поставщиках между компаниями ТЭК.

Отличительная особенность рейтингов – прямой опрос потребителей. Итог подводится на основе официальных ответов крупнейших компаний-заказчиков, без участия каких-либо специальных жюри. Все это сводит к минимуму роль субъективного фактора в оценке поставщиков.

Рейтинг стимулирует производителей оборудования и поставщиков услуг к повышению качества, укрепляет их взаимосвязь с потребителями. Информирование о лучших компаниях-поставщиках и очищение рынка от недобросовестных участников, не соответствующих ожиданиям заказчиков, – важные задачи агентства «ТЭК-Рейтинг».

### Газопоршневая электростанция построена в Краснодаре для рыбоперерабатывающего завода.

Группа компаний «ТЕХ» ввела в эксплуатацию две газопоршневые установки общей электрической мощностью 1060 кВт. Мини-ТЭС работает в базовом режиме и обеспечивает потребности рыбоперерабатывающего предприятия в электрической и тепловой энергии.

Газопоршневая установка ТЕХ-530 контейнерного исполнения создана на базе двигателя E3262 LE 202 производства MAN Energy Solutions. Перед вводом в эксплуатацию энергоблока производства компании «ТЕХ» прошли полномасштабные испытания.

Тепловая энергия газопоршневой установки используется в технологическом цикле перерабатывающего предприятия. Топливом является природный газ.

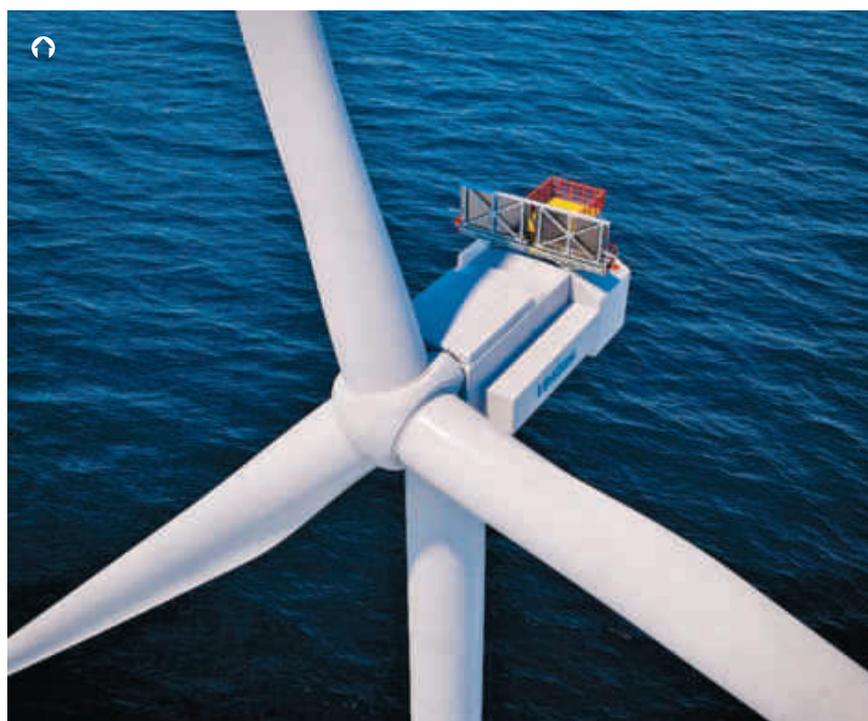


### Vestas поставит оборудование для морского ветропарка Nordseecluster в Германии.

Контракт заключен с RWE – одной из ведущих энергетических компаний в Германии. Проект по строительству ветропарка Nordseecluster в Северном море, в 50 км от побережья Германии, будет реализован в два этапа.

Для первого этапа компания Vestas поставит 44 ветротурбины V236-15.0 мощностью по 15 МВт, общая электрическая мощность составит 660 МВт. Vestas выполнит строительные-монтажные и пусконаладочные работы. Поставка оборудования начнется в конце 2024 года, ввод запланирован на 2026 г. Подписан также договор на техническое обслуживание и ремонт оборудования в процессе эксплуатации в течение 5 лет.

В рамках второго этапа будет поставлено 60 ветротурбин V236-15.0, электрическая мощность второй очереди ветропарка составит 900 МВт. Поставка оборудования начнется в конце 2025 года, ввод в эксплуатацию планируется в 2028 г.



## Локализация удаленных цифровых сервисов энергетических установок

А. Ю. Павлов, И. А. Фасхутдинов, А. Ю. Лошаков – ООО «Современные технологии газовых турбин»

Удаленный мониторинговый центр ООО «СТГТ» позволяет не только совершенствовать подготовку технического обслуживания энергетических установок, но и обнаруживать неполадки в их работе до возникновения критических ситуаций, заблаговременно давать заказчикам рекомендации по возникающим дефектам, а также экономить значительные ресурсы, связанные с ремонтом и заменой оборудования. Благодаря компетенциям департамента сервиса ООО «СТГТ» и собранной базе данных о работе энергоустановок, специалистам УМЦ удается предотвращать потенциальные аварийные ситуации, эффективно идентифицировать и устранять неисправности в работе энергоустановок, что в свою очередь обеспечивает непрерывность работы энергообъектов, с минимальными задержками.

### In brief

#### Localization of remote digital services of power plants

The remote monitoring center of MGTT LLC allows not only to improve the preparation of maintenance of power plants, but also to detect malfunctions in their operation before critical situations arise, to give customers recommendations on defects in advance, as well as to save significant resources related to repair and replacement of equipment. Thanks to the competencies of the service department of MGTT LLC and the collected database on the operation of power plants, specialists manage to prevent potential emergencies, effectively identify and eliminate malfunctions in the operation of power plants, which in turn ensures the continuity of operation of power facilities, with minimal delays.

The Remote monitoring Center of the MGTT company has all the necessary competencies for monitoring, diagnostics and engineering analysis of causes of deviations in the operation parameters of equipment.

Удаленный мониторинговый центр (УМЦ) компании «СТГТ», созданный в 2016 году, обладает всеми необходимыми компетенциями по мониторингу, диагностике и инженерному анализу первопричин отклонения параметров работы основного оборудования энергоблока от расчетных значений. Силами специалистов УМЦ контролируются ключевые показатели эффективности работы электростанции в режиме 24/7 (рис. 1). Это позволяет формулировать своевременные рекомендации для обеспечения надежности и оптимальной работы оборудования заказчика.

За время работы УМЦ специалисты компании проанализировали поведение многих турбин Е- и F-класса, работающих в Российской Федерации и Республике Беларусь. Была получена полная картина особенностей эксплуатации турбинного и вспомогательного оборудования, что позволило предотвратить несколько потенциально аварийных ситуаций на конкретных объектах, своевременно спрогнозировать приобретение запасных частей и разработать методологию проведения соответствующих ремонтных работ в ближайший запланированный останов.

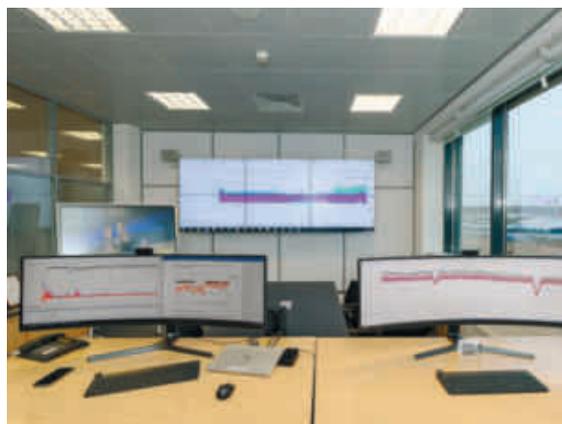


Рис. 1. Удаленный мониторинговый центр предприятия «Современные технологии газовых турбин»

Систему удаленного мониторинга и диагностики (СУМиД) можно разбить на четыре функциональных блока (рис. 2):

- система сбора и конвертации данных;
- система передачи и хранения данных;
- система предиктивной аналитики (СПА);
- система ручной диагностики данных.

Учитывая, что часть обозначенных выше систем до 2022 года предоставлялась иностранными поставщиками, в УМЦ заблаговременно было принято решение об импортозамещении СУМиД с учетом минимальных затрат как для компании «СТГТ», так и для конечного заказчика.

Первым этапом на пути импортозамещения СУМиД стала разработка собственного программного обеспечения для ручного анализа данных. Это позволило УМЦ продолжать выполнять все свои договорные обязательства перед заказчиками в полном объеме после отключения от систем иностранных поставщиков. При этом ручная обработка данных основывается на анализе архивных данных формата MES, получаемых от объектов электрогенерации с системы сбора и конвертации файлов иностранного производства.

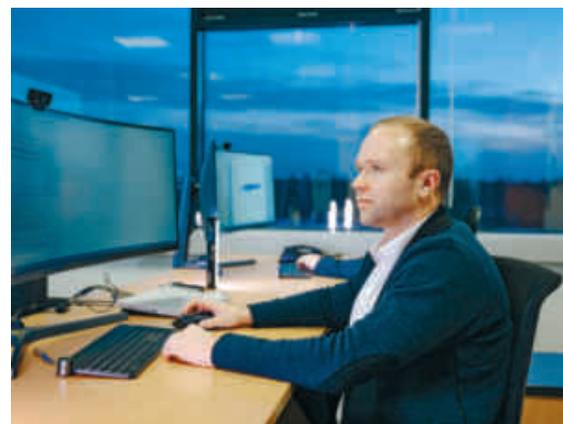




Рис. 2.  
Система удаленного мониторинга и диагностики

В свою очередь, с целью замещения такой системы российским аналогом специалисты компании в 2023 году завершили работы по созданию локальной системы сбора и конвертации файлов. Основной целью разработки такой универсальной системы было формирование архивных данных с системы управления энергоблоком (независимо от поставщика) в необходимый для мониторинга формат, с дополнительной реализацией нескольких отдельных подсистем: сбор данных по протоколам OPC UA/DA, предварительная обработка, хранение и отображение данных, справочная и конфигурационная информация.

Разработанная система позволяет передавать мгновенные значения собираемых сигналов с меткой времени в УМЦ ООО «СТГТ» и дублировать буферизацию собранных данных, выполнять маппинг и отображать собранные данные в виде графиков  $y(t)$  с возможностью выбора перечня сигналов и диапазона контрольного периода времени, а также формировать и вести журнал событий агрегата по пересечению параметров ранее заданных порогов.

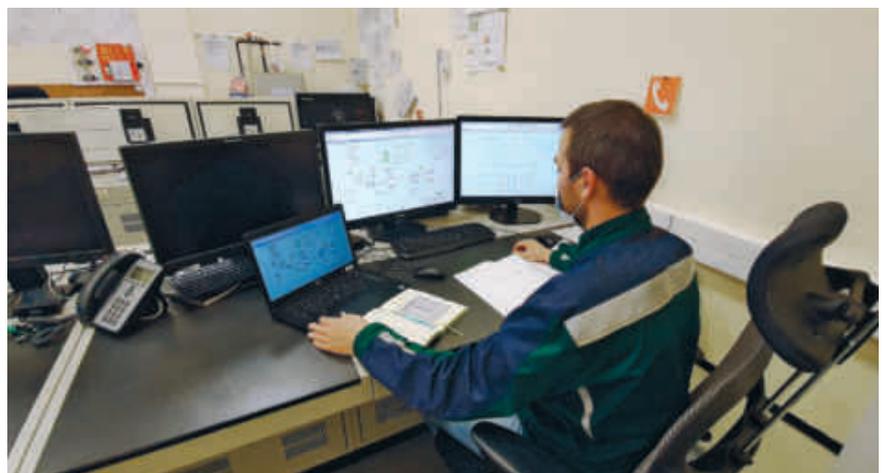
В дополнение к удаленному мониторингу, специалисты компании на основе своих экспертных знаний обеспечивают поддержку заказчиков по вопросам эксплуатации, пусконаладки, настройки режимов горения в удаленном формате (рис. 3). При этом соблюдаются все требования по информационной безопасности объектов критической инфраструктуры, поскольку отсутствует прямое подключение к системе управления энергоблоком. Происходит только дублирование видеосигнала с системы управления на отдельный ноутбук заказчика на объекте, а затем его последующая трансляция в офис «СТГТ» в режиме видеоконференции. Используя дублированное изображение, специалисты по пусконаладке и мониторингу удаленно консультируют заказчика по возникшим вопросам эксплуатации.

Еще одним решением, которое «СТГТ» предлагает своим заказчикам в области уда-

ленных цифровых сервисов, является удаленная экспертная поддержка персонала заказчика в вопросах обслуживания установленного оборудования, а также полевого сервиса. Двусторонняя связь осуществляется с использованием персональных «умных» цифровых устройств через безопасное интернет-соединение посредством аудио- и видеоконференции в режиме реального времени. В результате персонал заказчика может получать необходимую информацию по техническому обслуживанию и ремонту эксплуатируемого оборудования, что называется, «из первых уст». При этом ежедневно даются рекомендации по предупредительным и корректирующим мероприятиям на включенном оборудовании, ведется консультирование персонала заказчика по общим вопросам эксплуатации и технического обслуживания.

Таким образом, ООО «СТГТ» продолжает реализацию своей стратегической задачи не только в части полного освоения производства основного оборудования энергоблока и обеспечения его обслуживания, но и развития собственных цифровых сервисов. При этом основная цель проектов цифровизации – обеспечивать эксплуатационную готовность станции, повышать продуктивность и надежность оборудования с обязательным условием безопасности и защищенности критически важной инфраструктуры заказчика. **Т**

Рис. 3.  
Удаленная поддержка заказчиков по настройке режимов горения с использованием цифровых решений ООО «СТГТ»





### Газотурбинные энергоблоки введены на Ташкентской ТЭЦ.

Контракт на поставку двух газотурбинных установок H-25 компании Mitsubishi Power мощностью по 32 МВт был заключен в 2021 году с АО «Ташкентская ТЭЦ» – собственником и оператором станции.

Mitsubishi Heavy Industries изготовила и поставила на станцию газотурбинные установки H-25(32) с генераторами. Энергоблоки будут работать в когенерационном цикле, коэффициент полезного действия составляет 64 %. Генподрядчиком по строительству электростанции выступила турецкая компания Calik Energy. Основным топливом для ГТУ является природный газ.

С вводом оборудования Ташкентская ТЭЦ ежегодно будет дополнительно производить 515,6 млн кВт·ч электрической и 690 тыс. Гкал тепловой энергии. За счет применения ГТУ ежегодная экономия газа составит 219 тыс. м<sup>3</sup>, выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду снизятся на 200 т/год.

Проект по строительству электростанции реализован при поддержке Японского агентства по международному сотрудничеству JICA.

#### Уважаемые читатели!

В статье «Исследование механизмов влияния эксплуатационных препаратов «Револомд» на характеристики двигателей внутреннего сгорания» в №2-2024 на с. 52 была допущена ошибка в рисунке №9.

Правильный вариант диаграммы следующий:

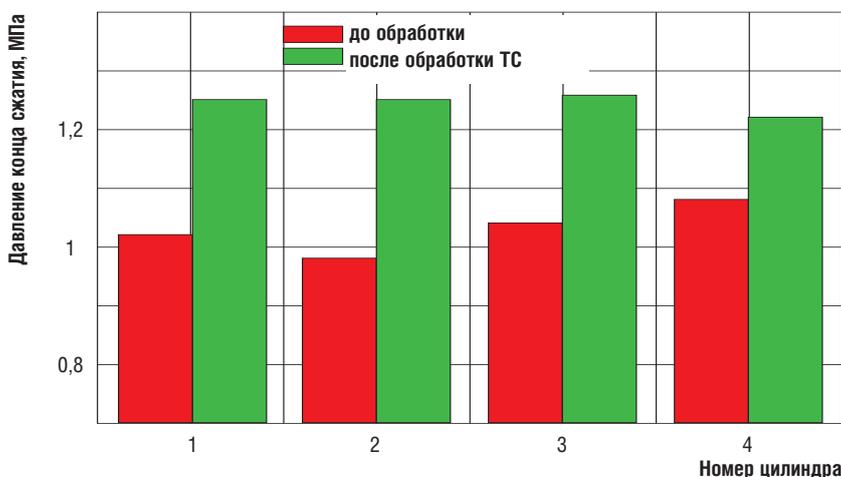


Рис. 9. Изменение компрессии по цилиндрам бензинового двигателя по итогам его обработки трибосоставом

Редакция журнала приносит свои извинения.

### Компания «Энджен» поставила газопоршневую установку в Свердловскую область.

Проект реализован по заказу Богдановичской генерирующей компании. Ведена в промышленную эксплуатацию установка 2032 V16 производства компании MWM. С 2014 года в составе коммунальной котельной предприятия в г. Богданович работают в когенерационном режиме два аналогичных энергоблока.

В связи с необходимостью проведения капитального ремонта ГПУ в минимальные сроки заказчику потребовалось приобрести подменный энергоблок мощностью 4,3 МВт. Для этого была закуплена подменная ГПУ после капитального ремонта E60. Данный ремонт включает полную замену узлов и агрегатов на новые, а также ремонт всего навесного оборудования.

Для поддержания станции в рабочем состоянии подменная газопоршневая установка была оперативно установлена в ячейку и введена в эксплуатацию.

ООО «Богдановичская генерирующая компания» обеспечивает объекты города электрической и тепловой энергией.

### Высокотемпературное покрытие MODENGY 1090 применяется для газодинамических подшипников ГТУ.

Материал, разработанный компанией «Моденжи» совместно с Московским авиационным институтом, имеет самую высокую термостойкость среди всех покрытий MODENGY – до 730 °С. Покрытие MODENGY 1090 используется при производстве лепестков газодинамических подшипников микротурбин после завершения испытаний у производителя. Оно обладает высокой термостойкостью и хорошими антифрикционными свойствами.

Тонкий смазочный слой, который покрытие формирует на рабочих поверхностях лепестков, снижает трение и предотвращает износ при переходных режимах работы газотурбинного двигателя (до набора высокой частоты вращения и формирования устойчивого газового клина).

Принцип работы лепестковых газодинамических подшипников основан на формировании воздушного клина, на котором работает вал энергетической установки. Несущую поверхность подшипника образуют тонкие упругие металлические пластины.



**Турбокомпрессорный агрегат производства ООО «ИНГК» поставлен на Ангарский завод полимеров.**

Проект предусматривал изготовление и ввод в эксплуатацию турбокомпрессорного агрегата ТКА-2502, предназначенного для сжатия технологического газа пиролиза углеводородного сырья. Агрегат мощностью 25 МВт изготовлен на базе центробежного компрессора производства Shenyang Blower Works Group (КНР) с приводом от паровой турбины Hangzhou Steam Turbines (КНР).

Оборудование ТКА: корпуса компрессора, паровая турбина, панели СГУ, компоненты маслосистемы, система подачи воды, кабельная разводка с клеммными коробками и др. – размещается на существующем фундаменте с учетом массогабаритных параметров блоков, возможностей доставки и места монтажа на объекте эксплуатации. Агрегат поставлен в максимальной заводской готовности.

Ангарский завод полимеров ежегодно производит 200 тыс. т этилена, 100 тыс. т пропилена и 60 тыс. т бензола. Сырьем для продукции является прямогонный бензин и углеводородные газы, в основном производства Ангарской нефтехимической компании.

**ООО «Газовые машины» запустило ГПУ в Ярославской области.**

Заказчиком оборудования стало крупное производственно-торговое предприятие «Вектор-М», специализирующееся на выпуске полиэтиленовых пакетов и снабжении организаций и предприятий упаковочными и расходными материалами.

ГПЭС мощностью 200 кВт в контейнерном исполнении создана на базе двигателя 6M21G4 (Baudouin Moteurs). В комплект поставки входит генератор производства Evotec, щит управления компании ComAp, масляный резервуар с системой автоматического долива масла в двигатель. В настоящее время оборудование изготовлено и поставлено на строительную площадку.

**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

## Исследование влияния эрозионного износа рабочих лопаток осевой компрессорной ступени на их прочностные характеристики

**В. Л. Блинов, к.т.н – доцент, v.l.blinov@urfu.ru**  
**Е. С. Бабкин – бакалавр, zenchuricki@gmail.com**  
**И. С. Зубков – аспирант, lamqtada@gmail.com**  
**Т. А. Недошивина, к.т.н – доцент, t.a.nedoshivina@urfu.ru**  
**И. Е. Алексеев – бакалавр, igor\_aleks16@mail.ru**  
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

**Ключевые слова:**  
газотурбинная установка, осевой компрессор, эрозионный износ, численное моделирование, статическая прочность, модальный анализ

### Аннотация

В работе представлены результаты исследования влияния эрозионного износа на прочностные характеристики рабочих лопаток осевого компрессора. Рассмотрена проблема появления эрозии и ее влияние на различные характеристики работы как осевого компрессора, так и всей газотурбинной установки. Цель работы сформулирована как оценка влияния эрозионного износа на прочность и виброндежность. В качестве объекта исследования в работе выбрана рабочая лопатка модельной трансзвуковой ступени осевого компрессора NASA Stage 37. Основным методом проведения исследования выступало численное моделирование напряженно-деформированного состояния рабочей лопатки осевого компрессора методом

конечных элементов для оценки и определения влияния геометрических отклонений на ее прочностные и вибрационные характеристики.

В статье представлен анализ результатов расчетов статической и динамической прочности: определено положение концентраторов напряжений на пере лопатки и проведена верификация модели по значениям максимальных напряжений, возникающих в данной области, сформирована зависимость изменения напряжений от изменения массы лопатки, вызванной эрозионным износом, построена диаграмма Кэмпбелла и определены первые шесть частот собственных колебаний, их виды и характер их изменения при наличии эрозионного износа.

## Research of axial compressor blades erosive wear influence on their strength characteristics

**V. L. Blinov, PhD in Engineering – Associate Professor, v.l.blinov@urfu.ru**  
**E. S. Babkin – Bachelor, zenchuricki@gmail.com**  
**I. S. Zubkov – Postgraduate, lamqtada@gmail.com**  
**T. A. Nedoshivina, PhD in Engineering – Associate Professor, t.a.nedoshivina@urfu.ru**  
**I. E. Alekseev – Bachelor, igor\_aleks16@mail.ru**  
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin

**Key words:**  
gas turbine plant, axial compressor, erosive wear, digital simulation, static strength, modal analysis

### Abstract

The paper presents the results of a study of the influence of erosive wear on the strength characteristics of the working blades of an axial compressor. The problem of erosion and its impact on various operating characteristics of both an axial compressor and the entire gas turbine plant is discussed. The purpose of the work is formulated as an assessment of the influence of erosive wear on strength and vibration reliability. The working blade of the model transonic stage of the NASA Stage 37 axial compressor was chosen as the object of study in the work. The main method of conducting the research was numerical modeling of the stress-strain state of the working blade of an

axial compressor using the finite element method to evaluate and determine the influence of geometric deviations on its strength and vibration characteristics. The paper presents an analysis of the results of calculations of static and dynamic strength: the position of the stress concentrators on the blade blade was determined and the model was verified based on the values of the maximum stresses arising in this area, the dependence of the change in stress on the change in the mass of the blade caused by erosive wear was formed, a Campbell diagram was constructed and the first six frequencies of natural oscillations, their types and their changes were determined.

Одними из наиболее ответственных деталей газотурбинной установки являются рабочие лопатки осевого компрессора, как наиболее сложного по характеру протекающих процессов узла. Их аэродинамическое совершенство будет во многом определять основные показатели эффективности ГТУ, а прочностные характеристики – ее надежность [1, 2].

При этом в процессе эксплуатации ГТУ подвергается большому количеству различных воздействий, негативно влияющих на ее основные показатели, в том числе и на прочность. В числе таких факторов эрозионный износ, вызванный наличием механических примесей в воздухе, который характерен для многих ГТУ различного назначения. Например, в большинстве случаев досрочный вывод из эксплуатации двигателей летательных аппаратов обусловлен эрозионными повреждениями лопаток осевого компрессора (ОК) [3,4]. Соударение частиц загрязнений с рабочими поверхностями лопаток приводит к значительным изменениям их формы, что проявляется в увеличении радиального зазора и шероховатости поверхностей, уменьшении хорды лопатки по всей ее высоте и утончении входной и выходной кромок.

Данные изменения приводят к значительному ухудшению газодинамических характеристик компрессора, проявляющемуся в росте потерь и, как следствие, в уменьшении степени повышения давления и массового расхода практически на всех режимах работы компрессора (рис. 1), увеличении потребляемой мощности и снижении КПД [5]. При этом подобные изменения формы лопаток и сопутствующее уменьшение их массы будут вызывать ухудшение их прочностных характеристик. Проявлением этого будет снижение коэффициента запаса прочности (допустимые для исходной формы лопатки нагрузки станут критическими при наличии износа), а также возникновение резонансных колебаний лопаток в рабочем диапазоне частот вращения.

Ко всему прочему, изменение эксплуатационных характеристик будет характерно для всех узлов ГТУ. Так, частицы могут засорять каналы системы охлаждения турбин и форсунки камер сгорания, налипать на поверхность лопаток турбин и компрессоров, ухудшая их аэродинамические характеристики, оседать в различных полостях и т.д. [1, 4]. Данный факт подчеркивает актуальность исследований эрозионного износа.

При этом перспективным методом оценки влияния того или иного изменения геометрической формы лопаток на ее прочностные характеристики является численное модели-

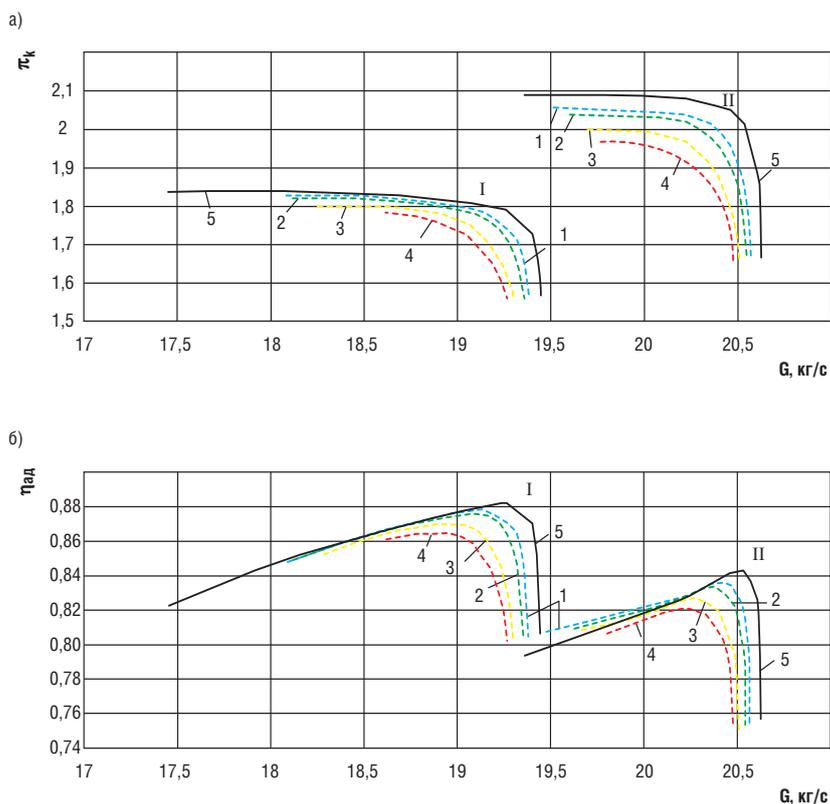


Рис. 1. Интегральные характеристики компрессорной ступени на относительных частотах вращения 90 % (I) и 100 % (II) при эрозионном износе хорды.

рование их напряженно-деформированного состояния с учетом различных нагрузок, в том числе и аэродинамических. Такой подход активно применяется для наглядной количественной оценки всех основных характеристик лопаточного аппарата, что во многом обусловлено возможностью проведения экспериментов в контролируемых условиях без значительных затрат. С учетом этого, цель текущего исследования была сформулирована как оценка напряженно-деформированного состояния рабочей лопатки компрессора при наличии эрозионного износа для определения ее прочностных характеристик при помощи отечественной CAE-системы Fidesys.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования используется рабочая лопатка модельной трансзвуковой ступени осевого компрессора NASA Stage 37 [6]. Оценка напряженно-деформированного состояния проводилась при помощи метода конечных элементов в программном комплексе Fidesys.

Подготовка трехмерных моделей производилась при помощи САД-системы «Компас 3D». В качестве материала лопатки была выбрана сталь Maraging 200. Помимо лопатки для правильного задания условий ее фиксации, в исследовании также была построена модель сегмента диска с пазом под хвостовик лопатки. Материалом для диска принят сплав 04ХН40МДТЮ [1, 2].

- 1) 7,8 %;
  - 2) 11,2 %;
  - 3) 17,8 %;
  - 4) 25,2 %;
  - 5) 0 % [5].
- а) Расходно-напорная характеристика;  
б) КПД-расходная характеристика

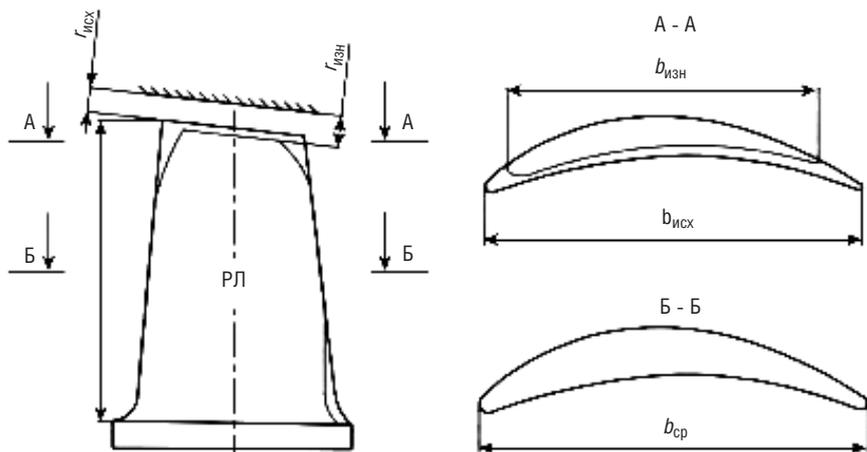


Рис. 2.  
Изменение формы рабочих лопаток при эрозионном износе. А-А – сечение максимального износа; Б-Б – среднее сечение по высоте лопатки

Рис. 3.  
Сеточная модель лопатки и сегмента диска с наложенными граничными условиями

На основе трехмерных моделей на следующем этапе производилось построение сеточной модели. Для расчетов была выбрана тетраэдральная сетка конечных элементов (рис. 2). По результатам предварительного анализа сеточной сходимости оптимальным является размер элемента 0,8 мм. При этом для разбиения сегмента диска допустимо использовать более грубую сетку, поскольку анализ его прочностных характеристик не является приоритетным в текущем исследовании. Такая конфигурация сеточной модели обеспечивает удовлетворительную точность решения задачи при минимальном времени проведения расчета [7, 8].

В качестве граничных условий в работе были наложены следующие воздействия (рис. 3): фиксация диска на роторе (1), условие цикличности на боковых поверхностях сегмента диска (2), частота вращения 17188 об/мин (3), ограничение перемещения хвостовика в осевом направлении (4), фиксация лопатки в пазах диска за счет силы трения между хвостовиком и ответными поверхностями паза с коэффициентом трения 0,2 (5).

Полученная расчетная модель использовалась для проведения статического и динамического прочностного анализа рабочей лопатки.

Статический анализ выполнялся для определения перемещений и напряжений, возникающих в лопатке при воздействии приложенных нагрузок. Задачей динамического анализа была оценка состояния лопатки в условиях динамических нагрузок, а именно, уровня вибрации, частот колебания и т.д. [9, 10].

Для задания эрозионного износа лопаток в работе использовались модели и уравнения, описанные в работе [5] (рис. 3). Для определения степени износа лопаток использовалась относительная высота лопатки, определяемая по хорде в среднем сечении:

$$\bar{l} = \frac{l}{b_{ср}},$$

где  $l$  – высота лопатки по входной кромке, мм;  $b_{ср}$  – хорда профиля в среднем сечении, мм.

Для описания износа хорды в работе использован относительный износ – изношенная хорда определяется по сечению с максимальным износом (сечение А-А на рис. 2):

$$\Delta \bar{b} = 1 - \frac{b_{изн}}{b_{исх}},$$

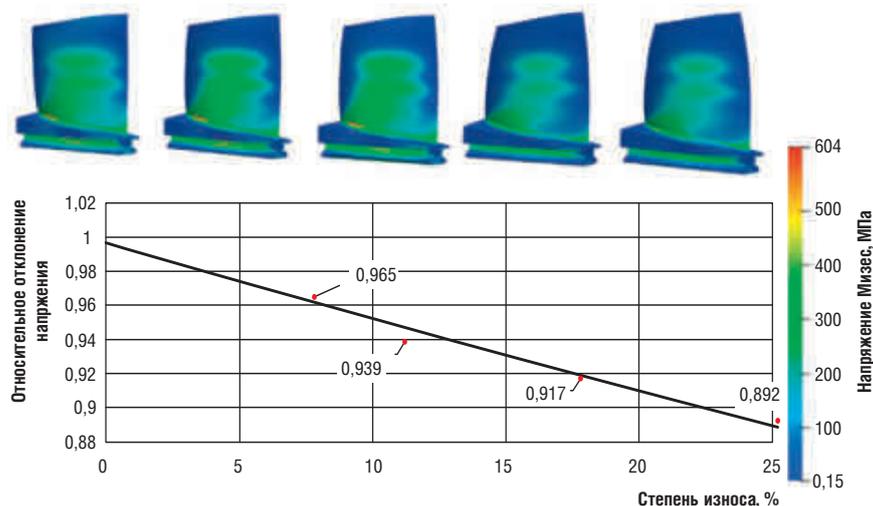
где  $b_{изн}$  – хорда профиля при наличии эрозионного износа, мм;  $b_{исх}$  – хорда профиля без износа, мм.

Всего было рассмотрено 5 различных форм лопатки, отличающихся по величине износа хорды в периферийном сечении: 0% (исходная форма); 7,8%; 11,2%; 17,8% и 25,2% (аналогично работе [5]).

### Анализ результатов

В результате проведения численного анализа статической прочности на первом этапе было установлено, что под действием приложенных нагрузок перо лопатки испытывает на себе несколько видов деформации: растяжение, изгиб и кручение. При этом наибольшие напряжения возникали на галтели между

Рис. 4.  
Зависимость напряжений в области галтели от износа



пером лопатки со стороны спинки и полкой хвостовика, что хорошо соотносится как с теоретическими данными [1, 2], так и с результатами эксперимента [6]. При этом модель незначительно занижала максимальное значение напряжений на 0,4 %: по результатам моделирования получено значение  $\sigma_{\max,л}=604$  МПа, тогда как в результате эксперимента максимальные напряжения составили  $\sigma_{\max,л}=606,2$  МПа. Распределение напряжений Мизеса по поверхности лопатки представлено на рис. 4.

На основе полученных значений напряжений был определен коэффициент запаса прочности лопатки с учетом предела текучести материала Maraging 200 ( $\sigma_T^{20^\circ\text{C}}=1380$  МПа) и минимально допустимым коэффициентом запаса прочности для выбранного материала:

$$n_{л} = \frac{\sigma_T^{20^\circ\text{C}}}{\sigma_{\max,л}} = \frac{1380}{604} = 2,3.$$

Наличие эрозионного износа приводит к снижению уровня напряжений по всей лопатке (рис. 4), что допустимо связать со снижением ее массы. При анализе данных, представленных в табл., видно, что даже при значительной степени износа хорды лопатки (25,2 %) изменение массы незначительно (в пределах 5,5 %), однако характерное изменение уровня максимальных напряжений достигает 10,8 %. При этом связать такое незначительное изменение массы допустимо с характером проявления эрозионного износа, заключающегося в интенсивном износе периферийной части лопатки.

Вторым этапом работы являлось проведение модального анализа и построение диаграммы Кэмпбелла, показывающей зависимость частот собственных колебаний (ЧСК) рабочего колеса и частот возбуждающих гармоник от частоты вращения ротора. Использование данной диаграммы позволяет определить режимы работы компрессора, на которых возможно возникновение резонансных явлений [1, 8].

Исходные значения частот собственных колебаний лопатки, полученные в результате численных расчетов, хорошо согласуются с экспериментальными данными [6]. При этом наличие эрозионного износа пера, помимо снижения массы, приводит еще и к уменьшению жесткости лопатки, что в итоге вызывает увеличение ЧСК лопатки (рис. 5а). При этом наиболее интенсивное изменение частот характерно для крутильных форм колебаний (рис. 5б), что обусловлено более интенсивным изменением формы периферийной части пера лопатки.

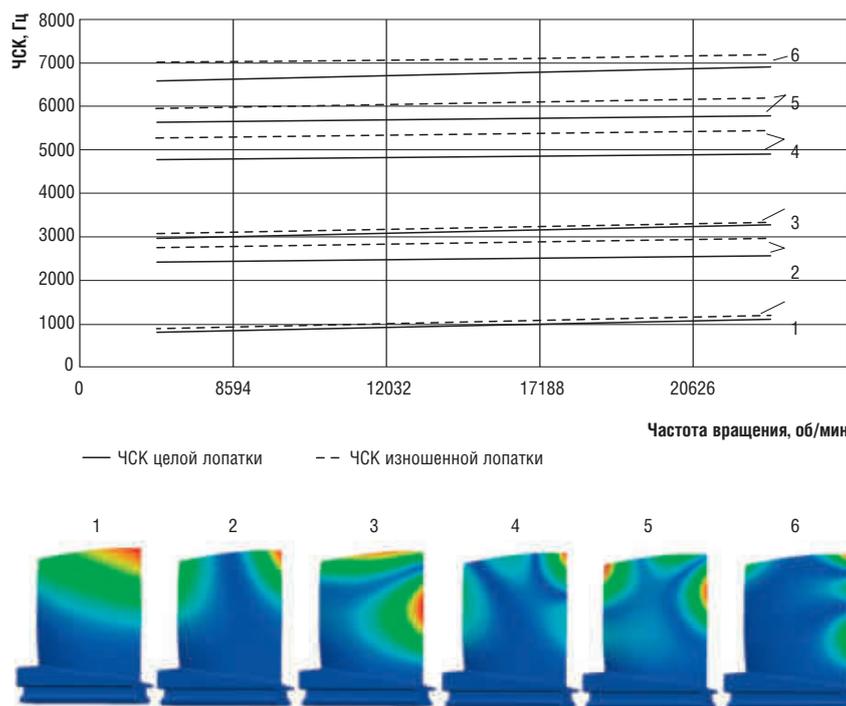


Рис. 5.

Анализ ЧСК лопатки:

- 1) 1-я изгибная;
- 2) 1-я крутильная;
- 3) 2-я изгибная;
- 4) 2-я крутильная;
- 5) 3-я крутильная;
- 6) 3-я изгибная

Табл.

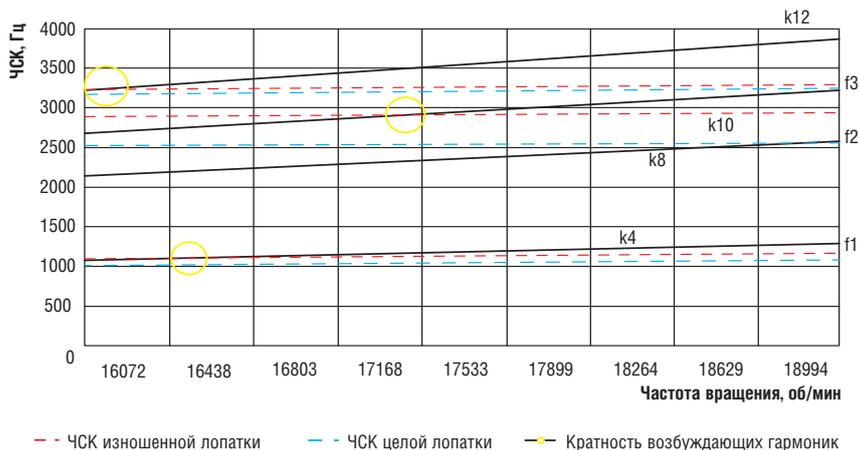
Зависимость массы лопатки от степени эрозии

Степень износа, %	Масса лопатки, г	Уменьшение массы, %	Изменение напряжений, %
0	131,4	0	0
7,8	128,3	2,4	3,5
11,2	126,5	3,7	6,1
17,8	125,9	4,1	8,3
25,2	124,2	5,5	10,8

Увеличение частот собственных колебаний лопаток, вызванное эрозионным износом, может привести к возникновению резонансных явлений в рабочем диапазоне частот вращения. Так, для изношенной лопатки наблюдается пересечение линий ЧСК со следующими гармониками: ЧСК  $f1$  с 4-кратностью, ЧСК  $f2$  – с 10-кратностью и ЧСК  $f3$  – с 12-кратностью (рис. 6). При этом наиболее опасной будет являться ЧСК  $f2$  (1-я крутильная форма колебаний), поскольку пересечение с линией кратности находится в непосредственной близости к рабочей частоте вращения  $n=17188$  об/мин. Таким образом, величина эрозионного износа хорды 25,2 %, помимо существенного влияния на газодинамические характеристики [5], будет негативно влиять и на параметры прочности лопатки.

## Выводы

В рамках работы был проведен анализ статической и динамической прочности рабочей лопатки модельной трансзвуковой ступени осе-



**Рис. 6.**  
Анализ пересечений линий кратности возбуждающих гармоник (k) и трех первых ЧСК (f) в рабочем диапазоне частот вращения ротора при разной степени износа

вого компрессора при различной степени эрозионного износа ее пера при помощи отечественного САЕ-комплекса Fidesys. По результатам работы сделаны следующие основные выводы.

Получены сведения о напряженно-деформированном состоянии лопатки при воздействии на нее основных механических нагрузок, возникающих при работе. Была выявлена область максимальных напряжений, на основании значений которых был определен коэффициент запаса прочности  $n_L=2,3$ , удовлетворяющий условиям прочности. При этом качественно полученные результаты хорошо согласовались с теоретическими сведениями и экспериментальными данными при погрешности в пределах 0,4 %.

Влияние эрозионного износа на статическую прочность заключается в уменьшении величины максимальных напряжений, возникающих в материале лопатки, что обусловлено уменьшением массы, при этом чем больше будет величина износа, тем значительнее будет изменение массы и, соответственно, напряжений. Так, при износе хорды в периферийном сечении пера лопатки 25,2 % уменьшение массы составило 5,5 %, что привело к снижению значений напряжений на 10,8 %.

При проведении модального анализа было установлено, что частоты собственных колебаний возрастают при уменьшении хорды лопатки вследствие эрозии. Такой эффект приводит к возникновению пересечений линий ЧСК с линиями кратности возбуждающих гармоник, т.е. к появлению резонансных явлений в рабочем диапазоне частот вращения. Наиболее опасной формой колебаний при этом будет являться 1-я крутильная, имеющая пересечение с линией кратности вблизи рабочей частоты вращения  $n=17188,7$  об/мин.

Также по результатам анализа динамической прочности лопатки было установлено, что наличие эрозионного износа приводит к более

интенсивному росту частот крутильных форм колебаний. Связать такой эффект допустимо со значительным изменением периферийной области пера лопатки. **Д**

**Список использованных источников**

1. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин / А.Г. Костюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.
2. Манушин Э.А. Конструирование и расчет на прочность турбомашин и комбинированных установок / Э.А. Манушин, И.Г. Суровцев. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Kurz R. Degradation in gas turbine systems / R. Kurz, K. Brun // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2001. – 123. – pp. 70–77.
4. Блинов В.Л. Исследования эрозионного износа лопаточного аппарата осевых турбокомпрессоров (обзор) / В.Л. Блинов, И.С. Зубков, С.В. Богданец, О.В. Комаров, Г.А. Дерябин // Теплоэнергетика. – 2023. – № 6. – С. 41–55.
5. Блинов В.Л. Оценка влияния эрозионного износа лопаток компрессора на его интегральные и локальные характеристики / В.Л. Блинов, И.С. Зубков, Г.А. Дерябин // Теплоэнергетика. – 2024. – № 5. – С. 74–86.
6. Reid L. Design and overall performance of four highly loaded, high-speed inlet stages for an advanced high-pressure-ratio core compressor / L. Reid, R.D. Moore. – NASA Lewis Research Center, 1978. – 132 p.
7. Khawaja H.A., Khan A.M. Modal and Harmonic analysis of L.P. Turbine of a small Turbo-Fan Engine using Finite Element Method. College of Aeronautical Engineering. – University of Engineering and Technology, Taxila, Pakistan. 2007.
8. Седунин В.А. Исследование прочностных характеристик лопаток осевого компрессора / В.А. Седунин, А.С. Нусс, С.А. Серков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2016. – 3. – С. 90–99. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-90-99.
9. Блинов В.Л. Прочностное исследование рабочей лопатки с диском ступени «В» осевого компрессора ГТН-16 методом конечных элементов в САЕ-системе «Fidesys» / В.Л. Блинов, О.В. Комаров, Д.О. Заклепкин, С.В. Богданец. // Турбины и дизели. – 2023. – № 3. – С. 54-58.
10. САЕ-система Fidesys: сайт. [Электрон. ресурс] – URL: <https://cae-fidesys.com/> (дата обращения: 20.06.2024). – Текст: электронный.

## Hyundai купила активы Doosan Co.

Компания Hyundai Infracore приобрела активы подразделения Doosan по производству промышленных двигателей. В результате объединения подразделений Hyundai и Doosan создана компания HD Hyundai Infracore.

Основным направлением деятельности компании определено производство промышленных и судовых дизельных двигателей, а также строительной техники. Двигатели Doosan включены в модельный ряд компании HD Hyundai Infracore без изменения технических параметров и с сохранением наименования моделей оборудования.

## Nordex Group поставит ветротурбины в Литве.

Компания Repega, разработчик проектов в области ветроэнергетики в Литве в сотрудничестве с группой Achema, заключила контракт с производителем ветрогенераторов Nordex Group на поставку 40 ветротурбинных установок N163/6.X серии Delta4000 мощностью по 6,6 МВт.

Оборудование предназначено для строительства нового ветропарка Pagegiai электрической мощностью 264 МВт, расположенного на западе страны.

Контракт также включает техническое обслуживание и ремонт оборудования в процессе эксплуатации в течение 15 лет. Строительные работы по созданию инфраструктуры ветропарка планируется начать летом 2024 года, поставку и монтаж турбин – весной 2025 года. Ветрогенераторы будут установлены на стальных трубчатых башнях высотой 118 метров.

Ввод ветропарка Pagegiai в коммерческую эксплуатацию запланирован на 2026 г. С учетом данного проекта общая установленная мощность ветротурбин Nordex в Литве составит 850 МВт.



## Предприятие «ИНГК» изготовило поршневую компрессорную установку ПКУ-032 для Ево-Яхинского ЛУ.

На производственной площадке «ИНГК» в г. Перми завершено изготовление поршневой компрессорной установки ПКУ-032 мощностью 1 МВт для ДКС Ево-Яхинского лицензионного участка. Она будет работать в составе установки комплексной подготовки газа на месторождении. Заказчик – ООО «НОВАТЭК-Юрхаровнефтегаз».

Установка ПКУ-032 оснащена компрессором JGT/4 компании Ariel и приводом российского производства – ООО «Электротяжмаш-Привод» (г. Лысьва).

Ранее компания «ИНГК» изготовила и ввела в промышленную эксплуатацию на этом же месторождении две поршневые компрессорные установки низконапорных газов ПКУ-022 мощностью по 1 МВт с компрессором Ariel и электроприводом Siemens.

## При создании ГТД часть натуральных испытаний заменят математическим моделированием.

В производственном комплексе «Салют» (ОДК) создано программное обеспечение, позволяющее сократить количество натуральных испытаний двигателей. С помощью ПО можно выявить и скорректировать автоколебания лопаток компрессоров газотурбинных двигателей на этапе проектирования. В КБ предприятия отметили, что благодаря новому ПО впервые в отечественном двигателестроении корректировка была проведена с использованием только математического моделирования. Обычно для этого было необходимо провести два-три цикла натуральных испытаний. Программа прошла апробацию и используется при разработке двигателей.

ОДК активно внедряет цифровые технологии – цифровой двойник и компьютерное моделирование позволяют сократить объем натуральных испытаний и ускорить сертификацию авиационных двигателей. Эти технологии используются, в частности, для двигателя ПД-8.

### **When creating a GTU, part of the field tests will be replaced by mathematical modeling.**

*Salyut production complex has created software that allows reducing the number of full-scale engine tests. With the help of the software, it is possible to identify and correct the self-oscillations of the compressor blades of gas turbine engines at the design stage.*

*The Design bureau of the enterprise noted that thanks to the new software, the adjustment was carried out using only mathematical modeling for the first time in the domestic engine industry.*

## Поршневые и винтовые компрессорные установки разработки и изготовления ООО «ИНГК»

О. В. Бычков, С. В. Кудрявцев, М. И. Ладейщиков, И. А. Странкалс, И. И. Турусов – ООО «ИНГК»

### In brief

#### Piston and screw compressor plants designed and manufactured by INGC LLC

During the period from 2011 to 2024 the INGC production and engineering company implemented a significant number of projects for the manufacture and supply of complete modular compressor plants.

The company's assets include more than 20 regions where compressor plants are supplied, including the Russian Federation, countries of the near and far abroad – Uzbekistan, Kazakhstan, Congo, Cameroon, etc. Moreover, the geography of supplies of manufactured compressor equipment is constantly expanding: with the participation of specialists from INGC LLC.

За период с 2011 по 2024 год производственно-инжиниринговой компанией «ИНГК» реализовано значительное количество проектов по изготовлению и поставке полнокомплектных блочно-модульных компрессорных установок (КУ), в том числе:

- более 60 компрессорных установок на базе поршневых компрессоров (ПКУ), с применением практически всех возможных вариантов приводов: от газопоршневого двигателя (ГПД) до электродвигателя (ЭДВ), а также паровой турбины;
- около 20 компрессорных установок на базе винтовых компрессоров (ВКУ) с приводами как от ГПД, так и от ЭДВ.

В активе компании свыше 20 регионов, куда поставляются КУ, в том числе РФ, страны ближнего и дальнего зарубежья – Узбекистан, Казахстан, Конго, Камерун и т.д. Причем география поставок изготовленного компрессорного оборудования постоянно расширяется: при участии специалистов ООО «ИНГК» введены в эксплуатацию две полнокомплектные ПКУ мощностью по 1,4 МВт для французской компании Perenco Rep. S.A.R.L. Это первая компрессорная установка для размещения на морской платформе, выполненная «ИНГК» с соблюдением всех

требований Морского регистра. Обе установки оснащены ПК Cooper и ЭДВ Nidex. Для «ИНГК» — это уже вторая поставка на Африканский континент (в 2019 г. изготовлена и поставлена ВКУ мощностью 0,45 МВт на ГТЭС «Кинкаси» в Республику Конго – также по заказу Perenco Rep. S.A.R.L.).

Единичная максимальная мощность ПКУ, выполненных «ИНГК», составляет до 4 МВт, ВКУ – до 3 МВт. В составе ПКУ были применены поршневые компрессоры (ПК) таких известных производителей, как Ariel (JGP/1, JGJ/4, JGE/2, JG/4, JGC/4, JGT/4, JGK/2, JGP/1, KBZ/4, JGJ/6, JGC/6, JGJ/6); Cooper (CFH64, WH74); Nuovo Pignone (GE 2HG/2; 2SHMB/2); Shenyang Yuanda Compressor Co. (2D12.2862/0,45-16,5; 2D12.18.32/6.2-30.9; 4M10-28.08/1,95-22,4; 2D3.5-3.28/0.39-10.2); ПАО «Пензкомпрессормаш» (ГМ18-17/8-31 УХЛ4) и др.

Для изготовления ВКУ применялись винтовые компрессоры (ВК) следующих производителей: HAFI (1,8 МВт), Howden (WRV 204-110 50, WRViXN/255-110 30, WRVi 255-110 38, WRVi365/193, WRVi-510), GEA Grasso (VP-V36S-28), Kobelco (KS25LX).

В качестве приводов использованы поршневые двигатели Caterpillar, Superior Cameron,

Waukesha и др.; электродвигатели производства Siemens, Loher, Eldin, ООО «Русэлпром», Nidec, ABB, Wolong, UMEB SA. Кроме того, для ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» изготовлена ПКУ с приводом от паровой турбины Nuovo Pignone, GE.

### Варианты исполнения ПКУ и ВКУ

В зависимости от требований заказчика предприятие выпускает КУ в ангарных, модульных, контейнерных укрытиях или без укрытий (для размещения в существующих и вновь возводимых цехах) в блоках высокой степени заводской готовности. С этой целью системы КУ совместно с основными агрегатами (компонентами) монтируются, по возможности, на одной раме или в виде отдельных блоков.

КУ ангарного исполнения полностью размещается в легковозводимом здании, собранном из сэндвич-панелей на металлокаркасе, со всеми системами жизнеобеспечения и управления. В ангаре предусматриваются ворота и двери с тамбурами, помещение машинного зала полностью оборудуется системами жизнеобеспечения: электрическое освещение, водяное или газозвдушное отопление, рабочая и аварийная вентиляция, пожарный водопровод.

Ангарные укрытия проектируются и возводятся в соответствии с требованиями федеральных норм и правил, на металлоконструкции наносятся огнезащитные покрытия, обеспечивающие необходимый предел огнестойкости строительных конструкций. Применение быстровозводимых конструкций значительно снижает сроки строительства объекта и ввода его в эксплуатацию.

Для КУ малой мощности используется, как правило, контейнерный вариант. Блочномодульное исполнение, максимально высокая степень заводской готовности позволяет к минимуму свести строительномонтажные работы на объектах заказчиков.

Существенным преимуществом агрегатов ПКУ и ВКУ контейнерного типа является, несомненно, их соответствие транспортному габариту, поскольку при его соблюдении КУ могут быть доставлены заказчикам в собранном виде обычными транспортными средствами по дорогам общего пользования.

По требованию заказчика компания изготавливает и поставляет широкий спектр стационарного оборудования: трубопроводную обвязку, сепараторы газа, буферные емкости, емкости для различных жидкостей под давлением и под налив, системы подготовки газа, охлаждения, смазки, а также другое вспомогательное оборудование и системы КУ. Таким



образом, заказчик обеспечивается полнокомплектной компрессорной установкой, готовой к пуску на объекте эксплуатации.

Рис. 1.

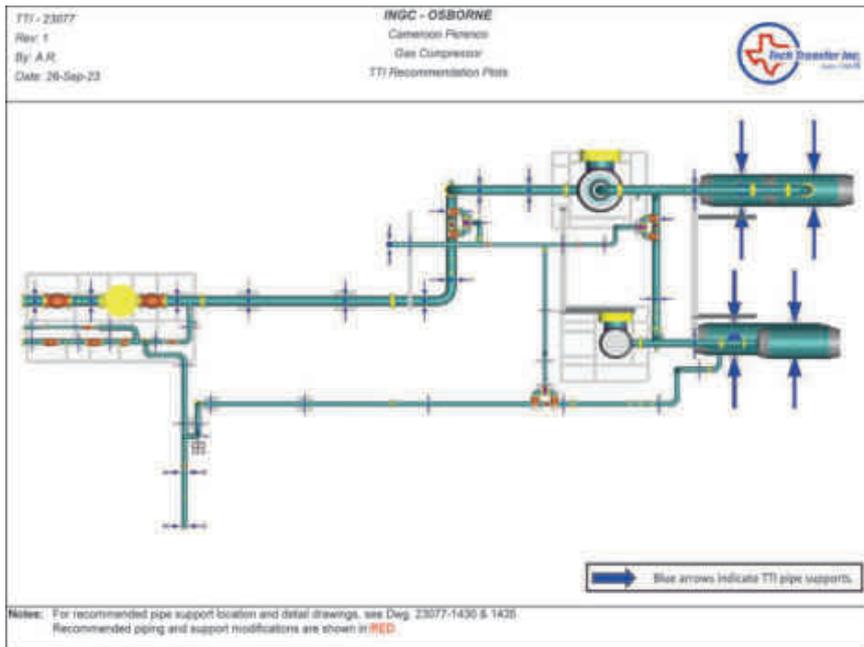
Пример реализованного проекта ПКУ с ЭДВ, выполненного ИНГК для компании Repenco Rep. S.A.R.L. (Франция), ПКУ установлена на морской платформе на побережье Атлантического океана, Республика Камерун

### ПКУ и ВКУ собственной разработки

Собственное конструкторское бюро ООО «ИНГК» (в составе 120 человек) обеспечивает конструкторской документацией обе производственные площадки предприятия, расположенные в г. Перми (на ул. Ново-Гайвинской, 92 и на Бродовском тракте, 116). Изготовление КУ и ГПА выполняется специалистами в соответствии с ТУ, ГОСТ, ЕСКД, API, в том числе и с соблюдением требований Морского регистра.



Рис. 2. ПКУ-022 блочно-модульного исполнения на Ево-Яхинском месторождении (ООО «Новатэк-Юрхаровнефтегаз» (ПАО «НОВАТЭК»))



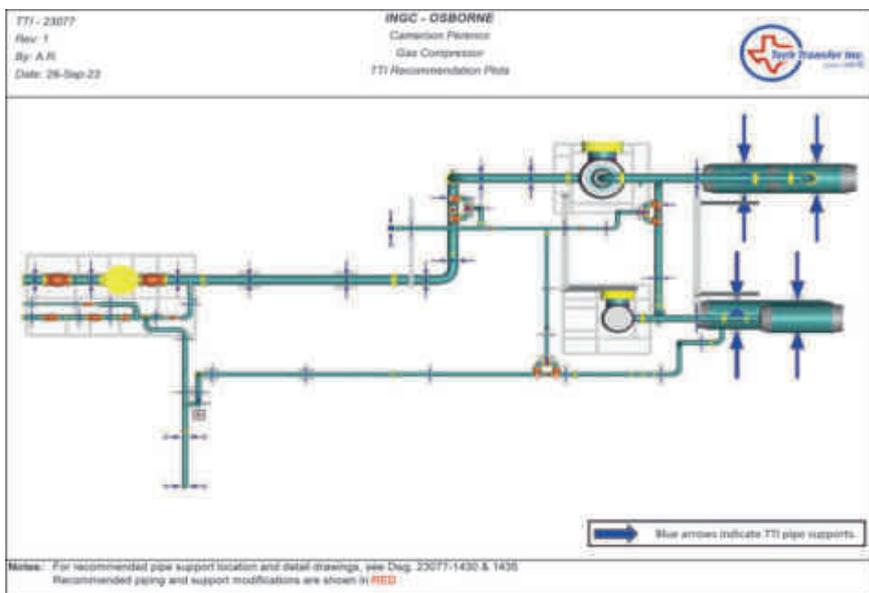
**Рис. 3.**  
Результаты анализа  
максимальной амплитуды  
вибрации

Все виды расчетов и разработка документации производятся самостоятельно, при этом используется лицензионное ПО: «Компас»; Ansys Mechanical Pro; Ansys CFD Premium, а также специализированное программное обеспечение для расчета режимов компрессоров.

За счет накопленного опыта, а также использования в конструкции КУ серийно изготавливаемых агрегатов и узлов обеспечиваются кратчайшие сроки выдачи документации и выпуска готового изделия.

**Рис. 4.**  
Рекомендованная схема  
расположения опорных  
конструкций опор для газовой  
системы установки  
ПКУ-020 по результатам  
выполненных работ

Конструкции ПКУ и ВКУ представляют собой сложную связанную систему, состоящую из привода, муфты и компрессора. Каждый элемент системы имеет свободные и вынужденные колебания. Для того чтобы свободные и вынужденные колебания (накладываясь друг на друга) не приводили к резонансу,



выполняется анализ крутильных колебаний системы «привод – муфта – компрессор» оцениваются ее динамические характеристики. На их основе специалистами КБ производится оценка нескольких рабочих режимов, выполняется анализ крутильных частот, крутильной статической реакции, реакции кручения, что позволяет уйти от предельных нагрузок и исключить режимы работы, близкие к критическим.

Для трубопроводов технологического газа (в составе КУ) совместно со сторонними организациями выполняется акустический анализ с дополнительным анализом напряжений трубопроводов системы в соответствии с API 618. С этой целью для акустического расчета каждая система моделируется с помощью программного обеспечения PULS XM, а для динамического анализа моделируется с использованием ПО SAP2000. Составляются отчеты результатов пульсаций с учетом предоставленного диапазона условий эксплуатации.

## Система менеджмента качества продукции

В компании «ИНГК» внедрена и эффективно функционирует система менеджмента качества (СМК), продукция имеет необходимые сертификаты соответствия и другую разрешительную документацию, действующую в РФ и странах СНГ. Начиная с 2014 года компания ежегодно подтверждает соответствие своей СМК требованиям стандарта ГОСТ Р ИСО 9001.

С 2019 года система управления качеством «ИНГК» сертифицирована на соответствие требованиям стандарта СТО Газпром 9001-2018 (подтверждено Сертификатом СМК в СДС ИНТЕРГАЗСЕРТ); имеются Сертификаты СДС ИНТЕРГАЗСЕРТ соответствия типа продукции: на ГПА серии «Иртыш» и на компрессорные установки; а также Свидетельство об оценке деловой репутации (ОДР).

Также в 2019 году производство предприятия подтвердило соответствие международно признанному стандарту ASME Code, Section VIII, Division 1, устанавливающему требования к изготовлению сосудов под давлением. В 2021 году пройдена аккредитация в качестве поставщика компрессорного оборудования для проектов ADNOC (Abu Dhabi National Oil Company).

## Ввод КУ в эксплуатацию и последующий сервис

Специалисты компании осуществляют полный комплекс работ по вводу в эксплуатацию изготовленного оборудования (включая ШМР

и ПНР) и его последующему гарантийному и постгарантийному обслуживанию: проведение ТОиР, сервис, обеспечение ЗИП и расходными материалами.

Монтаж КУ на объекте эксплуатации выполняется на подготовленный фундамент, размеры и нагрузки на точки фундамента выдаются заказчику на этапе проектирования установки. Внутри ангарных укрытий монтаж оборудования выполняется либо с применением собственной силовой рамы, либо непосредственно сразу на фундамент заказчика. В конструкцию фундамента закладываются колодцы, в которые в последующем устанавливаются анкерные болты для крепления рамы установки и другого вспомогательного оборудования. Рама выставляется в горизонтальную плоскость, и колодцы заливаются бетоном, а после набора прочности бетона выполняется затяжка гаек анкерных болтов.

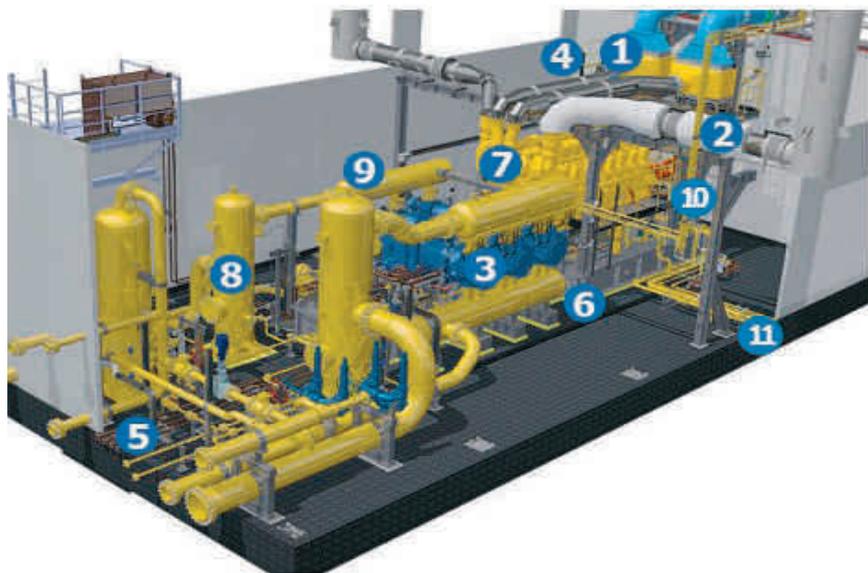
Производится выверка основного оборудования: в первую очередь, компрессор ставится в горизонтальную поверхность с помощью отжимных болтов. С помощью Fixturlaser выполняется центровка валов привода и компрессора. Приводная часть устанавливается на регулируемые винтовые опоры и притягивается к раме, а опорные поверхности компрессора подливаются специальной эпоксидной смолой. После центровки и протяжки всего крепежа выполняется контроль «мягкой лапы» опорных поверхностей компрессора и привода.

### Дополнительные компетенции

Компания «ИНГК» осуществляет полный комплекс работ по созданию для КУ систем автоматизации и электрораспределения любой степени сложности, их монтажу и внедрению. Так, в 2020 году специалисты компании разработали собственную информационно-управляющую систему (СИУС) «Сириус» для управления любыми технологическими процессами, которая была внесена в Реестр средств измерения. В том же году СИУС «Сириус» была применена для автоматизации ГПА с центробежным компрессором при его изготовлении с приводом от ЭДВ (ЭГПА-0201) мощностью 1,7 МВт серии «Иртыш» для комплекса деасфальтизации ООО «Лукойл–Волгоград нефтепереработка». В 2021 году этот агрегат был введен в эксплуатацию.

В дальнейшем СИУС «Сириус» собственной разработки была успешно применена специалистами компании и при изготовлении ПКУ и ВКУ в следующих проектах:

- две полнокомплектные ПКУ-020 для морской платформы в Республике Камерун



(изготовлены «ИНГК» по заказу компании Perenco Rep S.A.R.L.);

- две ПКУ-022 и одна ПКУ-032 для Ево-Яхинского месторождения (ООО «Новатэк-Юрхаровнефтегаз»);
- три ПКУ-023 для проекта Южная Тандырча (АО «Узбекнефтегаз»);
- шесть ПКУ (024-027) для Чинаревского месторождения (MSI для ТОО «Жаикмунай», Казахстан);
- четыре ВКУ-005 для Восточно-Капитоновского месторождения (АО «Оренбургнефть»).

### Расширение спектра услуг

С учетом соответствующей потребности заказчиков предприятие в настоящее время выполняет работы по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) КУ с ПК и ВК зарубежного производства.

ТОиР, сервис и поставка ЗИП для КУ с компонентами зарубежного производства сейчас очень востребованы на рынке, так как в условиях санкций многие компании не могут закупить комплектующие для своего оборудования, выполнить ТОиР, реконструкцию и/или модернизацию.

В связи с этим, а также с учетом опыта работы по агрегатированию компрессоров и приводов зарубежного производства ведущих производителей, компания активно развивает свои наработки и компетенции в этом направлении. По состоянию на 1-й квартал 2024 года выполнены сервисные работы уже более чем для 20 КУ и ГПА с компонентами производителей из стран дальнего зарубежья.

Рис. 5.

- Основные системы и компоненты ПКУ производства ИНГК:
- 1) система фильтрации и подачи воздуха в ГПД;
  - 2) система выпуска отработавших газов ГПД;
  - 3) компрессор;
  - 4) лестницы и площадки обслуживания;
  - 5) маслосистема компрессора и ГПД;
  - 6) силовая рама;
  - 7) двигатель (ГПД);
  - 8) сепараторы;
  - 9) буферные емкости;
  - 10) система охлаждения двигателя и компрессора;
  - 11) система подачи топливного газа ГПД

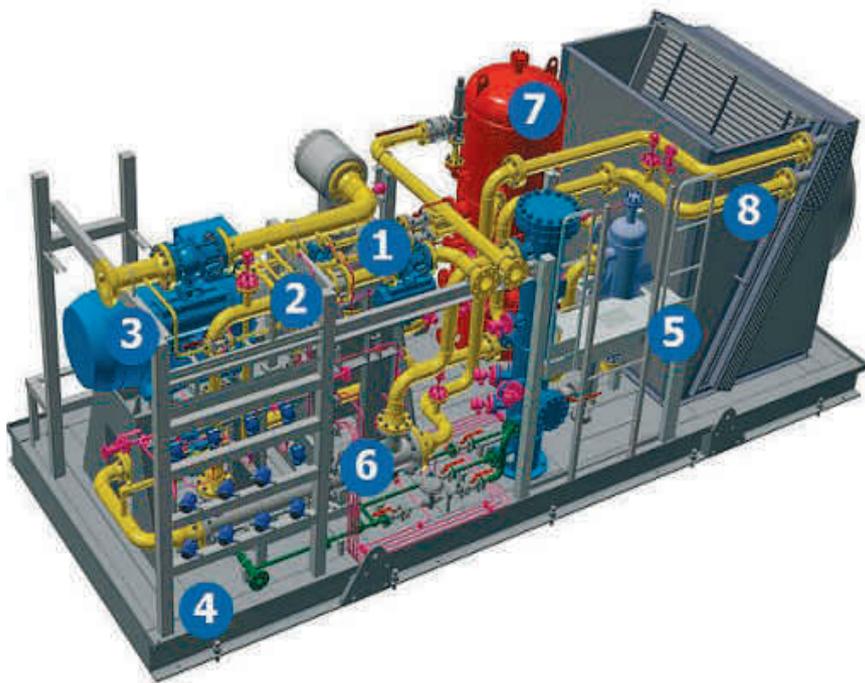


Рис. 6. Основные системы и компоненты ВКУ производства ИНГК:

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| 1) винтовой компрессор;     | 5) лестницы и площадки обслуживания;          |
| 2) муфта;                   | 6) система маслообеспечения компрессора;      |
| 3) электрический двигатель; | 7) система газовая с сепараторами и АВО газа; |
| 4) силовая рама;            | 8) система охлаждения                         |

### Заключение

К преимуществам КУ, изготавливаемых ООО «ИНГК», относится:

- блочно-модульное исполнение и максимальная заводская готовность;
- укрытие КУ в зависимости от типоразмера и требований заказчика;



Рис. 7.

Для ПКУ и ВКУ собственного производства ИНГК обеспечивает разработку и внедрение АСУ ТП, в том числе локальных систем управления; изготовление шкафов НКУ, АСУ ТП, пожарной сигнализации и автоматики, распределительных, управления, отопления и вентиляции; щитов освещения, учета, АВР и т.д., с последующим выполнением электромонтажных (ЭМ) и пусконаладочных работ (ПНР) на объектах заказчика.

- работа в широком диапазоне изменения давлений (как на всасывании, так и нагнетании) при сохранении высоких значений КПД;
- торсионный и акустический расчет и анализ КУ обеспечивает длительную безаварийную промышленную эксплуатацию поставляемого оборудования;
- исполнение КУ с различными видами приводов (электродвигатель, газопоршневой и/или дизельный двигатель);
- арктическое и тропическое исполнение (возможность работы в любых климатических условиях, в диапазоне температур от  $-60$  до  $+50$  °С);
- собственная разработка и изготовление систем и компонентов КУ;
- сертификация по требованиям РФ, а также (при необходимости) полное соответствие стандартам API;
- собственная сервисная служба;
- удобство обслуживания.

Приобретенный специалистами компании опыт в разработке и создании оптимальных конструкций ПКУ и ВКУ с сочетанием основных компонентов (компрессоров и приводов) различных производителей позволяет постоянно расширять номенклатурную линейку применяемого в составе КУ оборудования. Приоритетное направление деятельности ООО «ИНГК» – внедрение перспективных зарубежных технологий в производство современного энергоэффективного оборудования на территории России.

При производстве КУ в составе основных компонентов постоянно увеличивается объем использования отечественного оборудования и компонентов, а также передовых разработок из стран, не поддерживающих санкции в отношении России (в том числе КНР) и имеющих в последнее время приоритет в качестве субпоставщиков компонентов КУ (компрессоров и приводов).

В настоящее время компания «ИНГК» расширила свои компетенции, выполнив ряд проектов (ПКУ-024, ПКУ-025, ПКУ-026, ПКУ-027) с применением ПК производства Shenyang Yuanda Compressor Co. (КНР), а для ПКУ-031 с применением поршневых компрессоров отечественного производителя – ПАО «Пензкомпрессормаш».

ООО «ИНГК» планирует и в дальнейшем расширять номенклатурный ряд ПКУ и ВКУ с различным сочетанием применяемых ПК и ВК с разными типами приводов, обеспечивая тем самым потребности нефтегазового сектора как российского рынка, так и зарубежного.

**Во Франции морские ветротурбины планируется использовать для производства зеленого водорода.**

Французские компании Lhyfe и DORiS хотят объединить ветровую электростанцию на шельфе с электролизной установкой и таким образом производить водород в море. С этой целью производитель зеленого водорода и специалист по строительству прибрежных ветроэлектростанций заключили соглашение по сотрудничеству. Компании ведут работы по интеграции электролизера Lhyfe в поплавков морской ветротурбины DORiS Nerewind уже более двух лет.

Бюджет проекта составляет около 60 млн евро и включает расходы на исследования, разработку и производство первого прототипа. Создать его планируется к 2025 г. Система Nerehyd может быть развернута для сетевых или автономных приложений как в небольших ВЭС мощностью 10 МВт, так и в крупных электростанциях мощностью в несколько сотен МВт.

В долгосрочной перспективе, по мнению компаний, масштабируя такие решения, можно значительно увеличить производственные мощности зеленого водорода в Европе. Это позволило бы сократить импорт водорода и в то же время достичь амбициозной цели Евросоюза по расширению производства возобновляемых источников энергии.

Компания Lhyfe в сотрудничестве с производителем судов Chantiers de l'Atlantique уже работает над установкой первого морского электролизера во Франции, подключенного к плавучей ветротурбине Floatgen. Электролизер введен в эксплуатацию на демонстрационной площадке SEM-REV в 2022 г. Это один из первых в мире морских проект по производству зеленого водорода.

**In France, offshore wind turbines are planned to be used to produce green hydrogen.**

French companies Lhyfe and DORiS want to combine an offshore wind farm with an electrolysis plant and thus produce hydrogen at sea. To this end, a producer of green hydrogen and a specialist in the construction of coastal wind farms have concluded a cooperation agreement. The companies have been working on integrating the Lhyfe electrolyzer into the float of the DORiS Nerewind offshore wind turbine for more than two years. The project budget is about 60 million euros and includes the costs of research, development and production of the first prototype.

**На испытательном стенде ООО «НГ-Энерго» завершены испытания ГПЭС Энерго-П1500/10,5ХДН30.**

Компания «НГ-Энерго» начала агрегатирование газопоршневых электростанций мощностью 1500 кВт на базе двигателей CHG622V16.

Программа проведенных испытаний включала подтверждение основных параметров станции, работу ГПЭС на различных режимах и оценку ее эффективности, проверку работоспособности АСУ электростанции.

В ходе работ по изготовлению электростанции, начиная с ноября 2023 года, проводились испытания, позволившие оценить надежность ее работы. Кроме испытаний, проводился анализ конструкции ГПЭС: оценивалась надежность и ремонтпригодность ее компонентов, агрегатов и узлов. На сегодня Энерго-П1500/10,5ХДН30 производства ООО «НГ-Энерго» является современным энергетическим агрегатом для надежного энергоснабжения объектов заказчика.

**Tests of Energo-P1500/10,5HND30 gas engine plant have been completed at the test rig of NG-Energo LLC.**

NG-Energo has started packaging of 1,500 kW gas engine power plants based on CHG622V16 (HND) engines.

During the manufacture of the power plant, starting in November 2023, tests were carried out to assess the reliability of its operation.

**В Кургане началась локализация производства газопоршневых установок Jichai.**

На Курганском заводе комплексных технологий (группа «Интертехэлектро») приступили к сборке первых ГПЭС на базе газопоршневых двигателей китайской компании CNPC Jichai Power Company. Энергоустановки будут применяться для автономного энергоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий.

Сборка ГПЭС осуществляется в рамках соглашения, подписанного при участии губернатора Курганской области В.М. Шумкова на Курганском индустриальном фестивале в сентябре 2023 года.

На мощностях Курганского завода планируется трехэтапный переход от крупноузловой сборки энергоустановок к их частичному, а затем и полному производству. Полностью процесс планируется завершить к 2028 году. Локализация производства газопоршневых установок в таком объеме в России запущена впервые.

Группа «Интертехэлектро» является эксклюзивным сервисным партнером компании Jichai в России.



## Программный комплекс для расчета рабочего колеса центробежного компрессора

**В.В. Барсков, д.т.н – доцент, barskov\_vv@spbstu.ru**

**А.И. Мариняк – лаборант, marinyak.ai@edu.spbstu.ru**

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**

### Ключевые слова:

проектирование,  
предварительный  
расчет,  
параметры входа,  
геометрия,  
критическое сечение,  
потери,  
центробежный  
компрессор,  
рабочее колесо,  
методика,  
программный  
комплекс,  
приложение

### Аннотация

Методика проектирования рабочего колеса центробежной ступени компрессора включает семь основных этапов: предварительный расчет, расчет параметров входного сечения, расчет геометрических характеристик, расчет параметров критического сечения, расчет выходного сечения без учета потерь, пересчет выходных характеристик с учетом влияния потерь и профилирование рабочего колеса (ПК) центробежного компрессора.

На первом этапе, предварительном расчете, определяются основные параметры компрессора, необходимые для дальнейшего проектирования. Расчет параметров входа позволяет установить начальные условия потока на входе в колесо. В ходе расчета геометрии проектируются размеры и форма лопаток колеса, что важно для его аэродинамической эффективности. Расчет параметров критического сечения учитывает условия в наиболее нагруженной

зоне колеса, обеспечивая равномерное распределение давления и температуры. Оценка параметров выходного сечения без учета потерь определяет базовые характеристики производительности компрессора.

Следующий этап включает расчет потерь, что позволяет более точно моделировать реальные условия эксплуатации компрессора и корректировать выходные характеристики с учетом влияния потерь. Завершающим этапом является профилирование рабочего колеса, оптимизирующее форму и расположение лопаток для обеспечения максимально эффективной работы компрессора.

Методика также предусматривает создание программного комплекса под ОС Windows, что облегчает процесс проектирования и позволяет пользователю моделировать и оценивать несколько потенциальных конфигураций компрессора [1].

## Software complex for calculating the impeller of a centrifugal compressor

**V.V. Barskov, Doctor of Engineering Science – Assistant Professor, barskov\_vv@spbstu.ru**

**A.I. Marinyak — Laboratory Assistant, marinyak.ai@edu.spbstu.ru**

**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**

### Key words:

design,  
preliminary  
calculation,  
input parameters,  
geometry,  
critical section,  
losses,  
centrifugal  
compressor,  
impeller,  
methodology,  
software package,  
application

### Abstract

The design methodology of the impeller of the centrifugal stage of the compressor includes seven main stages: preliminary calculation, calculation of input section parameters, calculation of geometric characteristics, calculation of critical section parameters, calculation of output section without loss, recalculation of output characteristics taking into account the influence of losses and profiling of the impeller.

At the first stage the main parameters of the compressor are determined. The calculation of the input parameters allows you to set the initial flow conditions at the entrance to the wheel. During the geometry calculation, the dimensions and shape of the wheel blades are designed, which is important for its aerodynamic efficiency. The calculation of the critical section parameters takes into account the conditions in the most loaded

zone of the wheel, ensuring an even distribution of pressure and temperature. The evaluation of the parameters of the output section without taking into account losses determines the basic characteristics of the compressor performance.

The next stage includes the calculation of losses, which allows you to more accurately simulate the actual operating conditions of the compressor and adjust the output characteristics taking into account the impact of losses. The final stage is the profiling of the impeller, which optimizes the shape and location of the blades to ensure the most efficient operation of the compressor.

The methodology also provides for the creation of a software package for Windows OS, which facilitates the design process and allows the user to model and evaluate several potential compressor configurations [1].

В настоящее время при проектировании турбореактивных двигателей (ТРД) для самолетов и вертолетов гражданской и боевой авиации в классе малой и средней мощности все чаще проявляется интерес к центробежным компрессорам. Это обусловлено возможностью достижения в них высоких показателей степени повышения давления при небольшой осевой протяженности и массе.

В связи с этим автор статьи разработал программный комплекс, включающий полный расчет всех необходимых характеристик проектируемого центробежного рабочего колеса. Основой предлагаемой методики расчета является одномерная математическая модель. Данная программа должна облегчить работу инженеров-проектировщиков, так как позволяет быстро рассчитывать и анализировать различные конфигурации рабочего колеса центробежного компрессора.

### **Методология**

Подход данной работы сочетает в себе как передовые разработки инженеров и ученых со всего мира, так и классические методики, проверенные десятилетиями.

Расчет делится на 7 этапов: предварительный расчет, расчет параметров входа, расчет геометрии, расчет параметров критического сечения, расчет выходного сечения без учета потерь, расчет потерь (пересчет выходных характеристик с учетом влияния потерь) и профилирование рабочего колеса центробежного компрессора.

### **Методика предварительного расчета**

На первом этапе решается вопрос о выборе размеров проточной части ЦБК. Этап предварительного расчета основан на работах [2, 3] и реализован тремя ветвями.

Первая ветвь: основным и гибким методом расчета является метод, основанный на предположении о постоянном значении коэффициента расхода. Согласно [3], наивысшая эффективность и коэффициент напора наблюдаются в диапазоне коэффициента расхода от 0,06 до 0,14. Следовательно, оптимальное значение коэффициента расхода должно выбираться в этом диапазоне.

Вторая ветвь: в случае когда выходной диаметр рабочего колеса известен, то алгоритм при заданном значении диаметра является наиболее подходящим вариантом расчета. Здесь выходной диаметр рабочего колеса становится независимым параметром, а все остальные параметры производительности, включая коэффициент расхода на входе, получают из процесса расчета.

Третья ветвь: последний метод, который будет представлен, основан на предположении, что частота вращения — заданная величина. Все остальные расчетные параметры выводятся из различных соотношений.

### **Расчет параметров входа**

На втором этапе был представлен новый подход для расчета параметров входа в рабочее колесо центробежного компрессора с предварительной закруткой и без нее. За основу были взяты работы X. Zhong, S.L. Dixon и др. [4, 5].

Новый метод позволяет более точно и эффективно учитывать влияние таких факторов, как предварительная закрутка и изменения геометрии, на производительность центробежного компрессора. В результате использования модифицированной формулы для коэффициента потерь инженеры могут получить более точные и надежные результаты при расчете характеристик компрессора.

### **Расчет геометрии лопатки**

На третьем этапе осуществляется оценка оптимальных значений углов установки лопаток центробежного компрессора на основе анализа углов потока в различных сечениях. Подобные анализы позволяют создавать более эффективные компрессоры, учитывая комплексность газодинамических процессов, происходящих внутри них. Оптимальные углы установки лопаток способствуют повышению эффективности и производительности центробежного компрессора, что является ключевым фактором в его успешном функционировании и применении в различных областях, включая авиацию и энергетику.

### **Расчет параметров критического сечения и параметров выхода без учета потерь**

Горло канала — это наименьшая область в межлопаточном канале, где существует наибольшая вероятность возникновения запираания потока. Величина горла имеет важное значение при расчетах производительности, поскольку определяет максимальный массовый расход, который может пройти через рабочее колесо [7].

Целью данного этапа является предварительная проверка межлопаточного канала на запираание, так как при определенном значении скорости набегающего на решетку потока в ней возникают режимы запираания, когда увеличение скорости набегающего потока невозможно. Следовательно, существует максимальный расход воздуха через ступень, при котором дальнейшее его увеличение также невозможно.

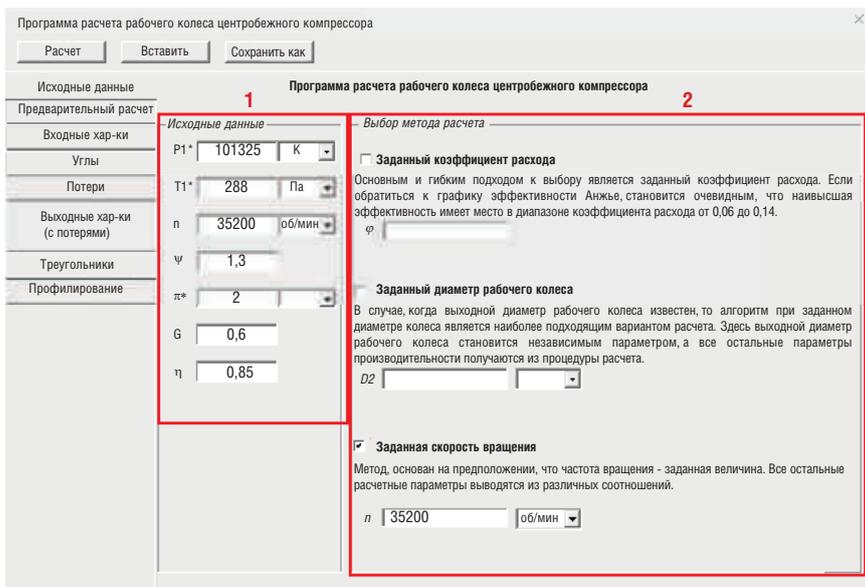


Рис. 1.

Окно исходных данных:

- 1) поле заполнения исходных данных;
- 2) поле выбора метода расчета

Расчет параметров выхода без учета потерь является дополнительным этапом, представляя собой расчет параметров потока в горле межлопаточного канала и выходного сечения рабочего колеса, причем выходные характеристики на данном этапе рассчитываются без учета потерь, загромождения пристеночными слоями и искажения поля скоростей на выходе из колеса. Основано на работах R. H. Aungier, F. J. Wiesner. [3, 6].

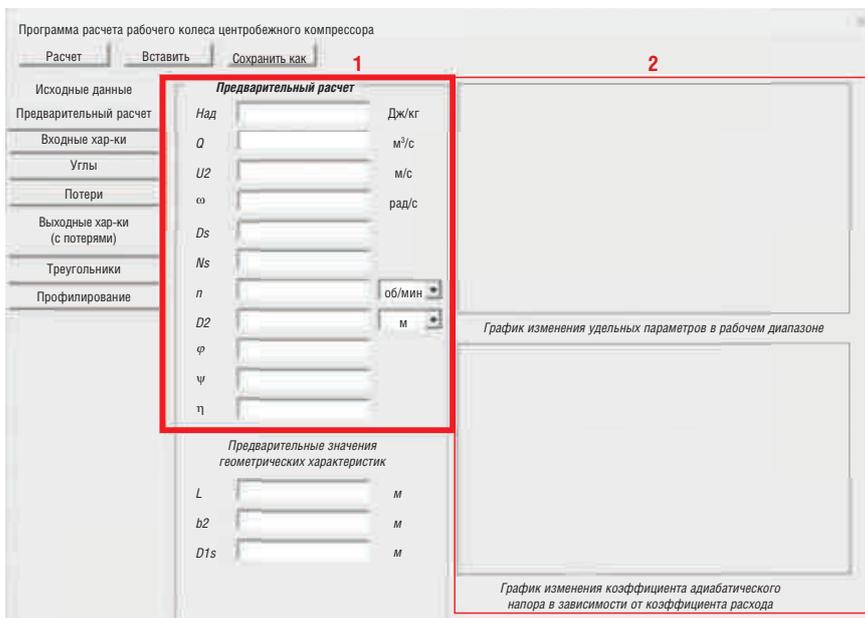
### Этап расчета потерь и пересчета выходных характеристик

Данный этап включает расчет внешних и внутренних потерь с применением различных методик. Представлена однозонная методика расчета параметров потока в выходном сечении рабочего колеса центробежного компрессора. В методике расчет производится с учетом внутренних и внешних потерь, что

Рис. 2.

Страница предварительного этапа расчета:

- 1) поле результатов расчета;
- 2) поле графического материала



Потери	Авторы
Утечки	Aungier [3], Jansen [7]
Трение дисков	Shepherd [8], Boyce [9], Daily and Nece
Рециркуляция	Алексеев [10], Aungier, Rodgers [11], Coppage [12]

Табл. 1. Внешние потери

позволяет получить более реалистичные газодинамические параметры. Кроме того, в однозонной модели возможно регулирование учета загромождения пограничным слоем. Далее описаны используемые в расчете методики для расчета внешних и внутренних потерь (табл. 1 и 2 соответственно).

Заключительным этапом в расчете РК является графическое представление всех результатов расчета.

### Запуск и выполнение программы

Запуск программы осуществляется двойным нажатием на иконку файла программы, представляющий собой Excel-документ с поддержкой макросов. При открытии файла высвечивается Excel-лист, на котором расположены таблицы для заполнения исходных данных и непосредственно кнопка запуска программы. Следует отметить, что таблица исходных данных необязательна для заполнения при запуске программы, так как аналогичные данные можно заполнить непосредственно в окне запущенной программы.

При открытии программы высвечивается первая страница (рис. 1), на которой есть ряд необходимых для работы кнопок:

- «Расчет...» запускает расчет всех характеристик с учетом исходных данных, которые пользователь заполнил;
- «Вставить...» позволяет вставить исходные данные, которые ранее пользователем были выписаны в документ формата .xlsx в необходимой последовательности;
- «Сохранить как...» сохраняет результат расчета в отдельный документ формата .xlsx.

Страница делится на две секции: окно для ввода исходных данных и окно выбора метода расчета – данную страницу оператору необходимо заполнить самостоятельно. Если оператор в начальном окне программы (Excel-лист) уже заполнил таблицы исходных данных, при нажатии кнопки «Вставить...» эти данные будут автоматически перенесены.

При выборе ветви расчета оператору необходимо поставить галочку рядом с необходимой ветвью, тем самым фиксируя величину, введенную в поле ниже.

Потери	Авторы
Потери на удар	Whitefield and Baines[13], Алексеев
Потери на угол атаки	Aungier, Conrad [14], Gravidahl, Galvas
Потери на диффузорность	Aungier
Потери на загибание	Aungier
Потери на трение	Aungier, Jansen
Потери на нагрузку	Aungier, Coppage
Потери на загромождение	Aungier
Потери на смешивание	Aungier, Johnston and Dean, Алексеев
Потери в зазоре	Aungier, Rodgers, Krylov
Потери при крит. числе Маха	Aungier, Алексеев
Потери на вязкость	Алексеев

Табл. 2. Внутренние потери

Кроме того, оператор должен учитывать, что фиксировать можно только одну из трех предложенных величин (выбрать только одну ветвь расчета), и поле соответствующего выбора обязательно должно быть заполнено. В дальнейшем при нажатии кнопки «Расчет» все пустые ячейки автоматически заполняются.

Стоит отметить, что во всех полях, где рядом расположено поле со списком, для удобства предложен выбор единиц измерения. При нажатии кнопки «Расчет» окна, в которых за единицу измерения выбраны значения, не входящие в международную систему единиц (СИ), будут автоматически конвертированы.

Для перехода на следующий этап расчета необходимо воспользоваться полем выбора этапа расчета, расположенным слева от рабочего поля.

В рабочем поле, кроме численных значений, также есть графический материал (рис. 2), позволяющий тонко настраивать исходные данные для получения максимального значения эффективности, так как на графиках и диаграммах, представленных в программе, легко определить, в какую сторону нужно изменить ту или иную величину для достижения необходимого результата. Далее представлены остальные окна программы, соответствующие этапам расчета.

На странице расчета входных характеристик поле исходных данных полностью заполнять необязательно - достаточно будет одного сочетания параметров из представленных (рис. 3).

Следующий этап, представленный в программе - это расчет геометрии лопатки (рис. 4).

При заполнении значений углов атаки у оператора есть выбор: равномерное распределение

Рис. 3.

Страница расчета входных характеристик:

- 1) исходные данные с выбором известных величин;
- 2) результаты расчета входных характеристик метода расчета

или ручной ввод значений. В первом случае оператору следует заполнить только значения углов атаки на втулке и периферии, а распределение по сечениям будет равномерным. Второй вариант позволяет ввести данные по углам атаки по всем сечениям вручную.

Расчет критического сечения реализован в дополнительном окне (рис. 6), на котором представлен непосредственно расчет горла межлопаточного канала. Далее подразумеваются страницы расчета выходных характеристик с учетом потерь, (рис. 5), построение треугольников скоростей по сечениям.

### Сохранение результатов и закрытие программы

Для сохранения полученных результатов, после выполнения необходимых расчетов необходимо воспользоваться кнопкой «Сохранить как...» (рис. 1). При выполнении

Рис. 4.

Страница расчета углов потока и конструктивные углы:

- 1) поле выбора принципа распределения углов атаки (равномерное распределение, ручной ввод)

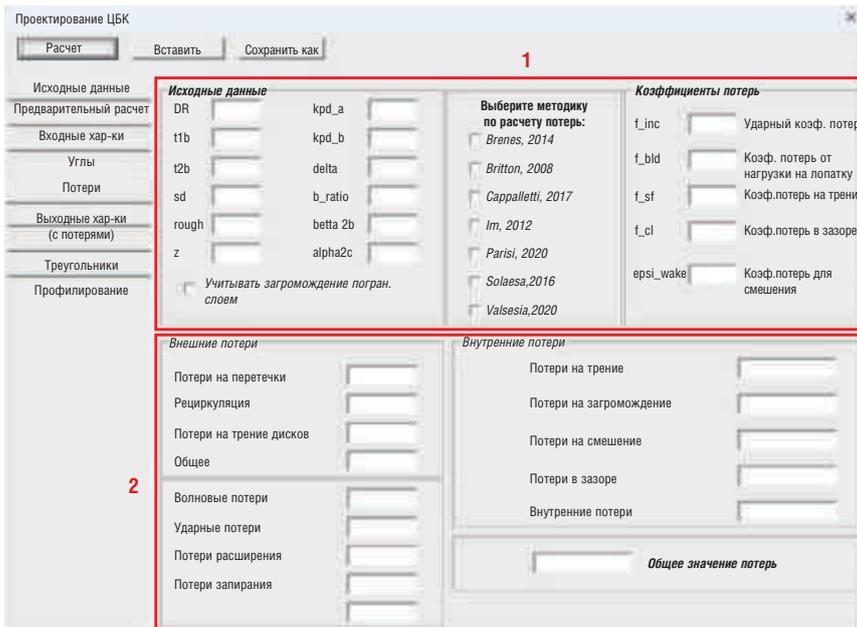


Рис. 5.

Расчет потерь:

- 1) поле исходных данных;
- 2) результаты расчета

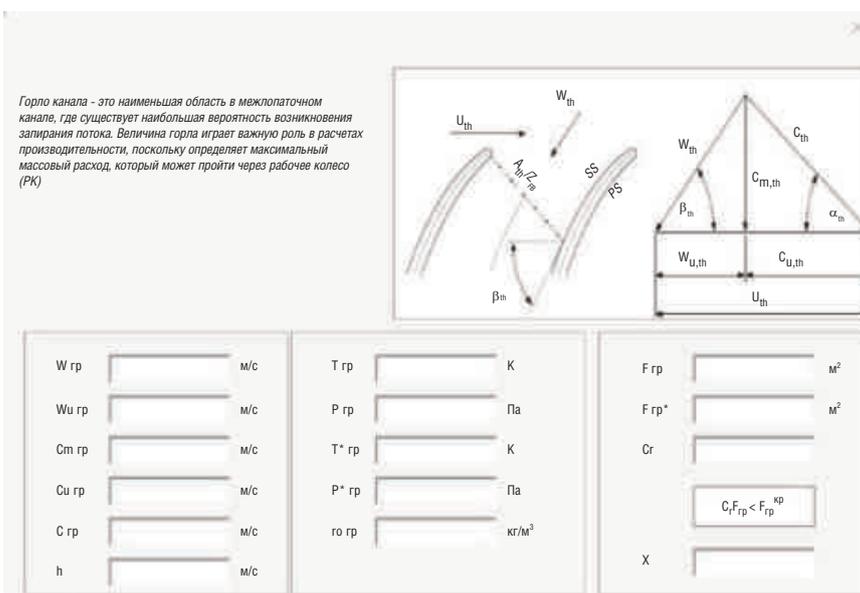
инструкции, описанной выше, все результаты расчетов будут сохранены в изначально открытый Excel-лист программы. Для закрытия программы необходимо нажать на соответствующую кнопку в правом верхнем углу окна.

## Выводы

По итогам работы была разработана методика расчета рабочего колеса центробежного компрессора, на основе которой создано приложение под ОС Windows. Предлагаемый программный комплекс позволяет существенно автоматизировать расчет центробежного компрессора и снизить трудозатраты на проведение приведенного расчета в несколько раз. Как следствие, это ведет к повышению производительности труда инженеров, занятых одномерными расчетами двигателей с центробежным компрессором. **FD**

Рис. 6.

Расчет критического сечения межлопаточного канала



Горло канала - это наименьшая область в межлопаточном канале, где существует наибольшая вероятность возникновения закрутки потока. Величина горла играет важную роль в расчетах производительности, поскольку определяет максимальный массовый расход, который может пройти через рабочее колесо (РК)

## Список использованных источников

1. Мариняк А.И. Создание программного комплекса для расчета рабочего колеса центробежного компрессора / А.И. Мариняк // Сборник аннотаций конкурсных работ, МАИ, Москва. – 2023. – 45 с.
2. Cordier O. Ahnlichkeitsbedingungen fur Stromungsmaschinen, BWK Bd. 6. – № 10. – 1953.
3. Aungier R.H. Centrifugal Compressor Stage Preliminary Aerodynamic Design and Component Sizing / R.H. Aungier // ASME, 1995.
4. Zhong X. Potential of the range extension of compressors with a variable prewhirl for automotive turbocharged engines with an ultra-high-power density / X. Zheng, Q.J. Huan // Automobile Engineering. – 2015. – V. 229(14). – pp. 1959-1968.
5. Dixon S.L. Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery / S.L. Dixon // Elsevier Inc., 2010.
6. Wiesner F.J. A Review of Slip Factors for Centrifugal Impellers / F.J. Wiesner // ASME Eng. Power. – 1967. – V.89(4). – pp. 558-566.
7. Jansen W. A method for calculating the flow in a centrifugal impeller when entropy gradient are present / W. Jansen; Inst. Mech. Eng. Intern. Aerodyn. 1970.
8. Shepherd D. Principles of Turbomachinery / D. Shepherd // Macmillan Publishing Company, 1956.
9. Boyce M.P. New Developments in Compressor Aerodynamics / M.P. Boyce // Texas AdM University, 1972.
10. Алексеев. Принцип авиационных двигателей. – Издательство науки и правды, 1982.
11. Rodgers C. A Cycle Analysis Technique for Small Gas Turbines / C. Rodgers // Proc. Inst. Mech. Eng. Conf. Proc, 1968.
12. Copping J. Study of Supersonic Radial Compressors for Refrigeration and Pressurization Systems / J. Copping, F. Dallenbach // Garrett Corp Los Angeles Ca AiResearch MFG DIV, 1956.
13. Whitfield A. Design of Radial Turbomachines / A. Whitfield, N.C. Baines // John Wiley and Sons Inc., 1990.
14. Conrad O. The calculation of performance maps for centrifugal compressors with vane-island diffusers / O. Conrad, K. Raif, M. Wessels // In Proceedings of the ASME Twenty-Fifth Annual International Gas Turbine Conference and Twenty Second Annual Fluids Engineering Conference on Performance Prediction of Centrifugal Pumps and Compressors, 1979.

### Компании INNIO и Detection представили систему мониторинга двигателей и компрессоров.

Программный продукт SKIDIQ предназначен для операторов газоперекачивающих агрегатов и компрессорных установок. Он обеспечивает мониторинг и оптимизацию параметров двигателей INNIO Waukesha и компрессоров в режиме реального времени, при этом снижаются эксплуатационные расходы, увеличивается время безотказной работы.

Данная система мониторинга предоставляет единую облачную платформу для определения кодов неисправностей компрессорного оборудования и двигателей с прямым доступом к электронному справочному руководству Waukesha, позволяющему операторам быстро выявлять и устранять неполадки. SKIDIQ предоставляет оператору полную информацию о техническом состоянии компрессора и двигателя.

Программа SKIDIQ позволяет собирать, анализировать и архивировать большие массивы оперативных данных по эксплуатационным параметрам и режимам работы агрегатов, отслеживая более 100 различных параметров.

### Индийская компания GRSE будет выпускать двигатели MTU серии 4000.

Garden Reach Shipbuilders and Engineers Ltd (GRSE) и Rolls-Royce подписали рамочное лицензионное соглашение об освоении производства судовых двигателей MTU серии 4000 согласно требованиям IMO Tier II в рамках программы «Сделано в Индии».

Двигатели планируется применять в качестве силовых установок быстроходных патрульных и боевых кораблей Индии и береговой охраны страны. Производство будет располагаться на заводе GRSE в г. Ранчи, штат Джаркханд.

В рамках соглашения планируется сборка двигателей из компонентов производства MTU, испытания и доводка двигателя. Также предусмотрена поставка и послепродажное обслуживание выпускаемых двигателей на территории Индии.

Новое соглашение является продолжением партнерских отношений двух компаний. Начиная с 1980-х годов GRSE изготавливает, обслуживает и ремонтирует двигатели MTU ранних серий.



### Введена в эксплуатацию ГТУ на морской платформе в Южно-Китайском море.

Китайская нефтегазовая компания CNOOC (China National Offshore Oil Corporation) ввела в эксплуатацию газовую турбину Taihang-7 мощностью 7 МВт на морской платформе Lufeng 8-1. Она работает в составе электростанции когенерационного цикла, производимая электроэнергия и тепло используются для нужд нефтегазовой платформы.

Газовая турбина Taihang-7 разработана и изготовлена в Китае на базе авиационного двигателя WS-10. В ее конструкции применяются передовые разработки и технологии. В частности, ГТУ оснащена двухтопливной камерой сгорания, что дает возможность использовать как природный газ, так и дизельное топливо.

В настоящий момент в семействе авиапроизводных газовых турбин собственной разработки компании АЕСС четыре модели: Taihang-7 (AGT-7; 7 МВт), Taihang-15 (AGT-15; 15 МВт), Taihang-25 (AGT-25; 25 МВт) и Taihang-110 (AGT-110; 110 МВт).





### В Москве на ТЭЦ-23 введен модернизированный турбоагрегат № 4.

Обновление мощности ТЭЦ-23 проведено в рамках реализации госпрограммы обновления генерирующих объектов в электроэнергетике (КОММод).

Электрическая мощность турбоагрегата увеличена со 100 до 110 МВт, тепловая – со 160 до 175 Гкал/ч. В ходе модернизации проведена комплексная замена основного и вспомогательного оборудования. Установлена новая паровая турбина с современными автоматизированными системами управления, генератор. Новое оборудование изготовлено отечественными предприятиями.

Модернизация оборудования станции повышает надежность энергоснабжения потребителей и обеспечивает растущие потребности в электричестве и тепле.

На востоке Москвы идет активное строительство жилья и социальных объектов, развитие транспортной инфраструктуры. На ТЭЦ также будет выполнена замена оборудования турбоагрегатов № 3 и № 7.

*ТЭЦ-23 АО «Мосэнерго» – одна из ключевых электростанций московской энергосистемы. Она обеспечивает электрической и тепловой энергией Восточный, часть Северо-Восточного и Центральный административные округа города.*



### На волгоградском заводе технического углерода начала работать ТЭЦ мощностью 18 МВт.

ТЭЦ введена в эксплуатацию в Красноармейском районе Волгограда. Она расположена на производственной площадке волгоградского филиала Омского завода технического углерода. Станция работает в базовом режиме, обеспечивая предприятие электрической энергией и производственным паром. В состав ТЭЦ входят три паротурбинные установки производства Калужского турбинного завода.

В ходе проектирования и строительства специалисты волгоградского РДУ принимали участие в согласовании проектной и рабочей документации электростанции и объектов схемы выдачи мощности объекта генерации, а также применяемых в схеме выдачи мощности решений и условий для технологического присоединения ТЭЦ к электросетям.

Бесперебойная работа турбогенераторов ТЭЦ снизит дефицит мощности и электрической энергии в энергорайоне «Волгоград Юг» энергосистемы Волгоградской области.

### КМЗ выполнил ремонт ДГУ для Петербургского метрополитена.

Кингисеппский машиностроительный завод выполнил обследование и ремонт дизель-генератора мощностью 4 МВт для нужд Петербургского метрополитена. Резервный энергоблок был изготовлен еще в 1960-х годах и до сих пор исправно функционирует.

Дизель-генератор выполнен на базе двигателя 23/2х30 производства «Русский дизель». Он имеет большую мощность, отличается высочайшим уровнем надежности. ДГУ обеспечивают работу на номинальной мощности на выходных клеммах генератора без ограничения по времени, и также с 10 %-м превышением номинальной мощности в течение двух часов, с периодом повторного нагружения через 24 часа.

Ремонт дизель-генератора включал замену охладителя воздуха. Новый охладитель был изготовлен на КМЗ и после испытания установлен на ДГУ.

Дизель-генераторы в метрополитене обеспечивают резервное электроснабжение. Также энергоблоки производства завода «Русский дизель» эксплуатируются на атомных электростанциях и других объектах с высокими требованиями к надежности энергоснабжения.



## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕВСКАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПЕРСПЕКТИВА – 2024»

ОАО «НПО ЦКТИ» на правах организатора приглашает вас принять участие в научно-технической конференции **«НЕВСКАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПЕРСПЕКТИВА – 2024»**

Мероприятие пройдет **с 11 по 13 сентября 2024 г.** на территории гостиницы «Москва» (г. Санкт-Петербург, пл. Александра Невского, 2. Конференц-залы «Летний сад» и «Белые ночи»).

В рамках проведения конференции будут организованы рабочие тематические секции, где после заслушивания докладов каждый желающий будет иметь возможность задать вопросы или высказаться по соответствующей теме.

- **Секция 1.** Теплообменное оборудование атомных и тепловых электростанций, других энергообъектов
- **Секция 2.** Паровые, газовые и гидравлические турбины
- **Секция 3.** Котельные установки
- **Секция 4.** Прочность и ресурс энергетического оборудования
- **Секция 5.** Испытания материалов и сварных конструкций, экспертиза энергетического оборудования
- **Секция 6.** Испытания и сертификация энергетического оборудования

Стоимость участия в трехдневной конференции – **25 000 рублей (в том числе НДС)**. В стоимость включены: участие в тематических секциях, раздаточный материал, кофе-брейки, обеды, торжественный ужин во второй день проведения конференции.

Гостиница «Москва», являясь давним и надежным партнером ЦКТИ, любезно предоставила для бронирования свой номерной фонд. Для участников конференции сформирован промо-код, который дает право на бронирование номеров по специальной цене.

РЕСТАВРА



**Контактное лицо  
ОАО «НПО ЦКТИ»:**

Наумова Алла Константиновна,  
раб. тел. +7(812) 578-89-47,  
моб. тел. +7(952) 365-94-12.

Всю интересующую вас информацию о конференции «Невская энергетическая перспектива – 2024» можно получить здесь:



## Обратный инжиниринг в авиационном двигателестроении: решение обратной задачи в проектировании компрессора

**А. И. Мариняк – лаборант, marinyak.ai@edu.spbstu.ru**

**Г. А. Рощенко – инженер, glebikroshenko@gmail.com**

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**

### Ключевые слова:

обратный инжиниринг, осевой компрессор, компрессоростроение, авиационное двигателестроение, РД-33, компрессор высокого давления, многоступенчатый компрессор, приведенные параметры, математическое моделирование, проточная часть

### Аннотация

Современные авиационные двигатели требуют все более высоких показателей тяги и эффективности для обеспечения их оптимальной работы. К ключевым компонентам, влияющим на эти показатели, относятся осевые компрессоры. Для модернизации их конструкции важно постоянно осваивать и внедрять новые методы расчетов, проектирования и технологии изготовления. Одним из таких методов является обратный инжиниринг, который позволяет оптимизировать процесс проектирования и значительно снижает затраты на реализацию новых конструктивных и технологических решений.

Обратный инжиниринг в проектировании авиационного компрессора представляет собой анализ существующих компонентов с целью дальнейшего улучшения его газодинамических характеристик, что включает в себя детальное

изучение геометрии, материалов и рабочих параметров компрессоров. Применение обратного инжиниринга в авиационной отрасли стало особенно актуальным в связи с необходимостью модернизации существующих моделей двигателей ранних поколений и разработкой новых, более эффективных с точки зрения технико-экономических показателей. Таким образом, использование обратного инжиниринга при проектировании авиационных компрессоров представляет собой перспективный способ повышения эффективности и надежности авиационных двигателей.

В данном исследовании рассматривается применение метода обратного инжиниринга при проектировании авиационного компрессора, а именно – решение прямой и обратной задачи при расчете компрессора высокого давления (КВД) двигателя типа РД-33.

## Reverse engineering in aircraft engine building solution of the inverse problem in compressor design

**A. I. Marinyak – Laboratory Assistant, marinyak.ai@edu.spbstu.ru**

**G. A. Roshchenko – Engineer, glebikroshenko@gmail.com**

**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**

### Key words:

reverse engineering, axial compressor, compressor manufacturing, aviation engine building, RD-33, high-pressure compressor, multistage compressor, given parameters, mathematical modeling, flow part

### Abstract

Modern aircraft engines require increasingly high thrust and efficiency to ensure their optimal performance. The key components influencing these indicators include axial compressors. To modernize their design, it is important to constantly master and implement new calculation methods, design and manufacturing technologies. One of these methods is reverse engineering, which allows you to optimize the design process and significantly reduces the cost of implementing new design and technological solutions.

Reverse engineering in the design of an aircraft compressor is an analysis of existing components in order to further improve its gas dynamic characteristics, which includes a detailed study of the geometry, materials and operating parameters of

compressors. The use of reverse engineering in the aviation industry has become especially relevant due to the need to modernize existing early-generation engine models and develop new ones that are more efficient in terms of technical and economic indicators. Thus, the use of reverse engineering in the design of aircraft compressors is a promising way to improve the efficiency and reliability of aircraft engines.

In this study, the application of the reverse engineering method in the design of an aircraft compressor is considered, namely, the solution of the direct and inverse problem in the calculation of a high-pressure compressor (KVD) of an RD-33 engine.

Компрессоры в авиационных двигателях играют ключевую роль в использовании потенциальной энергии атмосферного воздуха для получения заданных параметров по тракту газотурбинного двигателя (ГТД) с минимальными потерями и необходимого значения тяги. Развитие компрессоростроения в авиации ведет к повышению технико-экономических показателей двигателей.

Использование обратного инжиниринга в проектировании является актуальной темой не только в компрессоростроении, но и в авиационном двигателестроении в целом, так как позволяет повысить эффективность проектирования и сократить время на разработку. Этот метод позволяет получить информацию о конструкции и характеристиках компрессора, используя только его фактические параметры или результаты экспериментальных испытаний. Это особенно целесообразно, когда доступ к оригинальным расчетным проектным данным невозможен, например, при модернизации устаревших моделей компрессоров.

Целью данной работы является исследование метода обратного инжиниринга в проектировании авиационных компрессоров и оценка данного подхода в сравнении с исходным вариантом расчета.

## **Методы проектирования и понятие об обратном инжиниринге**

### ***Обзор методов проектирования компрессоров в авиационном двигателестроении***

Проектирование компрессора является одним из основных этапов в создании авиационных ГТД. Существует несколько методов проектирования, которые можно классифицировать по различным критериям:

- метод полного моделирования. В качестве прототипа выбирается уже отработанный агрегат или его отсек, и новый компрессор создается на основе теории подобия с возможным дополнением или перепрофилированием ступеней;
- метод модельных ступеней (частичное моделирование). Используются эксплуатационные данные по характеристикам отдельных ступеней с последующим учетом данных по их взаимному влиянию;
- метод расчета по данным продувок плоских решеток. Использовался долгое время при создании новых агрегатов двигателя. Базировался на экспериментальных данных продувок плоских решеток и испытаниях отдельных ступеней, поскольку провести полное моделирование течения воздуха в проточ-

ной части стало возможно только при достаточном развитии компьютерных технологий.

- проектирование на основе математического моделирования. Подобные методы в настоящее время используются при создании современных компрессоров, т. к. позволяют получать надежные отработанные агрегаты при сравнительно невысоких материальных затратах [1, 2].
- методы обратного проектирования. К ним относятся методы обратного инжиниринга, позволяющие на основе готового образца изделия или его детали восстановить параметры и конструктивные особенности образца изделия. Такие методы актуальны в тех случаях, когда отсутствует возможность провести прямое проектирование, оптимизацию или модернизацию.

### ***Обратный инжиниринг и его применение в авиателестроении***

Обратный инжиниринг — это метод исследования, позволяющий получить информацию о проектировании, конструкции и характеристиках изделия путем его анализа и обратной разработки. Этот метод широко используется в авиационном двигателестроении для анализа и улучшения производительности двигателей [3].

Применение обратного инжиниринга в авиационном двигателестроении может включать в себя следующие задачи:

- идентификация компонентов и систем двигателя и их характеристик, таких как габариты, вес, механические и термические свойства;
- анализ работы двигателя и выявление его проблем и недостатков;
- оптимизация параметров двигателя путем модификации его деталей и систем;
- создание копии существующего двигателя или его части без необходимости создавать дизайн с нуля;
- разработка новых деталей и систем для улучшения параметров двигателя. [4, 5].

## **Методология**

### ***Постановка задачи***

Проектирование современных многоступенчатых компрессоров представляет собой сложную многоплановую задачу. Для ее решения необходимо применять математические модели различного уровня. В общем случае принято выделять три вида математических моделей, используемых при проектировании: одномерные, двумерные и трехмерные. Поскольку в данной работе использовался большой объем статистических данных, целесообразно применить простей-

шую математическую модель для получения базовых характеристик, т. е. одномерную. Кроме того, в аэродинамике принципиально разделяют два типа задач: прямая задача (расчет параметров течения при известной гео-

метрии лопаток) и обратная (формирование профиля, позволяющего достичь требуемых параметров потока). В нашем случае будет решена как прямая, так и обратная задача.

### Метод расчета компрессора, используемый в данной работе

В данной работе расчеты произведены по методике [6], она охватывает все этапы расчета компрессора: выбор расчетного режима и основных параметров, расчет по параметрам на среднем радиусе, расчет характеристик и удлинений лопаток и так далее.

Расчеты будут производиться по приведенным параметрам, так как такие расчеты позволяют унифицировать результаты и сравнивать их независимо от реальных условий эксплуатации. Это позволяет более корректно и точно оценивать работу компрессоров в разных условиях и сравнивать их между собой, а также делать более обобщенные выводы об их эффективности и производительности. Кроме того, расчеты по приведенным параметрам используются при проектировании новых компрессоров.

Исходные данные, использованные для расчета, приведены в табл., параметры были получены путем расчета компрессора согласно [7].

### Выбор метода расчета и анализ его ограничений

Методика [6] расчета была выбрана из-за своей эффективности и возможности получения более точных результатов, чем с использованием традиционных методов расчета. Кроме того, методика [6] является достаточно универсальной и может быть применима в решении как прямой, так и обратной задачи.

В связи с упрощением и использованием только одномерных расчетов в данной работе существуют следующие условия:

- рассматривается только КВД;
- расчет проводится по приведенным параметрам;
- двойной спрямляющий аппарат не учитывается;
- каждая ступень компрессора рассматривается как отдельный независимый блок.

Такие условия связаны с одномерностью математической модели, результаты которой следует воспринимать как первое приближение.

### Анализ результатов и выводы

#### Результаты решения прямой и обратной задачи

Сравнительные результаты решения прямой и обратной задачи приведены в виде графиков на рис. 1–4.

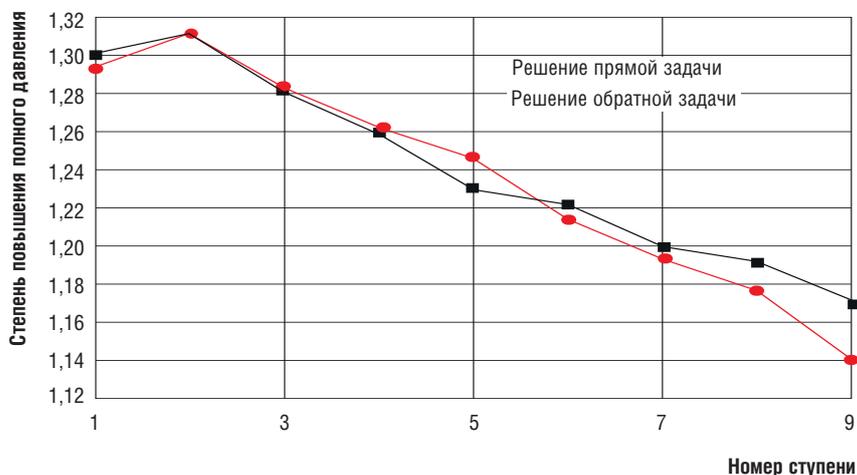


Рис. 1. График распределения  $\pi^*_{ст}$  по ступеням

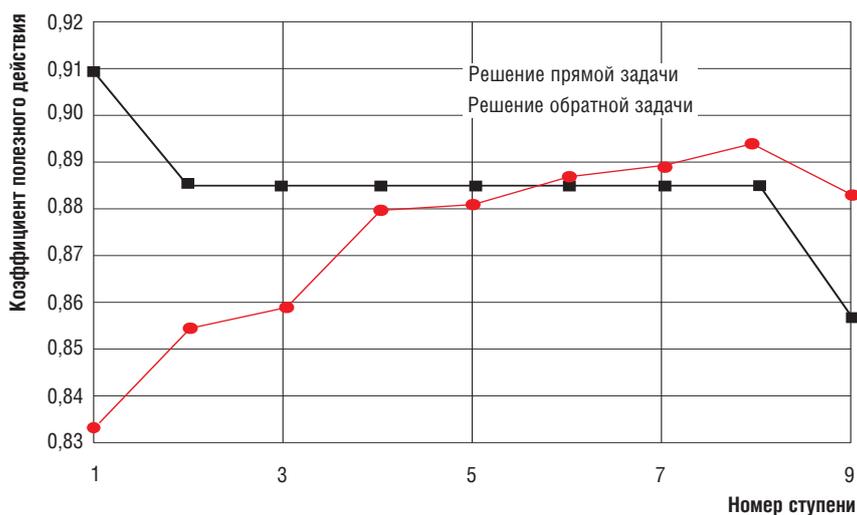


Рис. 2. График распределения КПД по ступеням

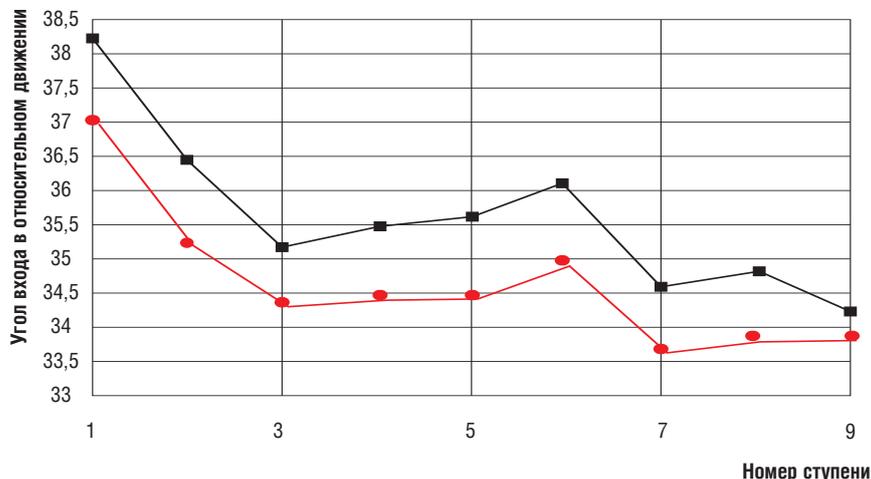


Рис. 3. График распределения углов входа потока в РК по ступеням

### Сравнительный анализ полученных данных

Анализируя полученные результаты по распределению таких параметров, как  $\pi_{ст}$  (рис. 1), можно заметить, что после уточнения путем решения обратной задачи характеристика изменилась достаточно мало (не более 5%), а характер ее изменения с увеличением ступеней не изменился вовсе.

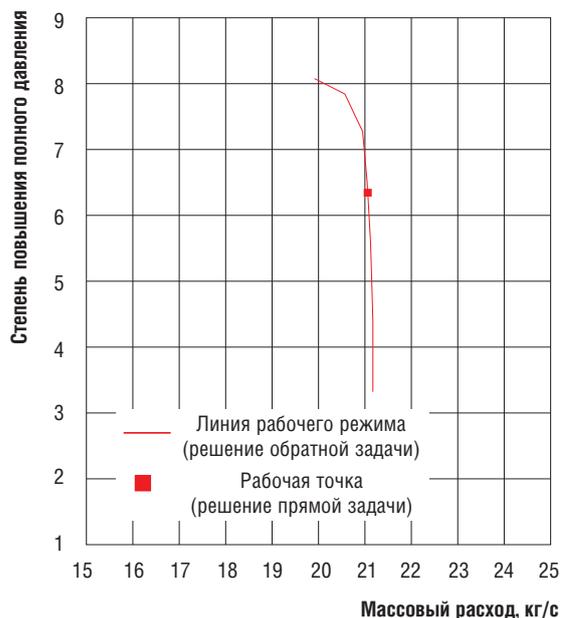
На рис. 2 видно изменение характера распределения КПД по ступеням, после решения обратной задачи эффективность стала расти с увеличением номера ступени.

На рис. 3 изменение значений углов потока после решения обратной задачи объясняется тем, что при уменьшении значения абсолютных скоростей уменьшается и величина коэффициента расхода, что и влияет на значение углов. Пример формулы, доказывающий данное суждение:

$$\cos \beta_1 = \frac{c_{1r} - c_{1n}}{c_{1a}}$$

На рис. 4 представлена общая диаграмма рабочего режима спроектированного компрессора.

Из данной характеристики видно, что по итогам произведенных расчетов рабочая точка сместилась относительно изначальных координат. Степень повышения полного давления  $\pi_{КВД}$  снизилась со значений 6,67 до 6,39 (< 5%), а приведенное значение массового расхода воздуха изменилось с 21,4 до 21,02 (1%). Кроме того, КПД полученного компрессора снизился с 0,87 до 0,83 – это можно объяснить принятыми допущениями в части упрощений расчетной модели по влиянию входа рабочего тела в КВД и выхода из него.



Параметр		Значение								
P <sub>1*</sub> , Па		101325								
T <sub>1*</sub> , К		288,15								
U <sub>прив</sub> , м/с		362								
R, Дж/моль·К		287,023								
k		1,4								
G <sub>прив</sub> , кг/с		21,4								
η <sub>к</sub>		0,877								
Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
D <sub>к1</sub> , м	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	
D <sub>к2</sub> , м	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	
D <sub>вт1</sub> , м	0,359	0,39	0,416	0,438	0,454	0,466	0,474	0,482	0,486	
D <sub>вт2</sub> , м	0,374	0,404	0,426	0,442	0,458	0,468	0,476	0,482	0,486	
β <sub>1</sub> ', °	37,18	35,41	34,17	34,42	34,58	35,05	33,61	33,8	33,25	
β <sub>2</sub> ', °	53,6	52,7	50,4	49,1	49,4	49,7	47,5	47,1	46,05	
i <sub>рк</sub> , °	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
(b/t) <sub>рк</sub>	0,9	1,1	1,4	1,3	1,25	1,25	1,2	0,97	0,9	
b <sub>рк</sub> , м	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	
η <sub>рк</sub>	3	2,7	2,12	2,3	1,84	2	1,65	1,56	1,5	
D <sub>к3</sub> , м	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	
D <sub>к4</sub> , м	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	
D <sub>вт3</sub> , м	0,374	0,404	0,426	0,442	0,458	0,468	0,476	0,482	0,486	
D <sub>вт4</sub> , м	0,39	0,416	0,438	0,454	0,466	0,474	0,482	0,486	0,486	
α <sub>3</sub> ', °	44,61	42,67	41,75	40,29	41,04	39,81	40,18	39,23	37,48	
α <sub>4</sub> ', °	69,2	65,8	64,7	63,9	62,1	62,6	62,5	58,6	120,3	
i <sub>на</sub> , °	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
(b/t) <sub>на</sub>	0,75	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,03	1	1	
b <sub>на</sub> , м	0,027	0,026	0,027	0,020	0,021	0,017	0,017	0,016	0,015	

Для оценки результатов произведенного расчета следует рассчитать запас газодинамической устойчивости работы компрессора, который обозначает меру близости расчетной точки компрессора к границе помпажа:

$$\Delta K_y = \left( \left( \frac{\pi_{к гр}^*}{\pi_{к}^*} \frac{G_{гр}}{G_{гр гр}} \right) - 1 \right) \times 100 \% = 33 \% .$$

Исходя из рис. 4 и результатов расчетов, представленных выше, данный режим работы имеет достаточные запасы устойчивости.

Табл. Расчет КВД в рабочей точке при решении прямой задачи

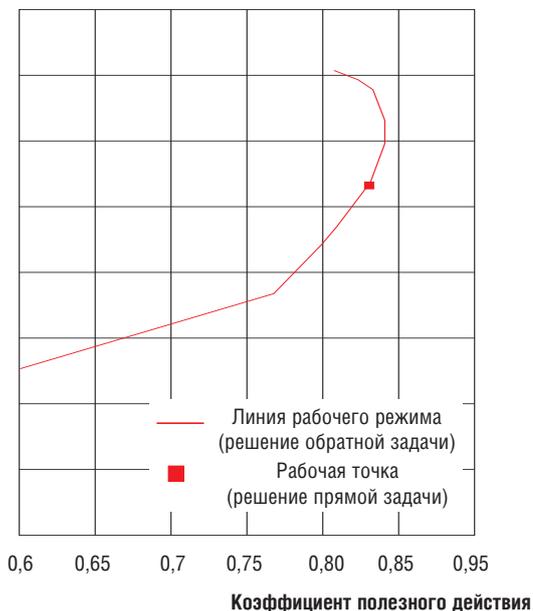


Рис. 4. Характеристика компрессора в параметрах подобия G<sub>пр</sub> и η<sub>пр</sub>

## Выводы

В ходе работы был произведен расчет КВД двигателя типа РД-33 с использованием метода обратного инжиниринга, где исходными данными являлись геометрические характеристики лопатки компрессора. Затем был произведен уточняющий расчет как геометрических, так и газодинамических параметров исследуемого КВД.

В результате проделанной работы определено, что обратный инжиниринг в сфере авиационного компрессоростроения возможно использовать как один из оптимальных методов проектирования новых и модернизации ранних поколений ГТД. Несмотря на одномерность произведенного расчета, ряд ограничений и неточностей, полученные данные достаточно близки к исходному расчету, чтобы оценивать их как достоверные, и достоверность, как правило, обеспечивается увеличением количества расчетных итераций, устраняющих неточности и ограничения. **ТД**

### Список использованных источников

1. Гасин А. Л. Теория и проектирование компрессорных агрегатов: учебное пособие / А. Л. Гасин, М. В. Лаврентьев, Ю. М. Мартиков. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 318 с.
2. Ветошкин А. Г. Теория и расчет авиационных двигателей: учебник для студентов вузов / А. Г. Ветошкин. – М.: Машиностроение, 2013. – 568 с.
3. Шинкаренко Ю. А. Методы оптимизации конструкции и технологии изготовления многоступенчатых компрессоров / Ю. А. Шинкаренко, В. И. Трухин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 364 с.
4. Смирнов А. А. Анализ методов реверс инжиниринга в промышленности / А. А. Смирнов, И. Ю. Петров. – Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2019. – Т. 4, № 2 (2). – С. 148–154.
5. Валиев Д. Ф. Применение метода реверс инжиниринга для оптимизации конструкции авиационных двигателей / Д. Ф. Валиев, Я. В. Шатунов. // Научно-технический вестник Поволжья, 2018. – № 2 (26). – С. 71–76.
6. Комиссаров Г. А. Методика газодинамического расчета осевого компрессора: технический отчет / Г. А. Комиссаров. – М.: ЦИАМ, 1961. – 132 с.
7. Галеркин Ю. Б. Расчет осевого компрессора транспортного типа: учебное пособие / Ю. Б. Галеркин, К. П. Селезнев, Л. Я. Стрижак. – СПб.: СПбГТУ, 1992. – 91 с.



## Введена ГТУ–ТЭС на базе энергоблока производства Liyu Gas Power.

Электростанция построена и введена эксплуатацию компанией «Электросистемы». ТЭС мощностью 3 МВт обеспечивает электроэнергией и теплом предприятие «Сосновсагропромтехника» в Нижегородской области – одного из крупнейших российских производителей изделий из пластика, композитных материалов, цветных металлов и резины.

Электростанция в контейнерном исполнении на базе двух ГПУ Liyu LY1600GM-T изготовлена ООО «АнГо» (входит в состав ТХ «Электросистемы»). Энергоблоки работают в параллель между собой, без экспорта электроэнергии в сеть.

Все конструкторские решения – оригинальные, разработаны конструкторским бюро ТХ «Электросистемы». Специалисты компании совместно с представителями Hunan Liyu Gas Power выполнили пусконаладочные работы и испытания энергоблоков.

## Power station was commissioned on the base of gas engine plant produced by Liyu Gas Power.

The power plant was built and put into operation by Electrosystems Technical Holding. The 3 MW thermal power plant provides electricity and heat to the Sosnovskagropromtehnika enterprise in the Nizhny Novgorod Region, one of the largest Russian manufacturers of plastic products, composite materials, non-ferrous metals and rubber. The power station of container design based on two Liyu LY1600GM-T gas engine power plants was manufactured by AnGo LLC (part of Electrosystems TH).

The power plants operate in parallel with each other, without exporting electricity to the grid.

**Лебедев А. С. «Энергетические газовые турбины в России: проекты и реальность».**

В книге д.т.н. А.С. Лебедева, имеющего многолетний опыт работы в области газотурбостроения, отражены основные этапы создания энергетических газовых турбин в РФ в период с начала 1990-х по 2020 гг.

Читатель узнает об основных этапах становления газотурбинного производства на ЛМЗ, успехах и трудностях при испытаниях ГТЭ-150 на ГРЭС-3 АО «Мосэнерго».

В условиях повышенного внимания к энергетической независимости страны особый интерес приобретает совместный с ОАО «Авиадвигатель» проект ГТЭ-180, где использованы конструкторско-технологические достижения в двигателестроении.

Для многих новой может оказаться информация об освоении производства и пусконаладке самой популярной в России энергетической газовой турбины ГТЭ-160, выпускавшейся 10 лет в АО «Силловые машины» по лицензии «Сименс». Наиболее подробно описан подход к созданию ГТУ среднего класса мощности – ГТЭ-65, которая могла бы стать моделью семейства установок мощностью 200 МВт и более. Отдельная глава посвящена созданию в 2011 г. компаниями «Сименс» АГ и «Силловые машины» совместного предприятия для производства газовых турбин мощностью более 60 МВт.

Есть в книге и узкопрофессиональный раздел для специалистов в области разработки систем охлаждения турбинных лопаток.

Автор старается ретроспективно проанализировать не только достижения в освоении производства энергетических газовых турбин, но и причины, которые не позволили в свое время довести до серийного выпуска опытные образцы и завершить перспективные проекты отечественных энергетических ГТУ.

Сейчас этот опыт представляет практический интерес для тех, кто вовлечен в процесс создания ГТУ нового поколения у нас в стране.



**Начались огневые испытания камеры сгорания газовой турбины ГТЭ-65.**

Цель испытаний – подтверждение расчетных параметров работы камеры сгорания и проверка ее розжига во всем диапазоне режимов эксплуатации. Исследования проходят в Центре огневых испытаний камер сгорания газовых турбин, построенном АО «Силловые машины». Исследовательский комплекс позволяет проводить испытания и доводку низкоэмиссионных камер сгорания на всех режимах. Комплекс оборудован компрессорами, обеспечивающими давление воздуха, подогревателями воздуха до температуры 430 °С, дожимной компрессорной и насосной станциями.

ГТЭ-65 имеет широкие перспективы на энергетическом рынке. Газотурбинная установка среднего класса мощности предназначена для работы в составе ГТЭС простого или комбинированного цикла. Она может применяться в составе парогазовых установок как в моноблоке с индивидуальной паровой турбиной, так и в дубли-блоке с общей, на две ГТУ, паровой турбиной.

Камера сгорания, сконструированная с использованием современных численных методов проектирования, имеет низкий уровень выбросов, обеспечивает устойчивую и эффективную работу в требуемом диапазоне режимов.

Технические решения позволяют применять при производстве ГТЭ-65 отечественные материалы и комплектующие. Планируемый срок готовности головного образца ГТЭ-65 – конец 2024 года.

Создание производства газовых турбин реализуется при поддержке Минпромторга России. Общий объем инвестиций АО «Силловые машины» в проект составляет 25,2 млрд рублей, из них 6,8 млрд на НИОКР просубсидированы государством.

Компания оснащает свои производственные мощности для выпуска отечественного энергетического оборудования. Объем инвестпрограммы АО «Силловые машины» в 2024 г. превышает 16,4 млрд рублей, что на 67 % больше уровня 2023 г.

**Fire tests of the combustion chamber of the GTE-65 gas turbine have begun.**

*The purpose of the tests is to confirm the design parameters of the combustion chamber and check its ignition in the entire range of operating modes. The research takes place at the Center for Fire tests of combustion chambers of gas turbines, built by Power Machines JSC. The research complex allows testing and fine-tuning of low-emission combustion chambers in all modes.*



## AKSA Enerji построит новую электростанцию в Кашкадарьинской области Узбекистана.

В соответствии с инвестиционным соглашением между правительством Узбекистана и AKSA Enerji, турецкая компания инвестирует более \$250 млн в строительство газопоршневой электростанции мощностью 400 МВт в Нишанском районе Кашкадарьинской области на условиях государственно-частного партнерства. ГПЭС создается на базе энергоблоков 20V34SG производства Wartsila Finland Oy.

AKSA Enerji выполнит проектирование, финансирование, строительство, а также будет эксплуатировать электростанцию в течение всего периода реализации проекта – 25 лет. Строительные работы на площадке начались в декабре 2023 года.

Ввод газопоршневой электростанции в промышленную эксплуатацию запланирован на конец 2024 года. АО «Национальные электрические сети Узбекистана» будет выкупать электроэнергию у турецкого инвестора в течение 25 лет.

## На заводе «Уралтурбо» начал работать горизонтально-фрезерный обрабатывающий центр.

В рамках реализации инвестиционной программы на предприятии введен в эксплуатацию современный высокопроизводительный горизонтально-фрезерный обрабатывающий центр с цифровым программным управлением – НМС-800.

На новом станке осуществляется обработка, а также контроль изготовления деталей сложного профиля без использования дополнительного оборудования. Его преимуществами являются высокая скорость проведения операций, высокая производительность, точность при обработке деталей.

Оборудование предназначено для изготовления рабочих лопаток с елочным хвостовиком последних ступеней турбин Т-250/300-240 и К-300-240. Кроме того, на станке можно изготавливать диски рабочих ступеней турбин ГТН-16 и ГТН-25/76.



## Невский завод изготовил и поставил оборудование для Адлерской ТЭС.

На предприятии завершено изготовление электроприводной дожимной компрессорной установки (ЭДКУ) топливного газа для Адлерской ТЭС (ПАО «ОГК-2»). ЭДКУ номинальной мощностью привода 2 МВт обеспечит сжатие природного газа низкого давления до 3 МПа для штатной работы топливной системы газотурбинных установок АЕ64.3А в составе ПГУ-180Т. Компрессорная установка предназначена для резервирования компрессорной станции ТЭС.

ДКС собственной разработки – одно из перспективных направлений работы Невского завода. ЭДКУ позволит заменить аналогичные агрегаты иностранного производства, задействованные в топливных системах парогазовых установок, обеспечивая надежную работу энергетического оборудования.

## Введена ГПЭС для текстильной фабрики в Ивановской области.

Станция создана на базе двух газопоршневых установок контейнерного исполнения TCG 2020 V16 электрической мощностью по 1560 кВт, тепловой – по 1600 кВт. Агрегаты собраны на базе двигателей производства MWM.

Проектные и пусконаладочные работы, ввод станции в эксплуатацию выполнили специалисты компании «Ролт Инжиниринг».

Производство собственной электроэнергии и тепла позволит предприятию значительно снизить себестоимость выпускаемой продукции, расширить ее ассортимент.

Текстильная фабрика «Галтекс» находится в п. Старая Вичуга Ивановской области и выпускает продукцию, начиная от собственного ткачества, отделки, крашения и набивки тканей до пошива готовых изделий. Основным направлением является производство тканей из хлопка.

## Начато строительство электростанции комбинированного цикла в п. Киянлы в Туркменистане.

Компания Calik Enerji подписала контракт с ГК «Туркменэнерго» на строительство парогазовой электростанции мощностью 1574 МВт в п. Киянлы Туркменбашинского района Балканской области. В ее состав войдут два энергоблока на базе газотурбинных установок 9F.04 мощностью по 288 МВт и паровой турбины D12 производства GE Vernova.

Ввод электростанции в коммерческую эксплуатацию запланирован на 2027 год. Она обеспечит возможность поставлять электроэнергию в Турцию через третьи страны. Фундамент для ПГУ заложен в конце 2023 года.

Для реализации проекта компания Calik Enerji получила гарантии от Commerzbank AG и швейцарского экспортно-кредитного агентства для строительства электростанции. Commerzbank предоставляет компании Calik Enerji средства на сумму \$586 млн.

В Туркменистане сегодня работают 12 электростанций общей мощностью 6943 МВт, в состав которых входит 51 турбоагрегат: 39 газотурбинных и 12 – паротурбинных.

## На заводе по производству дизельного топлива в г. Кашкадарье введены ДГУ.

В рамках контракта компания Aksa ввела на предприятии по производству синтетического дизтоплива Uzbekistan GTL два энергоблока AD825 мощностью по 600 кВт. Они спроектированы на базе четырехтактных дизельных двигателей Hyundai DP222LC с водяным охлаждением, турбонаддувом и промежуточным охлаждением.

Энергоблоки оснащены панелями управления DSE 7320. Они используются для контроля сетевого питания и обеспечивают автоматический запуск или останов энергоблоков. На панели появляются сигналы об ошибке при высоких или низких значениях частоты вращения, напряжении аккумулятора, перегрузке по току, понижении или повышении напряжения генератора, низком давлении масла, высокой температуре двигателя, аварийной остановке.

Установки прошли комплексные испытания: работа при полной нагрузке, включая проверку всех функций управления и аварийного отключения.

Казанское  
моторостроительное  
производственное  
объединение

# НАДЕЖНЫЕ ГТЭУ ОТ ПРОИЗВОДИТЕЛЯ

## ГАЗОТУРБИННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

**мощностью 12–18 МВт**

- ИНДИВИДУАЛЬНОЕ проектирование
- КОМПЛЕКСНАЯ ПОСТАВКА оборудования «под ключ»
- ШЕФМОНТАЖ И ПУСКОНАЛАДКА оборудования
- ГАРАНТИЙНОЕ И ПОСТГАРАНТИЙНОЕ техническое обслуживание







**АО «КМПО»**  
 Телефон: +7 843 570-81-04  
 E-mail: kmpo@oao.kmpo.ru  
<http://www.kmpo.ru>

РЕКЛАМА

## Исследование влияния эжекции струйного насоса на истечение свободной струи

**М. А. Бирюлин** – младший научный сотрудник, [BiriulinMA@mpei.ru](mailto:BiriulinMA@mpei.ru)

**А. В. Волков, д.т.н.** – профессор, [VolkovAV@mpei.ru](mailto:VolkovAV@mpei.ru)

**К. Е. Денисов** – младший научный сотрудник, [DenisovKY@mpei.ru](mailto:DenisovKY@mpei.ru)

**А. К. Лямасов, к.т.н.** – доцент, [LiamasovAK@mpei.ru](mailto:LiamasovAK@mpei.ru)

**Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт» (МЭИ)**

### Ключевые слова:

ГЭС,  
ГАЭС,  
регулирование,  
струйный насос,  
эжекция,  
ковшовая  
гидротурбина

### Аннотация

В представленном материале рассматривается возможность использования струйного насоса (СН) в качестве элемента направляющего аппарата ковшовой гидротурбины с целью улучшения показателей качеств ков. Задача исследования - определить влияние СН на режим работы гидротурбины и его эффективность при различных вариантах установки. В статье представлено описание принципа работы СН в гидравлической системе водовода ГЭС и содержание натурального эксперимента. Проведение эксперимента обусловлено необходимостью установить характер свободной струи на выходе из струйного насоса, что, в свою очередь определяет возможность инсталляции струйного насоса на месте сопла направляющего аппарата

ковшовой гидро-турбины. Эксперимент предусматривал изменение площади выходного сечения СН с целью имитации различного положения иглы сопла направляющего аппарата. Визуальная оценка истечения струи из выхода струйного насоса в атмосферу и сравнение со струей из цилиндрического насадка позволяет полагать о возможности использования СН в качестве органа регулирования активных гидротурбин, поскольку он не оказывает существенного влияния на внешний вид и длину струи. Таким образом, данная статья представляет собой один из этапов исследования возможности использования СН в качестве регулирующего элемента ковшовых гидротурбин и открывает перспективы для дальнейших исследований в этой области.

## Investigation of the effect of jet pump ejection on the outflow of a free jet

**M. A. Biryulin** – Junior Research Assistant, [BiriulinMA@mpei.ru](mailto:BiriulinMA@mpei.ru)

**A. V. Volkov, Doctor of Engineering Science** – Professor, [VolkovAV@mpei.ru](mailto:VolkovAV@mpei.ru)

**K. E. Denisov** – Junior Research Assistant, [DenisovKY@mpei.ru](mailto:DenisovKY@mpei.ru)

**A. K. Liamasov, PhD in Engineering** – Associate Professor, [LiamasovAK@mpei.ru](mailto:LiamasovAK@mpei.ru)  
**National Research University MPEI**

### Key words:

HPP,  
PSPP,  
regulation,  
jet pump,  
ejection,  
Pelton turbine

### Abstract

This paper examines the potential use of a jet pump (JP) as a component of the guide apparatus of a Pelton hydroturbine to improve the quality parameters of Pelton hydroturbines. The objective of the research is to determine the impact of the JP on the operating mode of the hydroturbine and its efficiency under various installation options. The article presents a description of the JP's operating principle within the hydraulic system of the HPP's water conduit and details a field experiment. The experiment was conducted to establish the nature of the free jet at the outlet of the jet pump, which in turn determines the feasibility of installing the jet pump in place of the nozzle of

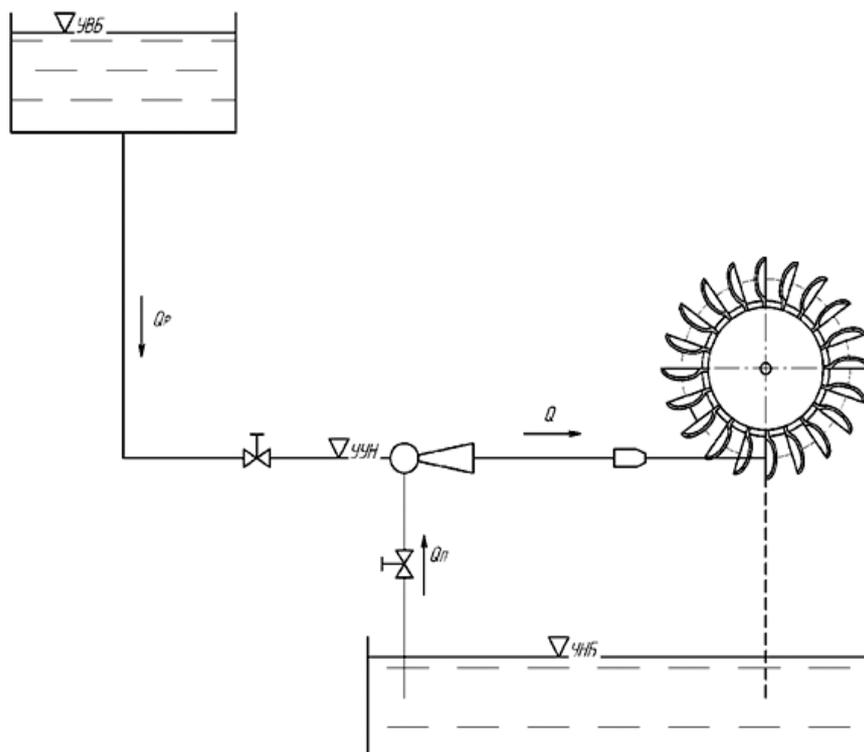
the guide apparatus of the Pelton hydroturbine. The experiment involved changing the outlet cross-sectional area of the JP to simulate different positions of the guide apparatus nozzle needle. A visual assessment of the jet from the jet pump outlet into the atmosphere and its comparison with a jet from a cylindrical nozzle suggests the potential use of the JP as a regulating element for active hydroturbines, as it does not significantly affect the appearance and length of the jet. Thus, this paper represents one stage in the investigation of the feasibility of using the JP as a regulating element for Pelton hydroturbines and opens up prospects for further research in this area.

В условиях, когда требуется обеспечить срабатывание высокого напора и низкого расхода, наиболее приемлемым решением становится использование ковшовых гидротурбин. Это подтверждается исследованиями в данной области, а также множеством реализованных проектов от ведущих мировых производителей гидротурбинного оборудования [1, 2]. При этом увеличение единичной мощности агрегатов ГЭС/ГАЭС приводит к повышению эффективности работы и рентабельности таких энергетических объектов. В свою очередь, рост значений параметров станций в совокупности с традиционным их использованием в процессе суточного графика нагрузки энергосистемы налагает особые требования к обеспечению регулирования.

Основной и практически единственный используемый на практике способ регулирования ковшовых турбин – это применение направляющего аппарата с регулирующей иглой, которая управляется системой, включающей в себя сервомотор, а также подвижные элементы передачи усилия, размещаемые в корпусе сопла [3]. В результате осевого перемещения иглы становится возможным изменение проходного сечения сопла, что влияет на его гидравлические характеристики, а значит, и на параметры струи, падающей на ковши рабочего колеса. Важной особенностью в данном случае является воздействие на высоконапорный поток, а также необходимость в ограничении скорости переходных процессов (скорости перемещения иглы) для предотвращения возникновения гидроударов в подводящем трубопроводе.

Предлагается новый метод регулирования ковшевых гидротурбин, основанный на изменении расхода через сопло путем эжекции жидкости, уже отработавшей на рабочем колесе, с помощью струйного насоса. Возможная схема его включения в систему водотока ГЭС/ГАЭС показана на рис. 1.

Активный поток обеспечивается напором станции, пассивный поток забирается из нижнего бассейна после рабочего колеса гидротурбины, а смешанный поток подается к соплу. При этом известно, что изменять выходные параметры струйного насоса можно с помощью как активного, так и пассивного потока. Таким образом, рассматриваемый метод регулирования может повысить показатели надежности в связи с внедрением дополнительных возможностей смены режима гидравлическим устройством на низком давлении (регулирующим клапаном на пассивном потоке). Также при совместном применении струйного насоса



и регулирующей иглы в значительной степени снимаются риски возникновения гидроудара, поскольку рост давления в линии нагнетания может быть скомпенсирован гидравлической линией пассивного потока.

Исходя из изложенного можно предполагать, что включение струйного насоса в систему приводит к увеличению расхода и должно способствовать увеличению мощности. Однако струйный насос является сопротивлением и формирует дополнительный расход путем преобразования части напора, а значит, приводит к снижению приведенной энергии, что должно способствовать соответствующему уменьшению мощности. Таким образом, для данного способа регулирования важно провести расчет геометрических параметров струйного насоса для обеспечения оптимального, с точки зрения эффективности и диапазона изменения мощности, режима гидротурбины.

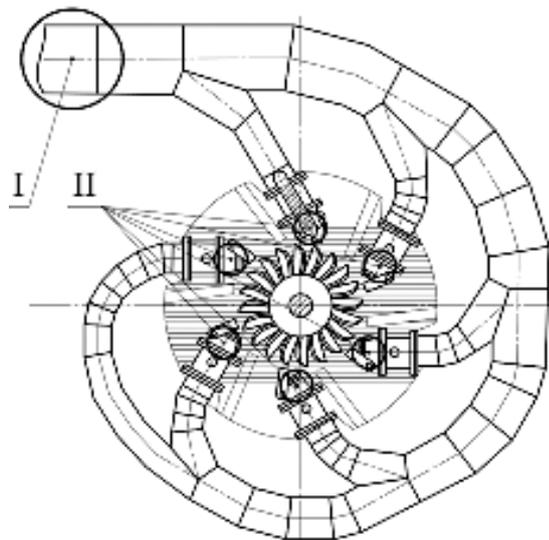
В рамках исследования данного способа регулирования режима работы ковшовой гидротурбины, схема которой представлена на рис. 2, необходимо определить возможность использования струйного насоса в качестве элемента направляющего аппарата (НА). Предполагается внедрение струйного насоса в одно из двух мест: до разветвления потока в направляющем аппарате I и непосредственно в его сопле II.

В случае размещения струйного насоса в начальной части НА (позиция I, рис. 2) необходимо установить только одно из устройств, однако в случае установки в области сопла (позиция II, рис. 2) возможно

**Рис. 1.**  
Схема последовательного включения струйного насоса в водовод ГЭС.  
УНБ – уровень нижнего бассейна;  
УУН – уровень установки насоса;  
Q<sub>р</sub> – рабочий поток;  
Q – расход через турбину;  
Q<sub>п</sub> – пассивный поток

Рис. 2.

Места предполагаемой установки струйного насоса в направляющий аппарат ковшовой гидротурбины



совмещение конструкции эжектора с регулирующей иглой.

При этом использование струйного насоса в сопле НА определяется (позиция II, рис. 2), в первую очередь, его способностью формировать на выходе из насадка однородную, ровную струю. В связи с тем что СН традиционно используется в закрытых гидросистемах, неизвестны его свойства формирования однородной структуры струи на выходе.

Для определения этого факта можно использовать как CFD расчеты, так и проведение простого натурального эксперимента.

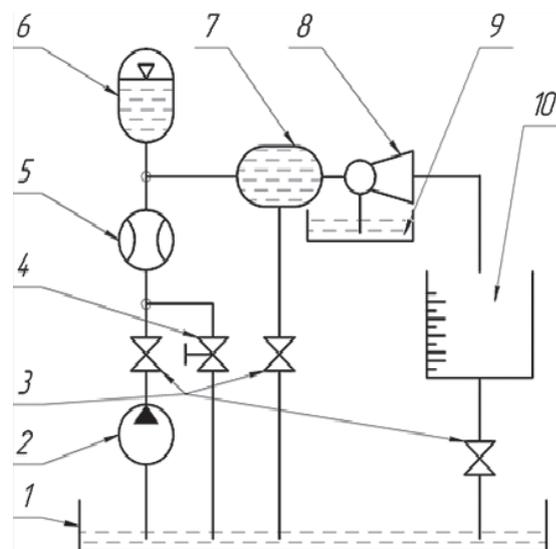
### Методы и материалы

Для проведения натурального эксперимента использовался гидравлический стенд, принципиальная схема которого дана на рис. 3. Стенд устроен следующим образом: из основного бака (1) отбирается жидкость центробежным насосом (2) и нагнетается через накопительный бак (7) к струйному насосу (8). Измерение расхода основного потока проводится с помощью расходомера (5).

Рис. 3.

Гидравлическая схема испытательного стенда:

- 1) бак основной;
- 2) насос центробежный;
- 3) кран нерегулируемый;
- 4) задвижка регулируемая;
- 5) расходомер механический;
- 6) пневматический гидроаккумулятор;
- 7) бак накопительный;
- 8) струйный насос;
- 9) бак отбора пассивного потока;
- 10) бак мерный



водится с помощью объемного расходомера (5). Постоянное давление перед струйным насосом обеспечивается пневматическим гидроаккумулятором (6). За счет энергии потока, нагнетаемого центробежным насосом, происходит эжекция пассивного расхода из бака (9), в результате чего смешанная жидкость с основным потоком поступает в мерный бак (10) для измерения общего расхода с помощью электронного секундомера. Расход основного потока изменяется с помощью регулируемой задвижки (4), установленной в байпасе. Краны (3) предназначены для перекрытия трубопроводов при необходимости.

Конструкция струйного насоса была выбрана с центральным круглым соплом, основные геометрические размеры получены по методикам, изложенным в работах [4, 5]. Расчет геометрии СН производился на безразмерные параметры  $q=0,3$  и  $h=0,5$  в связи с тем, что на предыдущих этапах исследования было определено, что данное сочетание параметров является оптимальным с точки зрения энергоэффективности.

После получения основных геометрических параметров была спроектирована твердотельная модель струйного насоса, готовая для установки на гидравлический стенд. Чертеж модели в разрезе представлен на рис. 4.

Для визуальной оценки струи на выходе струйного насоса был также подготовлен опытный образец цилиндрического насадка для подключения его вместо СН и последующего сравнения двух струй. Длина и диаметр выходного канала цилиндрического насадка такие же, как и струйного насоса. При проведении эксперимента, с целью оптимизации анализа его результатов, расход через цилиндрический насадок поддерживался равным суммарному расходу  $Q_3$ , который наблюдался у СН.

Для определения безразмерных параметров струйного насоса  $q$  и  $h$  суммарный расход  $Q_3$  замерялся с помощью мерного бака и электронного секундомера, а расход основного потока  $Q_1$  измерялся объемным расходомером. Также в конструкции СН были предусмотрены места подключения патрубков для измерения статического давления до и после смешения основного  $Q_1$  и пассивного  $Q_2$  потоков. Таким образом, в результате эксперимента было установлено, что безразмерные параметры насоса равны  $q=0,27$  и  $h=0,54$ , что вполне соответствует проектным параметрам.

На рис. 5 дано фотоизображение процесса работы струйного насоса в установившемся состоянии при постоянном расходе потока на выходе, а на рис. 6 при тех же условиях



Рис. 4.  
Истечение через струйный насос

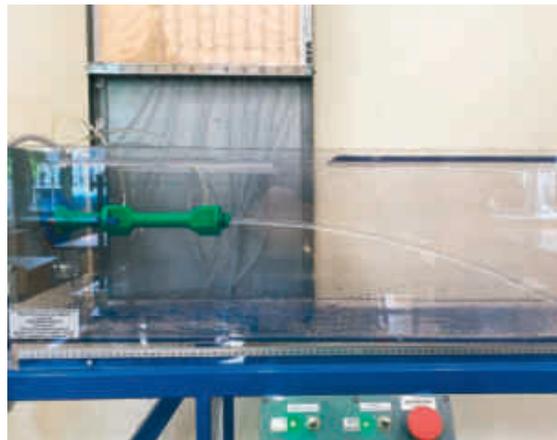


Рис. 5.  
Истечение через цилиндрический насадок

изображено истечение через цилиндрический насадок.

В качестве дополнительного эксперимента на выходе струйного насоса, а также в качестве насадка было установлено сопло диаметром 3 мм. Конфузорный участок является дополнительным сопротивлением, но способствует увеличению скорости потока в случае постоянного давления перед ним. В результате для соплового насадка зафиксировано увеличение длины струи на рассматриваемом расходе, а для струйного насоса – значительное уменьшение ввиду формирования обратного течения через гидравлическую линию пассивного потока.

Таким образом, для рассматриваемого способа регулирования можно констатировать, что при расчете параметров струйного насоса в рамках стандартных методик необходимо учитывать дополнительное сопротивление. Однако поставленный эксперимент косвенно подтверждает возможность сброса давления через гидравлическую линию пассивного потока при гидравлическом ударе.

## Выводы

Применение струйного насоса в системе регулирования ковшовой гидротурбины может повысить надежность ее направляющего аппарата, а также за счет использования отработанного потока в нижнем бьефе ГАЭС увеличить время ее работы.

Из анализа рис. 4–6 видно, что струйный насос практически не влияет на характер традиционно используемой струи, ее длину и структуру – это определяет возможность его использования на месте сопла направляющего аппарата (позиция II на рис. 2).

Однако стоит отметить, что в перспективе целесообразно проводить дополнительные расчетные исследования для формирования методики расчета геометрических параметров струйного насоса, внедряемого в систему регулирования, чтобы обеспечить оптималь-

ные параметры работы гидротурбины и избежать вероятности изменения рабочих параметров и эффективности струйного насоса, обусловленных гидравлическими сопротивлениями после него. **Д**

### Список использованных источников.

1. Voith GmbH & Co. KGaA. [Электрон. ресурс]: Каталог / Pelton turbines – электрон. журн. – Heidenheim, 2021. – 8 с. – URL: [https://voith.com/corp\\_de/VH\\_Pelton\\_21\\_vvk\\_VH3371\\_en.pdf](https://voith.com/corp_de/VH_Pelton_21_vvk_VH3371_en.pdf).

2. Valais Wallis Promotion. Usine de Bieudron [Электрон. ресурс]. – URL: <https://www.valais.ch/fr/activites/excursions/visites-d-entreprises/usine-de-bieudron>.

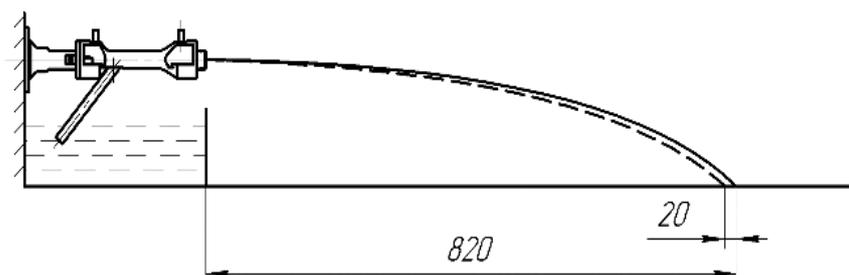
3. Патент № 2490393 С1 Российская Федерация, МПК E02B 9/00, E21D 9/02. Гидроаккумулирующая электростанция с подземным расположением Нижнего бассейна и комбинированный способ проходки Нижнего бассейна: № 2011151084/13; заявл. 15.12.2011; опубл. 20.08.2013 / А. В. Жалнин, Е. Н. Тиден, А. А. Бородулин; заявитель Открытое акционерное общество «Федеральная гидрогенерирующая компания» (ОАО «РусГидро»). – EDN ZGTN1L.

4. Соколов Е. Ям Зингер Н.М. С 59 Струйные аппараты. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 35

5. Лямаев Б. Ф. Л97 Гидроструйные насосы и установки. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. – 256 с.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 23-29-00322, <https://rscf.ru/project/23-29-00322/>).

Рис. 6.  
Размеры свободной струи при истечении через цилиндрический насадок (сплошная линия) и через струйный насос (пунктирная линия)



## Совершенствование жизненного цикла паротурбинного оборудования

**Д. С. Кшесинский – генеральный директор, [dskshesinsky@kbrys.ru](mailto:dskshesinsky@kbrys.ru)**  
**А. Ю. Култышев, д.т.н. – главный конструктор, [aykultyshev@kbrys.ru](mailto:aykultyshev@kbrys.ru)**  
**АО «Конструкторское бюро «Рысь»»**

### Ключевые слова:

паровая турбина,  
паротурбинная  
установка,  
жизненный цикл  
изделия,  
стадии ЖЦИ,  
цифровая  
трансформация,  
повышение  
эффективности ЖЦ

### Аннотация

Совершенствование инструментов, средств и методик, позволяющих оптимизировать жизненный цикл основного и вспомогательно-го паротурбинного оборудования, является исключительно важной задачей.

Необходимо формировать системный и комплексный подход к решению многочисленных задач, возникающих на всех этапах жизненного цикла оборудования, преимущественно на первых этапах конструкторско-технологической подготовки производства, что является самым эффективным и менее затратным. Дополнительно следует анализировать возможности и усиливать извлекаемый технико-экономический эффект от внедрения и совершенствования конструкции оборудования и на следующих этапах жизненного цикла, начиная от производства и эксплуатации

до обслуживания и ремонта. Это позволяет добиваться большего эффекта, чем реализация на данных этапах таких мероприятий, как совершенствование режимов работы, программ технического обслуживания, технологий ремонта и т.д.

В статье показано, что решение задач автоматизации работы оборудования может решаться на разных уровнях и с различной долей автономности (узла, системы, оборудования, комплекса и паротурбинной установки), когда она рассматривается с учетом влияния на ее параметры и режимы работы смежного оборудования, например, котельного, генераторного или других комплексов основного и вспомогательного оборудования исследуемого энергоблока [1-5].

## Improving the life cycle of steam turbine equipment

**D. S. Kshesinsky – General Director, [dskshesinsky@kbrys.ru](mailto:dskshesinsky@kbrys.ru)**  
**A. Yu. Kultyshev, Doctor of Engineering Science – Chief Designer, [aykultyshev@kbrys.ru](mailto:aykultyshev@kbrys.ru)**  
**Rys Design Bureau JSC**

### Key words:

steam turbine,  
steam turbine plant,  
product life cycle,  
life cycle stages,  
digital transformation  
life cycle efficiency  
improving

### Abstract

The improvement of tools, tools and techniques to optimize the life cycle of the main and auxiliary steam turbine equipment is an extremely important task.

It is necessary to form a systematic and integrated approach to solving numerous problems that arise at all stages of the equipment life cycle, mainly at the first stages of design and technological preparation of production, which is the most efficient and less costly. Additionally, it is necessary to analyze the possibilities and enhance the recoverable technical and economic effect from the introduction and improvement of equipment design and at the next stages of the life cycle, starting from production and operation to maintenance and

repair. This makes it possible to achieve a greater effect than the implementation of measures such as improving operating modes, maintenance programs, repair technologies, etc. at these stages.

The article shows that the solution of equipment automation problems can be solved at different levels and with a different degree of autonomy (unit, system, equipment, complex and steam turbine plant) when it is considered taking into account the influence on its parameters and operating modes of adjacent equipment, for example, boiler, generator or other complexes of main and auxiliary equipment the power unit under study, repair technologies, etc [1-5].

Типовой жизненный цикл изделия (ЖЦИ) промышленного предприятия с выделением последовательности в соответствии со стандартом ИСО серии 9000 представлен на рис. 1. Применительно к промышленной продукции, в том числе к энергетическому оборудованию, можно использовать стандартное представление ЖЦИ по ИСО серии 9000, которое в соответствии с типовыми этапами представлено на рис. 1.

На каждой стадии жизненного цикла оборудование сопровождается трудовыми, временными, финансовыми и материальными затратами, а также определенной информацией с конкретными идентифицирующими наименованиями, условными обозначениями, кодами и номерами, позволяющими обеспечивать разработку, производство и сопровождение в эксплуатации и сервисе с необходимым качеством.

В табл. представлены стадии ЖЦ промышленной продукции и соответствующие объекты идентификации, необходимые для их реализации, включая необходимые ресурсы и документацию.

Каждая стадия жизненного цикла оборудования сопровождается бизнес-процессами предприятий – участников стадий, которые требуют совершенствования. Паротурбинное оборудование не только не является исключением, но и с учетом наукоемкости совершенствование позволяет добиться наибольшего роста экономической эффективности ЖЦ. Она может быть выражена как в прямых затратах на осуществление всего жизненного цикла, так и в опосредованных характеристиках, таких как время на выполнение различных операций (технологичность), или в характеристиках эффективности и производительности оборудования.

Сокращение всех видов затрат в рамках повышения эффективности можно проводить на каждой стадии жизненного цикла изделия, однако внедрение улучшений на более ранних этапах приводит к наибольшему эффекту и возникновению «принципа домино», т.е. воздействие, заложенное на этапе КТПП, дает эффект на всем протяжении ЖЦ, а в наукоемком турбинном оборудовании, создание которого зависит от глубоко проработанных научно-технических решений, позволяющих снизить все виды затрат на этапах монтажа, пусконаладки, эксплуатации и обслуживания, такое «явление» максимально выражено.

Нужно тщательно прорабатывать такие задачи, возвращая решения на максимально начальные этапы жизненного цикла в ходе реализации



Рис. 1. Типовой жизненный цикл продукции

проекта с разных стадий, соответствующих этапам. При этом важно возвращаться к реконструкциям, модернизациям на реализованных проектах и модификациям оборудования для новых проектов по опыту монтажа, пуско-наладки, эксплуатации и обслуживания.

Необходимо максимально использовать потенциал сокращения затрат, совершенствуя подходы, принципы, средства и инструменты описанного переноса задач различных этапов ЖЦ. Для этого требуется обязательное выполнение следующих процессов:

- уточнение конструкции оборудования по итогам технологической подготовки производства или собственно производства;
- уточнение конструкции и переработка изделия по итогам строительно-монтажных или пусконаладочных работ на стенде или объекте;

Табл. Стадии ЖЦ промышленной продукции и их реализация

Стадия ЖЦИ	Объекты и документы
Маркетинг	Наименования и основные технические характеристики аналогов. Техническое задание
Проектирование и разработка	Составные части, покупные изделия и материалы. Конструкторские документы
Закупки/снабжение	Покупные изделия и материалы. Документы по материально-техническому снабжению
Подготовка производства	Оборудование, инструмент, средства контроля. Технологические документы
Производство	Материалы, инструмент, приспособления
Контрольные испытания	Средства контроля, методы испытаний, реальные характеристики, документ о качестве продукции
Упаковка и хранение	Потребительская и транспортная упаковка. Характеристики транспортирования и хранения
Поставка/реализация	Финансовые и товаросопроводительные документы
Монтаж и эксплуатация	Приспособления, оборудование, инструменты. Требования к монтажу и эксплуатации
Обслуживание и ремонт	Материалы, запасные части. Ремонтная и эксплуатационная документация
Утилизация	Приспособления, инструменты, расходные материалы. Документы по утилизации

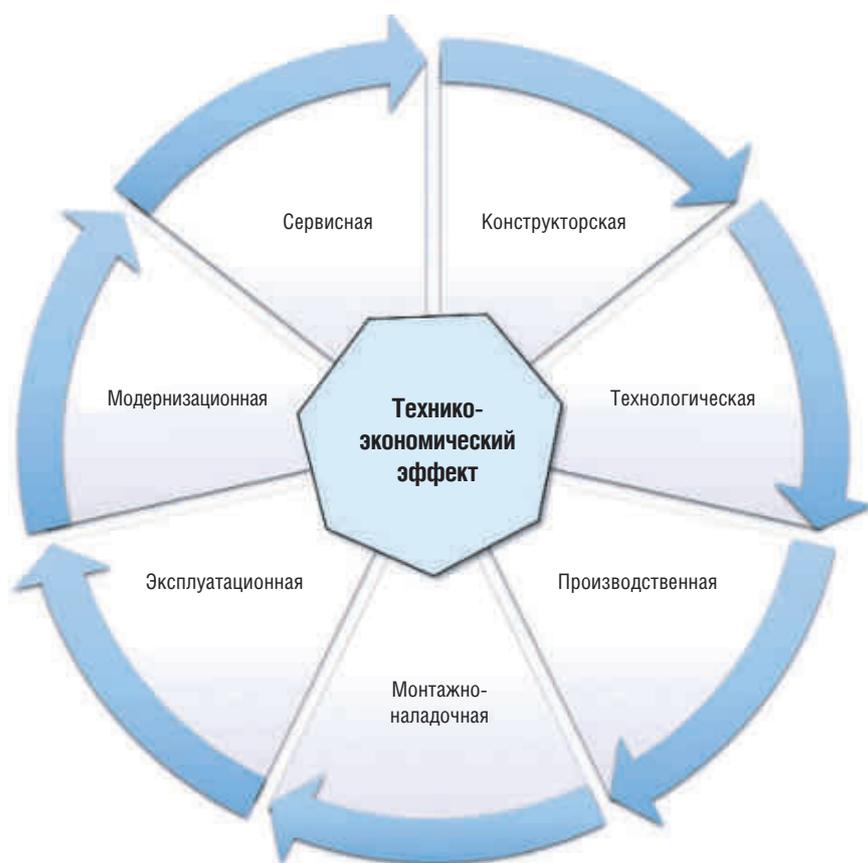


Рис. 2.  
**Диаграмма**  
**технико-экономического**  
**эффекта от внедрения**  
**модульной концепции создания**  
**турбинного оборудования:**  
**деление на группы**

- модернизация оборудования или реконструкция объекта с учетом опыта эксплуатации или обслуживания данного оборудования;
- модернизация оборудования или реконструкция объекта с получением нового положительного опыта эксплуатации или обслуживания этого или другого оборудования, в том числе конкурирующего предприятия;
- систематизация и обобщение результатов всех перечисленных процессов.

Исключительно важно совершенствовать инструменты, средства и методики, позволяющие увеличивать жизненный цикл основного и вспомогательного паротурбинного оборудования. Это является системным и комплексным подходом к решению многочисленных возникающих задач на всех этапах ЖЦ, преимущественно на первых этапах КТПП, что, как было обозначено и аргументировано выше, позволяет достигать большей эффективности и снижать прямые затраты.

Дополнительно следует анализировать потенциал и усилить извлекаемый технико-экономический эффект от внедрения улучшений и совершенствования конструкции оборудования на следующих этапах жизненного цикла: от производства, эксплуатации до сервиса и ремонта. Это позволяет добиваться

большого эффекта, чем реализация мероприятий на этих этапах ЖЦ, связанных, например, с совершенствованием режимов работы, программ обслуживания, технологий ремонта и т.д.

Задачи по внедрению технических решений и анализу получаемого эффекта целесообразно разделить на группы в соответствии с этапами жизненного цикла турбинного оборудования (рис. 2).

Практически все нововведения относятся или к конкретной группе, или находятся «на стыке» смежных групп (конструкторско-технологическая, технолого-производственная и т.д.), обозначенных на рис. 2. Эта взаимосвязь показывает именно такую правильность, четкость и обоснованность разделения и последовательности групп ЖЦ паротурбинного оборудования. Еще раз подчеркнем, что именно решения, находящиеся на стыке групп/этапов жизненного цикла изделия, дают значительный эффект от внедрения, который распространяется на максимальное количество этапов ЖЦИ. При этом чем к более раннему этапу жизненного цикла изделия относится внедренное решение, тем больший эффект в течение всего ЖЦ достигается, что можно сравнить с цепной реакцией. Таким образом, именно внедрение «ноу-хау» конструкторско-технологической группы закладывает максимальные эффекты: от надежности до экономики. И это объяснимо, так как именно конструктор или конструктор вместе с технологом прорабатывают потенциальное влияние внедряемых решений на весь жизненный цикл что еще больше справедливо для наукоемкого турбинного оборудования, создание которого зависит от глубоко проработанных научно-технических решений.

Дополнительно необходимо отметить «обратное явление», которое показывает, что любые технические решения, относящиеся к последующим группам, которые выявлены и реализованы уже только на этих стадиях жизненного цикла изделия, дают, как правило, значительно увеличенный эффект, если проблема/решение учитывается в конструкции турбинного оборудования, то есть при новой разработке или более глубокой модернизации. Такое «обратное явление» очередной раз доказывает чрезвычайную важность обратной связи для участников ранних этапов ЖЦИ, в первую очередь для конструктора, имеющего возможность решить выявленную проблему с максимальным эффектом.

В этой статье мы делаем акцент на важности реализации решений в этапах ЖЦ, следующих после разработки конструкторской документации.

Итак, ключевые тезисы по мероприятиям технологической и производственной групп.

Исследования показывают, что решения, находящиеся на стыке групп/этапов жизненного цикла изделия, дают значительный эффект от внедрения, и он распространяется на максимальное количество этапов ЖЦИ, поэтому целесообразно решать технологические и производственные задачи в связке, реализуя и проверяя их в производстве, и наоборот – вводить быстрые корректировки на всех подэтапах ТПП по итогам изготовления детали, сборочной единицы, то есть должна быть реализована системная работа технологов-разработчиков и технологов производственных технологических бюро.

Для эффективной работы технологов в связке с конструкторами и производством следует всесторонне использовать визуализацию в электронном виде в специализированном приложении, позволяющем просматривать конструкторскую и технологическую документацию в производственных подразделениях на информационных терминалах и мобильных устройствах.

Производственные подразделения наравне с конструкторскими и технологическими всегда должны иметь доступ к актуальной цифровой конструкторской и технологической документации, что исключает производство по устаревшей документации, сокращаются сроки подготовки к выполнению операций за счет отсутствия поиска и подбора бумажной документации, а также дополнительные трудозатраты, связанные с подготовкой и использованием такой документации. При этом

высокий уровень интерактивности технологических процессов с 3D-моделями позволяет эффективно получать всю необходимую для работы информацию.

Для достижения максимального результата на производстве с комплексным использованием результатов КТПП оптимальным является внедрение практически одновременно проектов перехода к подлиннику конструкторской документации в формате цифрового макета изделия (ЦМИ) и к цифровой технологической документации на базе аннотированных 3D-моделей. При этом уже проверено опытом и обозначено выше, что грамотный процесс трансформации предприятия не требует единовременной цифровизации всех служб предприятия, а может быть выстроен планомерно, в зависимости от объема номенклатуры узлов, запускаемых в производство на основе ЦМИ;

Помимо цифровой трансформации производственной цепочки, надо отметить важность учета основных положений и подходов к внедрению концепции модульного создания паротурбинного оборудования как неотъемлемого направления развития жизненного цикла. Максимальный эффект от внедрения модульной конструкции оборудования будет достигаться только в том случае, если вся цепочка ЖЦ будет использовать преимущества модульности. Поэтому необходимо идти к цели изменения информационного окружения производственного и обслуживающего персонала – сотрудник взамен большого объема печатной документации получает интегрированную информацию из различных

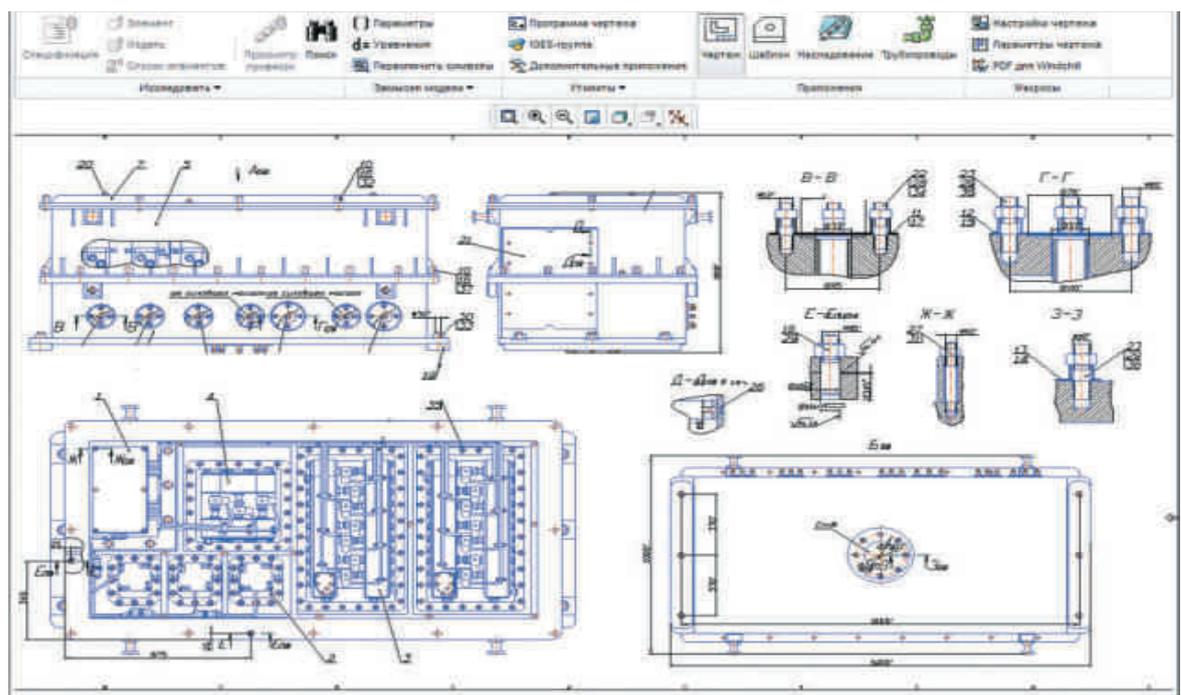


Рис. 3. Пример ассоциативного чертежа и 3D-модели «Блока управления и защиты» (чертеж)

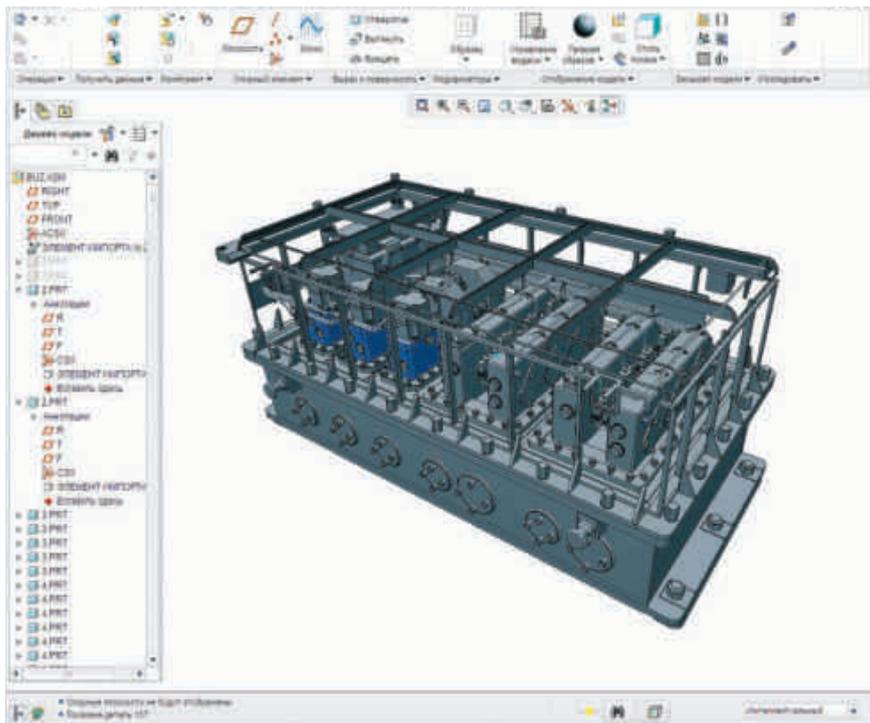


Рис. 3.  
Пример ассоциативного  
чертежа и 3D-модели  
«Блока управления и защиты»  
(твердотельная модель)

систем с конструкторско-технологической информацией на основе аннотированных 3D-моделей (рис. 3).

Весь комплекс вопросов по сборке оборудования, монтажу и пусконаладке на объекте, безусловно, упрощается при развитии сопровождения жизненного цикла за счет внедрения модульной конструкции и оптимизации конструкции и функциональности стандартных библиотечных модулей с учетом постоянного стремления повышать показатели конструктивности и технологичности, а главное – концепция позволяет разрабатывать, использовать и совершенствовать типовые инструкции по монтажу и пусконаладке. Выявлено, что существует важное направление развития эксплуатации турбинного оборудования, которое недостаточно изучено и не имеет широкого применения в паротурбинном оборудовании, так как в основном все работы направлены на мониторинг и диагностику с целью повышения надежности эксплуатации. Поэтому именно в этой области имеется значительный потенциал получения абсолютного экономического эффекта – расчетное и экспериментальное определение максимальных технико-экономических показателей основного и вспомогательного оборудования при возможной совместной и автономной работе на переменных режимах с разработкой алгоритмов работы с автоматическим или полуавтоматическим поддержанием показателей на установленном оптимальном уровне.

Необходимо отметить, что решение задач автоматической режимной оптимизации работы оборудования может решаться на различных

уровнях и с различной долей автономности, например:

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

Разработка таких решений выполняется на этапе КТПП, внедрение – на этапе монтажа и пусконаладки, уточнение – по итогам опытно-промышленной эксплуатации, то есть «обратной связи».

## Вывод

Показана важность анализа возможностей и усиления извлекаемого технико-экономического эффекта от внедрения и совершенствования конструкции оборудования на следующих после КТПП этапах ЖЦ [1-5].

### Список используемых источников

1. Паровые турбины в составе паросиловых и парогазовых установок: учеб. пособие / А.С. Алешина [и др.]; под ред. д.т.н. А.Ю. Култышева, к.т.н. И.Ю. Кляйнрока. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 463 с.
2. Култышев А.Ю. Научное обоснование, разработка и реализация модульного принципа создания паровых турбин: дис. ... доктора технических наук: 2.4.5 и 2.4.7 / А.Ю. Култышев. – Екатеринбург, Санкт-Петербург, 2023. – 435 с.
3. 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.
4. Култышев А.Ю. Научное обоснование и разработка модульного принципа создания паротурбинной установки / А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2023. – № 1 (106). – С. 42–49.
5. Култышев А.Ю. Парогазовые установки и особенности паровых турбин для ПГУ: учебное пособие / А.Ю. Култышев, В.Н. Голошумова, А.С. Алешина. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 163 с.



### Mitsubishi Power поставит оборудование для строительства ПГУ в Гонконге.

Mitsubishi Power заключила контракт с Hongkong Electric Co. на поставку основного энергетического оборудования для строительства парогазового энергоблока № 13 электростанции Lamta. Мощность ПГУ составит 380 МВт, ввод в эксплуатацию запланирован на 2029 год. Ранее Mitsubishi Power поставила аналогичное оборудование для энергоблоков №№ 9, 10, 11 и 12. Электростанция расположена на острове Ламта.

В рамках контракта Mitsubishi Power изготовит и поставит газовую турбину M701F, конденсационную паровую турбину, котел-утилизатор и систему селективного каталитического подавления выбросов (SCR).

*Электрогенератор изготовит Mitsubishi Generator Co. – новая компания со штаб-квартирой в округе Хего, г. Кобе. Компания была образована 1 апреля 2024 года в результате объединения предприятий МНИ и Mitsubishi Electric Corporation.*

### Введена ГПЭС для теплоснабжающей компании в Свердловской области.

Производственно-инжиниринговая компания «ТехКрейт» изготовила, смонтировала и провела пусконаладку газопоршневой установки ТК-1500К электрической мощностью 1500 кВт.

Серийная электростанция контейнерного исполнения создана на базе двигателей 820.62-300 производства КАМАЗ. Топливом является природный газ. Режим работы ГПЭС – параллельный. Тепловая энергия используется для производственных нужд теплоснабжающей компании.

Агрегат оснащен цифровой системой управления на базе контроллера ComAr, которая в автоматическом режиме распределяет и регулирует нагрузку, обеспечивает автономность, безопасность, контроль параметров электростанции.

### Парогазовая установка увеличит мощность Жезказганской ТЭЦ в Казахстане.

ТОО «Казахмых Энерджи» и администрация Жезказганской области подписали соглашение о строительстве парогазовой установки мощностью 100 МВт на площадке Жезказганской ТЭЦ.

Основной партнер проекта – Sinohydro Corporation Ltd (Power China). Подготовку проектной документации осуществляет компания Sinohydro корпорации Серсо. Станцию планируется ввести в эксплуатацию в 2026 году.

Парогазовая установка мощностью 104 МВт будет состоять из двух блоков. Она обеспечит энергией Жезказганский энергоузел, поможет решить проблему с недостатком тепла в городе Жезказган.

Ввод новой станции положительно скажется на экологической ситуации в регионе, так как в качестве топлива будет использоваться природный газ. Общая стоимость проекта составляет порядка 80 миллиардов тенге.

### Компания Itekno увеличила мощность ГПУ–ТЭС в Ташкенте.

В Узбекистане активно развивается рынок децентрализованного производства энергии. По договору с АО «Тепловые электрические станции» (отвечает за производство и поставку электроэнергии компаниям и населению Узбекистана) Itekno ведет строительство ГПУ–ТЭС в 8 районах Ташкента – Чилансарском, Мирза-Улугбекском, Джаккасараджском, Сергелийском, Алмасорском, Яшнабадском, Учтепинском и Янгихаджатском.

В апреле 2024 года компания ввела в эксплуатацию электростанцию в Чилансарском районе. ТЭС создана на базе двух газопоршневых энергоблоков TCG 3020 V20. В ноябре 2023 г. на станции введены два аналогичных агрегата.

Тепловая энергия используется для получения горячей воды для системы центрального отопления района. Потребности в горячем водоснабжении и отоплении весной и осенью полностью удовлетворяются за счет котлов-утилизаторов. Пиковые котлы работают в зимний период.



## II конференция по проблемам сохранения ресурса и повышению надежности работы ГТУ

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

Конференция, проходившая в начале июня на площадке ОАО «НПО «ЦКТИ», была посвящена повышению эффективности подготовки воздуха на входе в газотурбинный двигатель и смазывающих жидкостей ГТД, снижению эксплуатационных издержек, повышению надежности систем ГТД и энергоблока в целом. Организаторами выступили НПО «ЦКТИ», ООО «ЕМВ Фильтртехник Рус», ООО «Фильтрационная техническая компания», ООО «С-Техникс».

### In brief

*II Conference on  
the problems of service life  
extension and improving  
the reliability  
of gas turbine plants*

*The conference, held at the  
beginning of June at the  
site of NPO CCTI, was  
devoted to improving the  
efficiency of air treatment  
at the inlet of gas turbine  
engine and gas turbines  
lubricating fluids, reducing  
operating costs, improving  
the reliability of gas tur-  
bines systems and the  
power plants as a whole.  
The organizers were NPO  
CCTI, EMW Filtrertechnik  
rus LLC. Filtration  
Technical Company LLC,  
S-Technics LLC.  
The General Director  
of the NPO CCTI  
V.E. Mikhailov addressed  
the participants with  
a welcoming speech.  
He noted the importance  
of the event, which  
received a positive  
response from specialists  
and became an annual  
event.*

С приветственным словом к участникам обратился генеральный директор НПО «ЦКТИ» В.Е. Михайлов (рис. 1). Он отметил важность проводимого мероприятия, получившего положительный отклик у специалистов и ставшего ежегодным. Распространение передового опыта в энергетике, а также организация непосредственного общения производителей, поставщиков услуг и эксплуатантов энергетического оборудования – очень нужное мероприятие.

О влиянии системы фильтрации воздуха на эксплуатационные и ремонтные издержки ГТУ рассказал участникам К.И. Леликов, коммерческий директор ООО «ЕМВ Фильтртехник Рус» (рис. 2). Компания многие годы внедряет на российском рынке передовые технологии подготовки циклового воздуха ГТУ, выполняет проектные и инженеринговые работы, ведет активную исследовательскую деятельность. Докладчик рассмотрел типичные проблемы при работе ГТ, среди которых появляющиеся в турбине дефекты

составляют более половины от общего числа возникающих во время эксплуатации проблем.

Отложения на лопатках ГТД ухудшают их охлаждение и приводят к перегреву и разрушению термобарьерного покрытия. Срок службы лопаток снижается, объем необходимых ремонтов увеличивается, следовательно, растут ремонтные издержки. Снижается производительность и мощность газовой турбины, увеличивается расход топлива. К основным появляющимся дефектам относится прогар направляющей лопатки первой ступени, износ и сколы ТБП, высокотемпературная коррозия.

Компания «ЕМВ Фильтртехник Рус» выполняет индивидуальное ТЭО проекта, внедряет передовые решения, позволяющие снизить деградацию технических и экономических характеристик ГТУ в процессе эксплуатации. Применение решений «ЕМВ» обосновано экономией для заказчика в долгосрочной перспективе. В ходе ТЭО анализируется влияние параметров входного воздуха на работу ГТУ в зависимости от уровня влажности, запыленности и иных условий окружающей среды, выполняются технико-экономические расчеты и анализ ТЭП ГТУ, разрабатывается индивидуальное решение с учетом проведенной оценки.

Докладчик отметил, что применение модернизированной системы фильтрации (ФТО Е10) снижает количество наиболее проникающих в проточную часть ГТУ частиц размером 0,3...0,5 мкм в 40 раз по сравнению с системой, использующей фильтры F8. В эксплуатации на ТЭЦ отклонение мощности ГТУ SGT5-4000F при использовании штатной системы фильтрации (G4+F8) достигало



Рис. 1.  
В.Е. Михайлов, д.т.н., профессор,  
генеральный директор ОАО «НПО ЦКТИ»



порядка 12 МВт. При использовании системы фильтрации повышенного класса очистки (G2+M6+E11) деградация мощности составила менее 1,5 МВт. Проведенное исследование проточной части продемонстрировало, что загрязнение ВНА отсутствует.

Результаты внедрения новой системы очистки воздуха на Курской ТЭЦ СЗР компании «Квадра» за два года следующие:

- увеличение ресурса работы фильтров тонкой очистки вдвое;
- исключение загрязнения проточной части ГТУ;
- сокращение затрат на проведение off-line промывок в 4 раза;
- увеличение производства электроэнергии на 15109 МВт·ч в 2020 г. и на 5299 МВт·ч в 2021-м.;
- уменьшение удельного расхода топлива на 3,42 г у.т./МВт·ч;
- суммарный экономический эффект по оценкам технического персонала – 38 млн рублей; экономического блока – 43 млн рублей.

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

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

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

Современный взгляд на фильтрацию масла представил коммерческий директор ООО «ФТК» С.С. Долгополов (рис. 3). Основной идеей доклада была взаимосвязь чистоты масла и ресурса оборудования, способы создания условий эксплуатации, прибли-



Рис. 2.  
К. И. Леликов,  
коммерческий директор  
ООО «ЕМВ Фильтртехник Рус».

женных к идеальным. Докладчик рассмотрел основные причины загрязнения масла: твердые частицы, вода/влаги, шлам и смоляные/лаковые отложения, а также их влияние на работу оборудования. Показаны методы диагностики загрязнений.

Также в докладе был затронут вопрос о необходимости фильтрации частиц менее 4 мкм. Фильтрационная компания представила установки микрофильтрации масла, основанные на способности спрессованной целлюлозы к адсорбции. Их использование существенно снижает затраты в условиях роста цен на масла и комплектующие гидравлических систем. Предлагается компактное оборудование для фильтрации масла и сервис под ключ с диагностикой состояния масла и компонентов гидросистемы. В перечень предлагаемых решений входят фильтрующие элемен-



Рис. 3.  
С. С. Долгополов, коммерческий  
директор ООО «ФТК»

ты, картриджи, патроны, мешки, мембраны, самопромывные фильтры, магниты, корпуса, диагностическое оборудование для фильтрации и т.д.

Статистику отказов проанализировал в своем докладе руководитель отдела продаж ООО «ФТК» А.Ю. Дербенев. В 80 % случаев причиной отказов гидроцилиндров является рабочая жидкость. Для подшипниковых опор и зубчатых передач этот показатель составляет 60 %. Внедрение современных систем фильтрации позволяет снизить затраты на смазочные материалы – на 57 %; на подшипники и шарико-винтовые передачи – на 38 %; на ремонт гидрооборудования – на 76 %.

Разработка программы «Управление смазыванием» на предприятии включает два основных этапа:

- внедрение технологии смазывания оборудования и повышения квалификации персонала, технический аудит, преобразование функции ТОиР, эффективное маслохозяйство, предупреждение потенциального отказа;
- контроль состояния и обеспечение максимального ресурса смазочного материала, внедрение эффективных стратегий технического обслуживания, удержание рабочих жидкостей в зоне оптимального ресурса.

В заключение докладчик еще раз отметил, что управление смазыванием так важно потому, что это управление надежностью оборудования в целом.

Об интерпретации анализов турбинных масел для ГТУ рассказал И.А. Степанков, руководитель направления «Энергетика» компании «С-Техникс» (рис. 4). Главными задачами мониторинга турбинного масла являются выявление неисправностей системы смазки; предотвращение незапланированных остано-



Рис. 4.  
И. А. Степанков, руководитель  
направления «Энергетика»,  
ООО «С-Техникс»

вов; увеличение срока службы оборудования. Все это способствует повышению надежности и эффективности ГТУ.

Докладчик подробно остановился на действующих в данной области стандартах в мире, рассказал на примере спецификации масел производителя ГТУ – компании Siemens. Было подробно рассмотрено влияние на масло продуктов износа, вредных примесей, воды. Отдельно уделено внимание лакообразованию на парах трения, регулярно проводению испытания проб масел, находящихся в работе, также ряду важных для правильной эксплуатации оборудования вопросов.

Совместный с компанией «Таиф-СМ» сервис включает: анализ масла в аккредитованной лаборатории; отправку образцов от заказчика до АЛ; предоставление протокола испытаний и аналитический отчет (интерпретация результатов с рекомендациями). В результате выполняемых работ повышается надежность работы оборудования за счет обнаружения и предотвращения возможных отказов, сокращаются незапланированные простои.

О производстве отечественных турбинных масел для ГТУ рассказал руководитель отдела технической поддержки продаж ООО «Таиф-СМ» Р.И. Кисляков. Докладчик познакомил с информацией о доле иностранных ГТУ и о требованиях их производителей к смазочным материалам.

Завод смазочных материалов «Таиф-СМ» – первый и единственный производитель полиальфаолефинов (ПАО) в России. На предприятии осуществляется собственная разработка рецептур смазочных материалов, контроль качества на всех этапах производства, техническая поддержка (контроль качества в период эксплуатации). Налажена тесная связь с производителями оборудования.

Серия турбинных масел TAIF Rave PAO производится предприятием «Таиф-Смазочные материалы» на основе отечественных синтетических базовых компонентов. Завод находится в г. Нижнекамске. Современное оборудование завода позволяет производить базовые масла и смазочные материалы на основе ПАО в промышленных объемах.

О повышении эффективности работы генерирующего оборудования на рынке ОРЭМ рассказал В.И. Быличкин, управляющий директор ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз» (рис. 5).

Работа энергетической ГТУ существенно зависит от параметров наружного воздуха, таких как давление, влагосодержание и температура. Изменение температуры наружного

воздуха наиболее влияет на работу ГТУ: при снижении температуры увеличивается плотность воздуха, массовый расход воздуха через компрессор, электрическая мощность ГТУ и электрический КПД. В зависимости от ряда факторов располагаемая мощность может быть значительно ниже, чем установленная, в результате снижается прибыль от работы электростанции на ОРЭМ.

Относительно простое решение, позволяющее снизить потери и не требующее кардинальных конструктивных изменений, – разместить во входном канале воздухозаборного устройства охладитель. Широкое распространение в мировой практике получила система охлаждения испарительного типа. Вода стекает по пористому материалу, воздух, проходя через материал, охлаждается и насыщается влагой. Величина снижения температуры циклового воздуха в результате работы охладительной установки зависит от температуры мокрого термометра. Чем ниже относительная влажность и чем выше температура окружающего воздуха, тем более глубокое охлаждение воздуха сможет обеспечить охладительная установка.

Монтаж модулей системы охлаждения возможен в существующие конструкции КВОУ (при наличии места). В случае отсутствия места для монтажа модулей испарительной установки предусматривается расширение КВОУ с помощью металлоконструкций из черной стали (каркасов). Глубина каркаса 800 мм. Каркасы присоединяются к существующей конструкции КВОУ с помощью болтовых соединений и устанавливаются на опорную раму.

Модуль испарительного охладителя изготовлен из нержавеющей стали с системой водораспределения и поддоном для сбора воды. В модуль устанавливается смачиваемый испарительный материал шириной 300 мм и каплеуловитель шириной 125 мм. Глубина модуля 575 мм.

Охладители устанавливаются внутри КВОУ на каждом ее ярусе на всю ширину воздухозабора. Длина и высота модуля выбираются с учетом фактических габаритов КВОУ. При проектировании КВОУ рекомендуется предусмотреть место под установку модулей из нержавеющей стали, площадку обслуживания перед модулем и после него. Необходимо также учесть дополнительную нагрузку на опорную раму КВОУ от системы охлаждения (масса определяется индивидуально), а также точки подключения КИП для системы охлаждения.

Докладчик привел примеры успешной эксплуатации систем охлаждения испарительно-



Рис. 5.  
В. И. Быличкин,  
управляющий директор,  
ООО «Пауэр Инжиниринг  
Технолджиз»

го типа в составе парогазовых установок в России, рассказал об устройстве применяемого оборудования и системах. Например, температура входного воздуха при включении испарительной установки с 23 °С охлаждается до 11 °С. При этом максимальный прирост мощности турбины ГТЭ-160 достигал 11 МВт.

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

Был показан эффект от внедрения установки – он рассчитан с помощью разработанной математической модели. Суммарный годовой эффект от внедрения испарительной установки на ГТУ мощностью 173 МВт, расположенной в центральной части России, составил около 23 млн рублей. Докладчик особо отметил: мнение о том, что применение данных установок актуально только для стран с жарким климатом, – неверно. Необходимо детально анализировать каждый объект для принятия решения о внедрении данной системы. Компания «Пауэр Инжиниринг Технолджиз» готова это сделать для эксплуатантов на базе разработанных моделей и имеющегося опыта.

Доклад «Разработка, проектирование, изготовление оборудования электромеханические приводы, электросиловые приводы» представил заместитель генерального директора по развитию ООО «СЗД Инжиниринг» Р.С. Щербина. Электромеханические приводы (ЭМП) предназначены для управления

исполнительными органами, входящими в электронную часть системы регулирования и защиты (ЭЧСРиЗ) паровой турбины (гидротурбин, газовых турбин). Применяются при частичной замене ЭГП сервомоторов исполнительных органов. Поставляются комплектно со шкафами управления ЭМП и/или ПТК электронной части системы регулирования (ЭЧСР).

В ходе частичной замены электрогидравлических приводов (ЭГП) паровых турбин в России модернизировано более 500 энергоблоков. Преимуществами электромеханических приводов разработки и производства компании «СЗД Инжиниринг» являются:

- высокая степень локализации производства, независимость от санкций;
- модульность (редуктор, механическая передача, серводвигатель);
- повышенная ремонтпригодность;
- унификация ЭМП, сокращение базы ЗИП.

Электросиловые приводы (ЭСП) предназначены для управления исполнительными органами, входящими в ЭЧСРиЗ паровой турбины (гидротурбин, газовых турбин), и применяются при полной замене электрогидравлических приводов сервомоторов исполнительных органов ЭЧСРиЗ. Поставляются комплектно со шкафами управления ЭСП и/или ПТК ЭЧСР. Замена ЭГП на ЭСП позволяет отказаться от закупки дорогостоящей огнестойкой жидкости, снизить металлоемкость энергоблока, повысить эффективность управления турбиной, а также ремонтпригодность энергоблока.

На конференции (рис. 6) прозвучали доклады о важности повышения качества эксплуатации и ремонта ГТУ, систем электростанций. Обсуждались также сложности, возникающие в случаях отказа ряда иностранных производителей выполнять свои обязательства перед заказчиками. **TD**

Рис. 6.  
Участники конференции, ЦКТИ



## Запущена вторая очередь Акмолинской ВЭС.

Вторая очередь ветростанции мощностью 56 МВт компании «Казахстан Энерджи Инвестмент» подключена к сети и введена в промышленную эксплуатацию. В настоящее время общая мощность Акмолинской ветроэлектростанции достигла 206 МВт.

Вторая очередь включает два подпроекта: Софиевская ВЭС мощностью 39 МВт и Аркалыкская ВЭС – 17 МВт. Станция прижимает к первой очереди («Борей» 100 МВт и «Энерго Трест» 50 МВт) и расположена в Акмолинской области на севере Казахстана.

ВЭС обеспечивает регион чистой электроэнергией в годовом объеме примерно 215 млн кВт·ч, что позволит сэкономить 70,8 тыс. тонн угля, снизить выбросы углекислого газа на 174,6 тыс. т, диоксида серы на 1330,11 т, оксидов азота на 450,52 т.



## Wartsila подписала договор с Rio Amazonas Energia.

Соглашение регулирует вопросы эксплуатации и технического обслуживания электростанции Cristiano Rocha в Манаусе, Бразилия.

В соответствии с новым договором, электростанцию переведут на 100 % природный газ. На электростанции Cristiano Rocha работают пять двухтопливных энергоблоков Wartsila 50SG суммарной мощностью 92 МВт. Способность двигателей Wartsila к быстрому запуску и остановке позволяет достичь полной мощности за несколько минут. По договору с Eletronorte электростанция Cristiano Rocha поставит 65 МВт электроэнергии в национальную сеть.



**АО «Невский завод» осваивает производство вспомогательного оборудования ГТУ Т32.**

В рамках реализации программы освоения производства вспомогательного оборудования ГТУ Т32 предприятие будет применять измеритель крутящего момента отечественного производства.

Измеритель крутящего момента – один из важных узлов в системе автоматического управления газоперекачивающего агрегата, который предназначен для прямого и непрерывного измерения крутящего момента на валу газотурбинного двигателя. Крутящий момент является ключевым показателем для подтверждения эффективности работы агрегата, диагностики состояния его состояния, а также показателем качества выполнения капитальных и средних ремонтов турбины.

На испытательном стенде АО «НЗЛ» проведены испытания измерителя крутящего момента в составе двигателя Т32, которые подтвердили его работоспособность и надежность. Применение данного оборудования в составе газотурбинной установки было одобрено профильным департаментом ПАО «Газпром».

В настоящее время решается вопрос об установке измерителя российского производства на действующий ГПА одной из компрессорных станций ПАО «Газпром» для проведения эксплуатационных теплотехнических испытаний с целью подтверждения его характеристик в рабочем диапазоне нагрузок.

***Nevsky plant masters the production of auxiliary equipment GTU T32.***

*As part of the localization program for the auxiliary equipment of the GTU T32 gas turbine unit, the Nevsky Plant has agreed to use a torque meter of domestic production.*

*The torque meter is one of the most important components in the automatic control system of the gas pumping unit, which is designed for direct and continuous measurement of torque on the shaft of a gas turbine engine.*

**Rolls-Royce разрабатывает водородный двигатель для производства электроэнергии.**

Rolls-Royce Power Systems в консорциуме 6 компаний и НИИ ведет разработку высокоэффективного водородного двигателя внутреннего сгорания, который будет использоваться в энергоблоках когенерационного цикла. В рамках проекта PHOENIX (Performance Hydrogen Engine for Industrial and X), финансируемого правительством Германии, консорциум работает над созданием двигателя на водороде с такими же показателями мощности и КПД, как и у энергоблоков, работающих на природном газе.

Участниками проекта являются: Rolls-Royce, Институт мобильных силовых установок Мюнхенского технического университета, концерн MANHE, Fuchs Lubricants Germany, Немецкий федеральный институт исследований и испытаний материалов и Robert Bosch. В течение трех лет планируется разработать технологическую концепцию для создания полномасштабного прототипа двигателя. Участники проекта разрабатывают необходимые компоненты для водородного двигателя внутреннего сгорания: система впрыска, поршневую группу, систему зажигания, а также новые типы смазочных материалов.

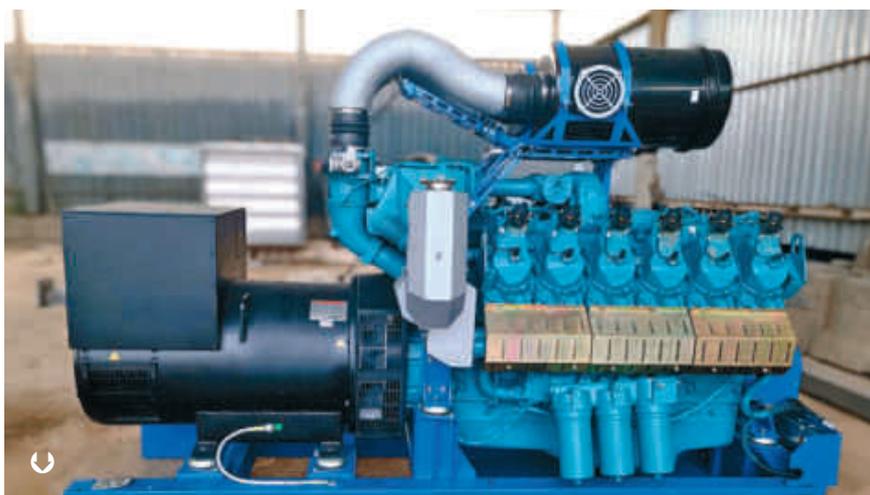
Базовым двигателем выбран mtu Series 4000. Планируемая мощность водородного двигателя – 2,5 МВт. При использовании чистого водорода энергоблок сможет работать без выбросов углерода. Проект финансируется министерством экономики и защиты климата Германии на общую сумму 5 млн евро.

Ранее компания Rolls-Royce уже разработала газовый двигатель внутреннего сгорания mtu, который может работать на топливной смеси с содержанием водорода до 25 %. В рамках проекта PHOENIX планируется разработать технологии для еще более эффективного водородного двигателя следующего поколения.

Водород – один из альтернативных видов топлива, который компания использует для повышения экологичности своей линейки двигателей. Она расширяет модельный ряд двигателей mtu, способных работать на таких видах топлива, например гидроочищенное растительное масло, синтетическое топливо, активно изучает возможности использования метанола.

В рамках стратегии развития электроэнергетики, включающей расширение использования ВИЭ, правительством Германии принято решение о строительстве большего количества электростанций, работающих на газе, чтобы компенсировать колебания подачи электроэнергии от СЭС и ВЭС и поддерживать баланс в энергосистеме. В частности, децентрализованные газопоршневые электростанции могут гибко компенсировать колебания подачи электроэнергии от СЭС и ВЭС в сеть.





### На базе двигателя ЯМЗ создан ГПЭС 500.

Компания «ДВС Ресурс» изготовила газопоршневую установку на базе нового газового двигателя ЯМЗ 85504 мощностью 500 кВт. ГПЭС будет установлена на площадке завода, чтобы производить электроэнергию и тепло для нужд предприятия.

Двигатель ЯМЗ 85504 является новой разработкой Ярославского моторного завода, работы над созданием которого велись более трех лет. Двигатель прошел опытные испытания в составе электростанции собственных нужд Ярославского моторного завода.

За время испытаний, которые проводились в течение года, наработка составила более 4000 моточасов при работе на различных режимах нагрузки. Двигатель показал полное соответствие техническим характеристикам, подтвердил расчетные показатели экономичности и надежности. Оборудование полностью готово к работе на объектах заказчиков.

**ОБЗОРЫ РЫНКА**  
энергетического оборудования

РЕКЛАМА

РЕКЛАМА  
[www.turbine-diesel.ru](http://www.turbine-diesel.ru)

**Самый полный массив данных по России, СНГ**

- Конракты и реализованные проекты
- Изготовители двигателей и генераторных установок
- Дилеры, поставщики оборудования
- Инжиниринговые и проектные организации
- Представительства зарубежных компаний

### В Казахстане введена ветровая электростанция мощностью 48 МВт.

Компания KazWindEnergy ввела в эксплуатацию ветроэлектростанцию вблизи города Аркалык Костанайской области. Министерством энергетики Республики Казахстан данный проект включен в «Перечень энергопроизводящих организаций, использующих ВИЭ».

Работу станции обеспечивают 10 ветрогенераторов SI-16848 производства китайской компании Sany Group мощностью по 4,8 МВт, которые преобразуют кинетическую энергию воздушного потока в электроэнергию.

Диаметр ротора ветроустановки составляет 168 м, длина одной лопасти – 82 м. Занимаемая станцией площадь составляет более 390 Га.

Прогнозируемый объем производства электроэнергии составляет 176 млн кВт·ч в год, что позволит ежегодно снижать выбросы углекислого газа на 60 тысяч тонн. Вся производимая электроэнергия ВЭС будет поступать в Единую электроэнергетическую систему Казахстана.

*В этом году в Аркалыке начнется строительство новой газопоршневой электростанции когенерационного цикла.*

### Компания Tedom поставила ГПЭС для модернизации котельной в г. Шидловец (Польша).

Чистое производство энергии становится все более актуальным в Польше. Для модернизации котельной, эксплуатируемой Ciepłownia Szydłowiec Sp. z o.o., компания Tedom поставила энергоблок Quanto мощностью 800 кВт на базе двигателя MWM TCG 3016 V16.

Проект реализован в сотрудничестве с Zakład Innowacyjny technik energetycznych Promat. Цель модернизации – замена трех угольных котлов, выработавших ресурс, и создание эффективной системы производства энергии. После ввода энергоблока в эксплуатацию выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу будут сокращены на 6000 т/год.

Основным топливом ГПУ будет природный газ, резервным – дизельное. Производимая станцией тепловая энергия подается в сеть централизованного теплоснабжения города, а электроэнергия – в национальную энергосистему. САУ дистанционно контролирует все рабочие параметры энергоблока.

# ТУРБОСЕРВИС

Полевой сервис

Восстановление компонентов

Поставки капитальных частей  
и расходных материалов

Программы по реинжинирингу  
и производству компонентов ГТ

Продление жизненного цикла  
компонентов турбины

Инжиниринг и техническая поддержка



РЕКЛАМА



[www.seturbo.ru](http://www.seturbo.ru)



# Повышение эффективности работы КВОУ газовых турбин

- Проектирование
- Инжиниринг
- Сервис



 **EMV**  
фильтртехник рус

РЕКЛАМА

ООО «EMV фильтртехник рус»  
Россия, 115114, Москва  
Дербеневская набережная, д. 7, стр. 12  
[www.emw.de/ru](http://www.emw.de/ru), [sales@emwtech.ru](mailto:sales@emwtech.ru)  
тел./факс (495) 783-87-98