

Компрессорная Техника и Пневматика

COMPRESSORS & PNEUMATICS

Том / Vol. 35

№1

2025



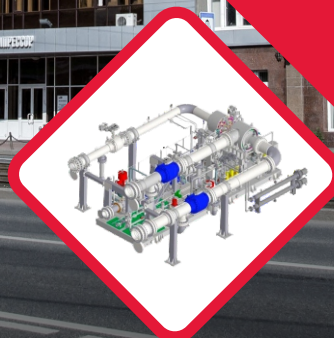
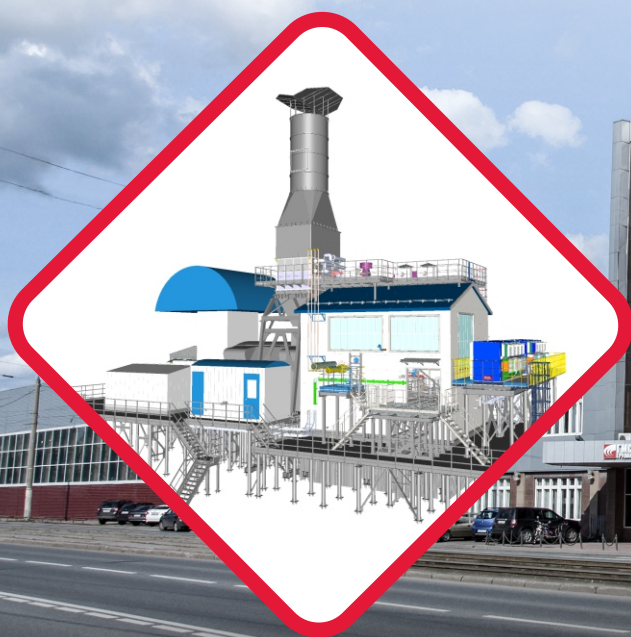
НИИТУРБОКОМПРЕССОР

КАЗАНЬ,
СИБИРСКИЙ ТРАКТ, 40

Ведущий в России и СНГ научно-исследовательский
и проектно-конструкторский центр в области создания
современного компрессорного оборудования.

РАЗРАБАТЫВАЕМ И ПРОЕКТИРУЕМ

КОМПРЕССОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЛЮБОГО УРОВНЯ СЛОЖНОСТИ

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ
КОМПРЕССОРЫВИНТОВЫЕ
КОМПРЕССОРЫГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИЕ
АГРЕГАТЫ

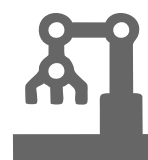
РЕИНЖИНИРИНГ

ТЕХНИЧЕСКАЯ
ДИАГНОСТИКА
КОМПРЕССОРОВ

БОЛЕЕ 350 ВЫСОКО-
КВАЛИФИЦИРОВАННЫХ
СПЕЦИАЛИСТОВ



СОВРЕМЕННОЕ
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И РАСЧЕТОВ

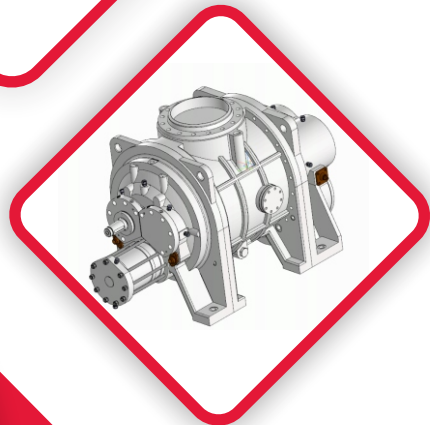
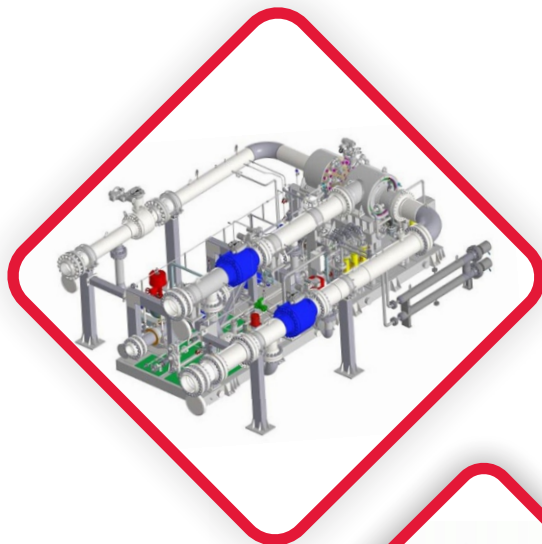


СОВРЕМЕННЫЙ ПАРК
ОБОРУДОВАНИЯ

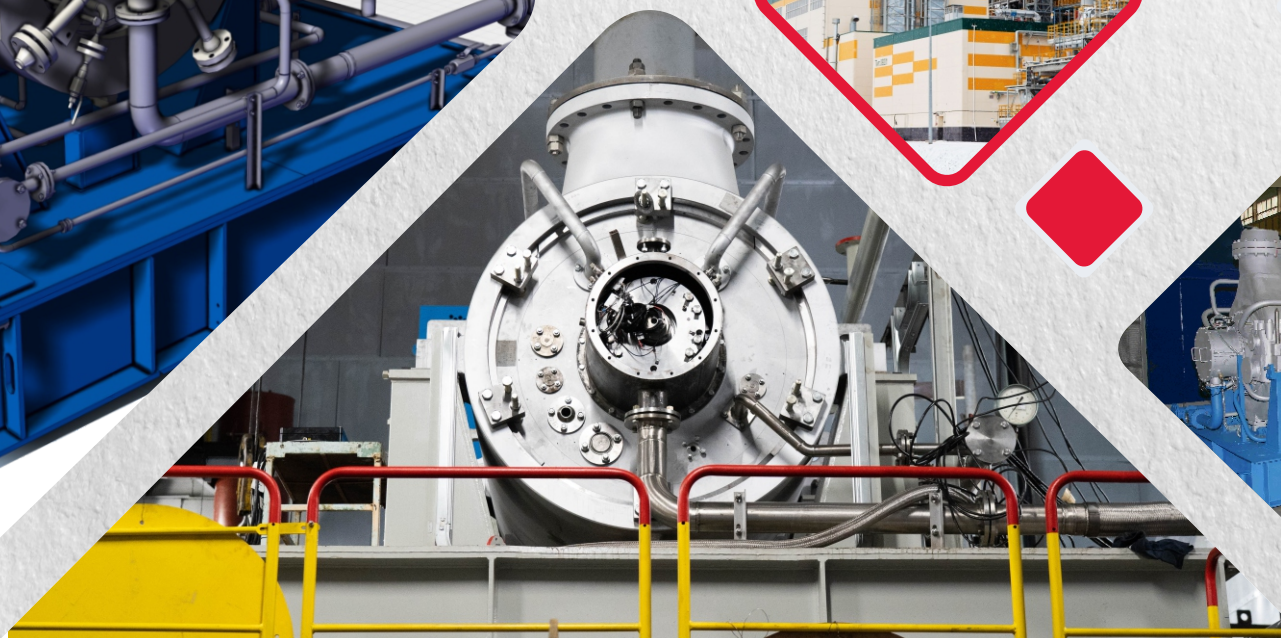
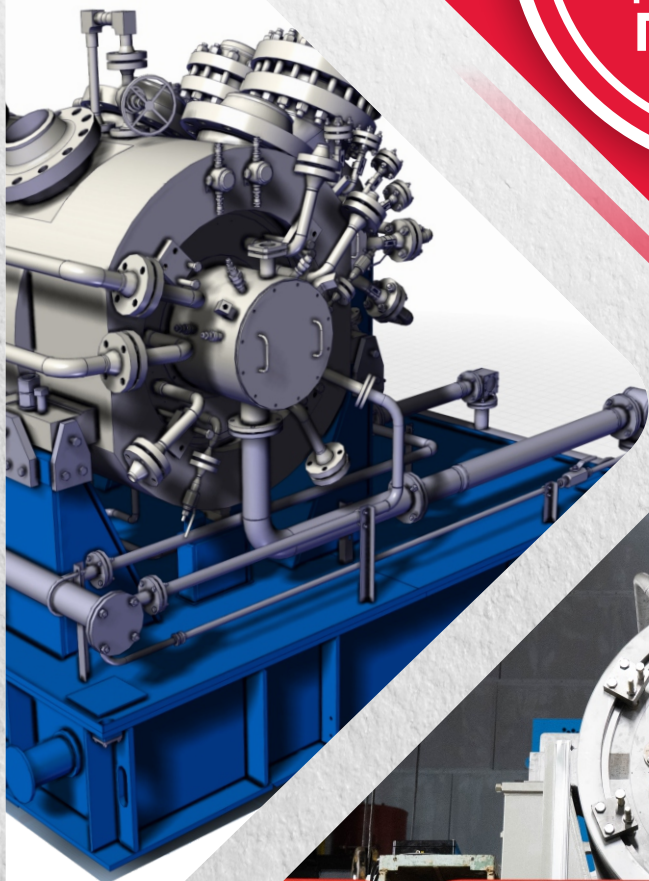


НИИТУРБОКОМПРЕССОР

**ИННОВАЦИОННЫЕ
РЕШЕНИЯ
В ОБЛАСТИ
ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ**



**БОЛЕЕ
1500
РЕАЛИЗОВАННЫХ
ПРОЕКТОВ**



Компрессорная техника и пневматика

Научно-технический и информационный журнал

Том 35, №1/2025 (март)

Compressors & Pneumatics

Scientific, technical and informational journal

Vol.35, No. 1/2025 (March)

Сведения о журнале



«Компрессорная техника и пневматика» - научный журнал в области разработки, проектирования, изготовления и эксплуатации компрессорной техники, пневматических систем и оборудования на их базе.

Цель журнала

Публикация научных статей в области компрессорной техники и пневматических систем, обладающих научной новизной, описывающих результаты новейших исследований и инновационные решения, имеющие практическую значимость.

Тематика журнала

В журнале публикуются статьи по следующим направлениям исследований в области компрессорной техники и пневматических систем, и оборудования на их базе, а также дискуссионные вопросы по проблемам отечественного компрессоростроения и связанными с ним отраслями производства и науки:

Разработка и проектирование
Изготовление и эксплуатация
Прочность и надежность
Материалы и оборудование
Энергоэффективность, энергосбережение и автоматизация
Цифровая трансформация
Промышленная безопасность и защита от разрушения
Цифровая трансформация
Техническое регулирование
Развитие отрасли

Главный редактор

Поникаров С.И. - д.т.н., проф.

Заместитель главного редактора:

Хабибуллин И.И. - к.т.н.

Редакционная коллегия:

Баранов А.Ю. - д.т.н., проф.
Баранов И.В. - д.т.н., проф.
Бурмистров А.В. - д.т.н., проф.
Ваняшов А.Д. - к.т.н., доц.
Галеркин Ю.Б. - д.т.н., проф.
Гукасян А.В. - д.т.н., проф.
Дроздов А.А. - д.т.н., проф.
Ибрагимов Е.Р. - к.т.н.
Кантюков Р.Р. - к.т.н.
Скрынник Ю.Н. - к.т.н.
Сухомлинов И.Я. - д.т.н., проф.
Футин В.А. - д.т.н., проф.
Хадиев М.Б. - д.т.н., проф.
Чернышев А.В. - д.т.н., проф.
Юша В.Л. - д.т.н., проф.

Нормы и правила редакционной деятельности

В своей работе редакция журнала следует определенным нормам и правилам:

- обеспечивает рецензирование принятых к рассмотрению статей, привлекая для этого авторитетных российских специалистов и ученых;
- придерживается процедуры коллегиального обсуждения статей редакционной коллегией, сформированной по принципу географического разнообразия и принадлежности участников к различным организациям;
- руководствуется общепринятыми этическими нормами и издательскими стандартами в отношении научных публикаций.

Индексирование и сохранение информации

Журнал включен в следующие базы данных:

- Российский индекс научного цитирования
- Приоритетом редакционной политики является обеспечение сохранности научной информации путем обеспечения архивации выпусков журнала:
- обязательные печатные экземпляры направляются в Российскую государственную библиотеку с целью распределения между крупнейшими библиотечно-информационными организациями России;
- статьи и метаданные размещаются в Научной электронной библиотеке Elibrary.ru;
- архив электронных выпусков хранится на сайте журнала

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК).

Публикуются статьи по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники (технические науки).

Авторские права и персональные данные

Редакционная политика основывается на юридических требованиях в отношении авторского права и смежных прав, недопущения плагиата, изложенных в законодательстве Российской Федерации. Редакция обеспечивает обработку и сохранение конфиденциальности персональных данных авторов в соответствии с Федеральным законом РФ №152-ФЗ «О персональных данных»

Учредители

ИП Крюков М.А.
Кубанский государственный университет
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Адрес редакции

ИП Крюков М.А.
г. Москва, ул. Партизанская, д. 36

ISSN 2413-3035

Периодичность выхода:

4 раза в год

Перепечатка и иное коммерческое использование материалов допускается только с разрешения редакции.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации, опубликованной в рекламных объявлениях. В номере использованы фотографии, представленные авторами статей.

Типография:

Тираж: 200 шт.

Отправлено в печать: 2025 года

Information about the magazine



Compressors & Pneumatics is a scientific journal in the field of development, design, manufacture and operation of compressor technology, pneumatic systems and equipment based on them.

The purpose of the magazine

Publication of scientific articles in the field of compressor technology and pneumatic systems with scientific novelty, describing the results of the latest research and innovative solutions of practical importance.

The subject of the magazine

The journal publishes articles on the following research areas in the field of compressor technology and pneumatic systems, and equipment based on them, as well as controversial issues on the problems of domestic compressor engineering and related industries and science:

Development and design
Manufacturing and operation
Durability and reliability
Materials and equipment
Energy efficiency, energy conservation and automation
Industrial safety and protection from destruction
Digital transformation

Chief Editor

Ponikarov S.I. - d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

Deputy Editor-in-Chief:

Khabibullin I.I. – cand. of Eng. Sc.

Editorial Board:

Burmistrov A.V. – d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

Vanyashov A.D. – cand. of Eng. Sc., Assoc. Prof

Galerkin Yu.B. - d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

Ghukasyan A.V. - d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

Drozdov A.A. - d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

Ibragimov E.R. - cand. of Eng. Sc

Kantyukov R.R. - cand. of Eng. Sc

Skrynnik Yu.N. - cand. of Eng. Sc

Sukhomlinov I.Ya. - d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

Futin V.A. - d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

Khadiev M.B. - d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

Chernyshev A.V. - d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

Yusha V.L. - d-r of Eng. Sc. Pnot., Professor

The rules and regulations of editorial activities

The editorial staff of the journal in its work is guided by the following principles:

-provide peer review of all articles involving authoritative Russian and foreign experts and scientists;

-adhere to the procedure of collective discussion of articles by the Editorial Board, formed on the principle of geographic diversity and membership of various organizations;

-abide by the accepted ethical standards and publishing standards for scientific articles.

Indexing and storage of information

The journal is included in the Russian Databases: Russian Science Citation Index.

The priority of the editorial policy is to ensure international scientific information communication and the storage of scientific information by archiving journal issues and articles:

-mandatory free printed and electronic copies are transferred to the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications (the Ministry of Digital Affairs of Russia); the Russian State Library with the aim of distributing publications among the largest library and information organizations in Russia;

-articles and metadata are placed in the Scientific Electronic Library of Russia, Elibrari.ru;

-archive of print and electronic issues is stored in the scientific and technical library of JSC "V.B. Shnepp Turbine Compressor" (HMS Group), Kazan and in the journal's editorial office.

Presence on the list of higher attestation commission

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific journals (the List of Higher Attestation Commission of the Ministry of education and Science of Russia

Federation), where the main scientific results of dissertations for the degrees of Candidate of Sciences and Doctor of Science should be published. The journal publishes articles on the following scientific specialties and related fields of study:

- 2.4.8. Machines and apparatuses, processes of refrigeration and cryogenic technology (technical sciences).

Copyright and personal data

The editorial policy of the journal is based on the legal requirements in relation to copyright and allied rights, non-admission of plagiarism, set forth in the legislation of the Russian Federation. The editors ensure the processing and preservation of the processing and preservation of the author personal data privacy in accordance with the Federal Law of the Russian Federation No. 152-FZ "On Personal Data".

The founders

EI Kryukov M.A.

Kuban State University

Bauman Moscow State Technical University

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Editorial office address

EI Kryukov M.A. Moscow, Partizanskaya St., 36

ISSN 2413-3035

Frequency of release: 4 times a year

Reprinting and other commercial use of materials is allowed only with the permission of the editorial board. The editorial board is not responsible for the accuracy of the information published in the advertisements. The issue uses photographs provided by the authors of the articles.

Printing house:

Circulation: 200

Sent to print: 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПОЗДРАВЛЕНИЯ

- Поздравление И.Г. Хисамееву от коллектива
АО «НИИтуброкомпрессор им. В.Б. Шнеппа»
и редакции и редколлегии журнала
«Компрессорная техника и пневматика». 5
- Поздравление И.Г. Хисамееву
от Управляющего директора АО «Казанькомпрессормаш»
Сагдиева И.И. 6
- Поздравление И.Г. Хисамееву от Руководителя
научно-исследовательской лаборатории
«Газовая динамика турбомашин» Санкт-Петербургского
политехнического университета Петра Великого,
проф. д.т.н. Ю. Б. Галеркина 7

РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

- Хисамеев И.Г., Ращупкина М.А.
Модель поршневого компрессора 8
- Ахметзянов А.М., Хасанов Н.Г.,
Бережной Д.М., Лунев А.Т.
Малорасходная ступень турбины
для турбодетандерного агрегата 12
- Бусаров С.С.
Расширение диапазона отношений
давлений в одноступенчатой несмазываемой
поршневой машине 19
- Ворошилов И.В., Грицай В.В., Родиченко А.В.,
Шамаров М.В., Шамаров А.М.
Особенности разработки и создания поршневого
компрессора большой производительности
для сжатия водорода 25
- Галеркин Ю.Б., Солдатова К.В., Маренина Л.Н.,
Дроздов А.А., Рекстин А.Ф.
Оценка возможностей
вычислительной газодинамики при проектировании
центробежных компрессоров (часть 1) 34

ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ

- Соловьев А.Е., Очков А.А.
Диагностика неисправностей винтового компрессора 43

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Поморцев Е.Н., Якимов Д.Е., Габдрахманова З.Р.
Исследование вакуумной пайки аустенитно-мартенситной
стали припоями на основе никеля 54

Compressors & Pneumatics

SCIENTIFIC TECHNICAL
AND INFORMATIONAL
JOURNAL

CONTENTS

DEVELOPMENT AND DESIGN

- Ibragim G. Khisameev, Marina A. Rashchupkina
Reciprocating compressor model 8
- Albert M. Akhmetzyanov, Nariman G. Khasanov,
Dmitry M. Berezhnoy, Aleksandr T. Lunyov
low-flow turbine stage for turbo-expander 12
- Sergey.S. Busarov
Extension of the range
of pressure ratio in a single-stage non-lubricated piston machine 19
- Igor V. Voroshilov, Valery V. Gritsai, Alexey V Rodichenko,
Maxim V. Shamarov, Artem M. Shamarov
Features of the development and creation
of a high-performance reciprocating compressor
for hydrogen compression 25
- Yuri B. Galerkin, Kristina V. Soldatova, Lyubov N. Marenina,
Alexander A. Drozdov, Alexey F. Rekstin
Evaluation of the capabilities of computational
gas dynamics in the design of centrifugal compressors (part 1) 34

DURABILITY AND RELIABILITY

- Alexander E. Soloviev, Andrey A. Ochkov
Screw compressor malfunction diagnostic 43

MATERIALS AND EQUIPMENT

- Evgeny N. Pomortsev, Dmitry E. Yakimov,
Zukhra R. Gabdrakhmanova
investigation of vacuum brazing with nickel solders
for austenomartensitic steel 54

Поступила в редакцию: 09.01.2025

Принята в печать: 28.02.2025

УДК 621.592.3

МАЛОРАСХОДНАЯ СТУПЕНЬ ТУРБИНЫ ДЛЯ ТУРБОДЕТАНДЕРНОГО АГРЕГАТА

Ахметзянов А.М., Хасанов Н.Г., Бережной Д.М., Лунев А.Т.

АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», г. Казань, Россия

hasanovnariman@mail.ru

Аннотация. Проведено газодинамическое проектирование проточной части модельной центростремительной турбины, применяемой в составе турбодетандерного агрегата. Ступень отличается малым коэффициентом расхода по условиям входа для возможности использования в турбодетандерных агрегатах с существенной разницей производительности компрессорной и турбинной части, либо для приводных установок, где классические ступени определяют недопустимо малый диаметр рабочего колеса. Материалы работы расширяют ряд модельных ступеней АО НИИТК в область малых коэффициентов расхода.

Используются методы вычислительной гидродинамики (CFD) в рамках задачи многопараметрической оптимизации.

В статье приведены внешний вид турбины и результаты расчёта в форме газодинамических характеристик.

Ключевые слова: турбодетандерный агрегат, центростремительная турбина, проточная часть, модельная ступень, газодинамический расчёт, характеристики, Numeca, Minamo, оптимизация, коэффициент расхода.

TALOW-FLOW TURBINE STAGE FOR TURBO-EXPANDER

Albert M. Akhmetzyanov, Nariman G. Khasanov, Dmitry M. Berezhnoy,
Aleksandr T. Lunyov

JSC NIIturbocompressor n.a. V.B. Shnepp, Kazan, Russia.

hasanovnariman@mail.ru

Abstract: Gas-dynamic design is performed for the wheel space of a model inward-flow turbine used as a part of turbo-expander. The stage is characterised by the small flow coefficient under the inlet conditions for the possibility of use in turbo-expander units with the significant difference between the compressor and turbine part performance, or for drive units, where classical stages determine unacceptably small impeller diameter. Materials of the paper extend the range of JSC NIITC model stages into the area of small flow coefficients.

Computational Fluid Dynamics (CFD) methods are used within the framework of a multi-parameter optimisation problem.

The paper presents an external view of the turbine and calculation results in the form of gas dynamic characteristics.

Keywords: turbo-expander, inward-flow turbine, wheel space, model stage, gas-dynamic calculation, characteristics, Numeca, Minamo, optimisation, flow coefficient.

Введение

Турбодетандерные агрегаты (ТДА) позволяют эффективно утилизировать механическую энергию расширения газа. Классическая схема турбина-компрессор или компрессор-турбина, приведенная на рис. 1, подразумевает примерное равенство массовых расходов в турбинной и компрессорной ступени, за вычетом потери отделенной доли тяжелых компонентов газа.

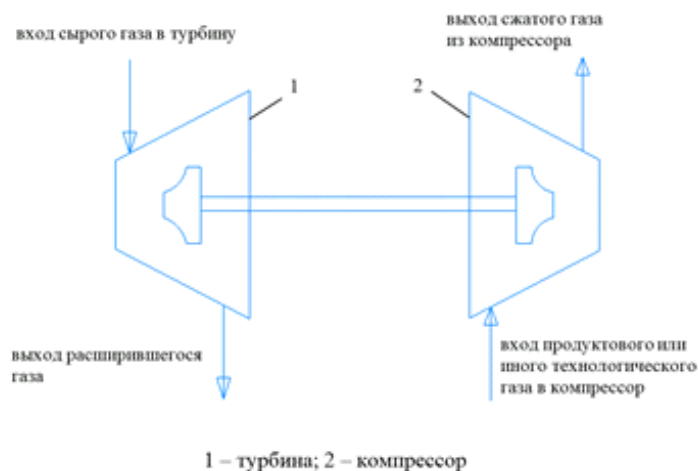


Рис.1. Принципиальная схема ТДА

Fig.1. TEA schematic diagram

В рамках работы над проектом ТДА для низкотемпературной сепарации этансодержащего газа выявлено, обусловленное технологическими особенностями, превышение объемного расхода компрессора над турбиной более чем в два раза. Турбина и компрессор, будучи кинематически связанными, работают при одинаковой частоте вращения. Сохранение оптимальной безразмерной адиабатной скорости $U_1/C_{ад}$ требует примерного равенства диаметров рабочих колес компрессора и турбины. Ступень турбины с меньшим расходом будет пропорционально уже компрессорной.

Производственная необходимость применения хорошо проверенного среднерасходного компрессорного колеса с условным коэффициентом расхода $\Phi_0 = 0,11$ [1] привело к необходимости применения ступени турбины с малой относительной шириной проточной части по входу в РК $b_1 = b_1/D_1 = 2,9\%$. Из практики НИИТК [2], малорасходная ступень с узкой меридиональной подрезкой имеет пониженную эффективность, особенно при больших углах поворота соплового аппарата, и, связанного с этим, ограничением по диапазону регулирования расхода при сохранении удовлетворительного уровня её эффективности.

Целью данной работы являлось создание турбинной ступени, эффективно работающей при малых коэффициентах расхода.

Материалы и методы

Большое количество газодинамических проектов в АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» определяет основным методом проектирования пересчет безразмерных газодинамических характеристик модельных ступеней на натурные условия эксплуатации. Для определения целевых показателей проектирования используются безразмерные критерии подобия – $\Phi_0, U_1/C_{ад}$, изэнтропический коэффициент полезного действия $\eta_{из}$.

Исходными размерными величинами для формулирования безразмерных параметров, являются определенные из опросного листа на проектирование ТДА для проекта сепарации этансодержащего газа значения массовой производительности и отношения давлений π . Целевые показатели малорасходной ступени турбины в безразмерном виде приведены в таблице 1.

Целевой уровень энергоэффективности ступени турбины

Таблица 1

Режим работы	Коэффициент расхода турбины	Коэффициент адиабатной скорости	Коэффициент полезного действия
100%	0,0171	0,675	87
100%	0,0184	0,689	87
70%	0,0131	0,615	83,7

По результатам ранних исследований турбинного ряда [2], при значении $\bar{b}_1 \geq 4,9\%$ обеспечивается приемлемая эффективность и форма газодинамической характеристики. Данной ширине соответствует

коэффициент расхода $\Phi_0 = 0,028$. Характеристики проточной части с данной шириной известны из той-же работы [2], имеется идентифицированная газодинамическая CFD-RANS модель в виде настроек решателя и конечно-элементной сетки, показавшая хорошую сходимость расчётных и экспериментальных данных, рис. 2. Наличие исходной точки для проектирования позволяет отказаться от предварительных расчётов в одномерной постановке. Первым этапом проектирования становится модификация ступени с $b_1 = 4,9\%$, к условному коэффициенту расхода $\Phi = 0,0131$, снижения расходности ступени-аналога при сохранении ширины проточной части.

Авторы публикаций по малорасходным турбинам обеспечивают требуемую производительность малым диаметром рабочего колеса [3,4] или малыми углами лопаточной решетки [5,6].

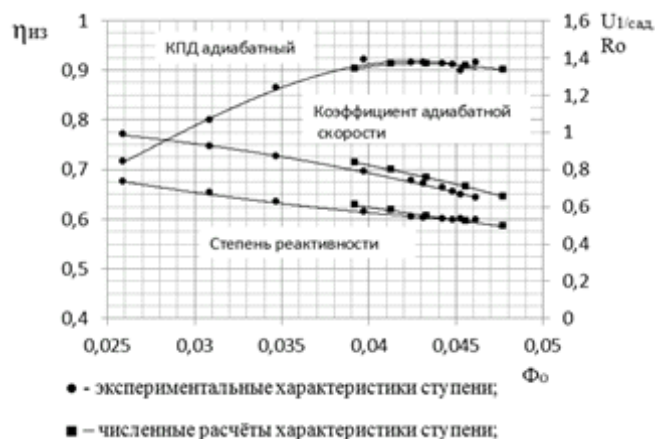


Рис.2. Сравнение расчётных и экспериментальных данных (для базовой ступени ряда)

Fig.2. Comparison of computational and experimental data (for the basic stage of the series)

Из теории осевых турбин известен способ уменьшения расхода ступени повышением степени парциальности лопаточных аппаратов – увеличения загромождения проточной части лопатками [7,8]. Данный метод может оказаться более эффективным, чем снижение проходных площадей газодинамического тракта уменьшением лопаточных углов, так как это приведет к удлинению лопатки и росту потерь трения.

Результаты

Проектирование начинается с параметризации пространственной модели ступени-аналога в программном комплексе AxCent. Трёхмерные координаты представляются в виде зависимости распределения лопаточных углов и толщин лопаток по длине газодинамического канала.

Далее толщины лопаток увеличивались с целью снижения проходных площадей РК и СА на 230%. Геометрия исходной и модернизированной ступени, а также распределения лопаточных углов показаны на рис. 3. Одновременно, чтобы избежать заужения канала, происходило «раскрытие» лопаточной решетки увеличением углов в начале лопатки, формирование 90-градусного участка. Метод профилирования изменен с «радиального колеса на цилиндрической развертке» на независимо управляемые втулочный и периферийный контур. Для уменьшения расходности соплового аппарата существенно уменьшены лопаточные углы. В результате, удалось при сохранении ширины рабочего колеса ступени уменьшить расход в 2,3 раза. Данная газодинамическая модель будет подготовлена для использования в модуле автоматической многокритериальной оптимизации.

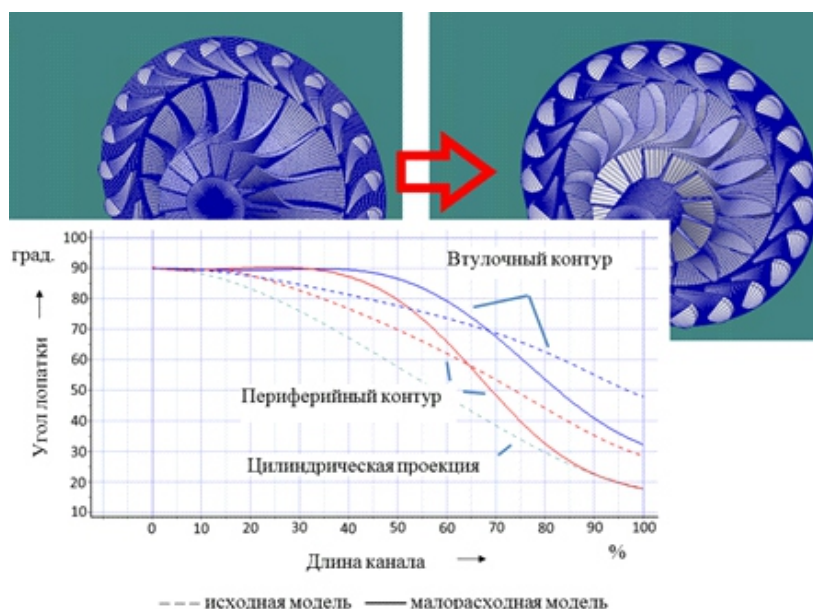


Рис.3. Преобразование твердотельной модели при уменьшении расходности ступени

Fig.3. Transformation of the solid model when reducing the flow rate of the stage

Критерием оптимизации является максимум изоэнтропийного КПД в точке с условным коэффициентом расхода $\Phi_0 = 0,0131$. Параметры оптимизации – положения полюсов сплайнов, описывающих обводы меридионального контура, среднюю линию и толщину лопатки. Всего 26 параметров. Ограничение задачи оптимизации – отношение давлений должно находиться в окрестностях планируемого значения ($1.8 > \pi > 2.2$, получено на основе анализа экспериментальных данных ступени-аналога). В алгоритме применяется метод штрафных функций для рассматриваемых вариантов, не удовлетворяющих данному ограничению. Диапазоны варьирования лопаточных углов настроены с целью минимизации длины лопатки – ограничены перемещения полюсов сплайнов, вызывающих наибольшее удлинение. Рабочее колесо полуоткрытое, принят равномерный зазор между торцом лопатки и покрывным диском равный 0,75 мм (диаметр модельного РК 300 мм.).

Оптимизационный алгоритм использует методы машинного обучения и генетический алгоритм. Полюса сплайнов, описывающих геометрию проточной части, изменяются случайным образом в заданном диапазоне варьирования и комбинируются, формируя так называемую начальную «популяцию» или базу данных. Нейронная сеть обучается на базе данных, аппроксимирует её и предлагает несколько кандидатов с максимальной ожидаемой эффективностью скомбинированных параметров (суррогатная модель). Далее наилучшие кандидаты скрещиваются между собой, обмениваясь «генами» – наиболее эффективными параметрами. Каждый новый кандидат рассчитывается в CFD-постановке, уточняя суррогатную модель.

Оптимизация происходит в программном комплексе Numeca Fine/Design 3D. Расчётная сетка блочно-структурированная, низкорейнольдсовая, стационарная постановка, модель турбулентности Спаларта-Аллмараса с расширенным пристеночным моделированием.

На рис. 4 приведены диапазоны варьирования геометрии для соплового аппарата и рабочего колеса на финальном этапе оптимизации, на рис. 5 финальная геометрия. Проведено четыре этапа оптимизации, лучшая геометрия с предыдущего этапа является базовой геометрией для последующих, в рамках каждого этапа рассмотрено порядка 600 вариантов проточных частей.

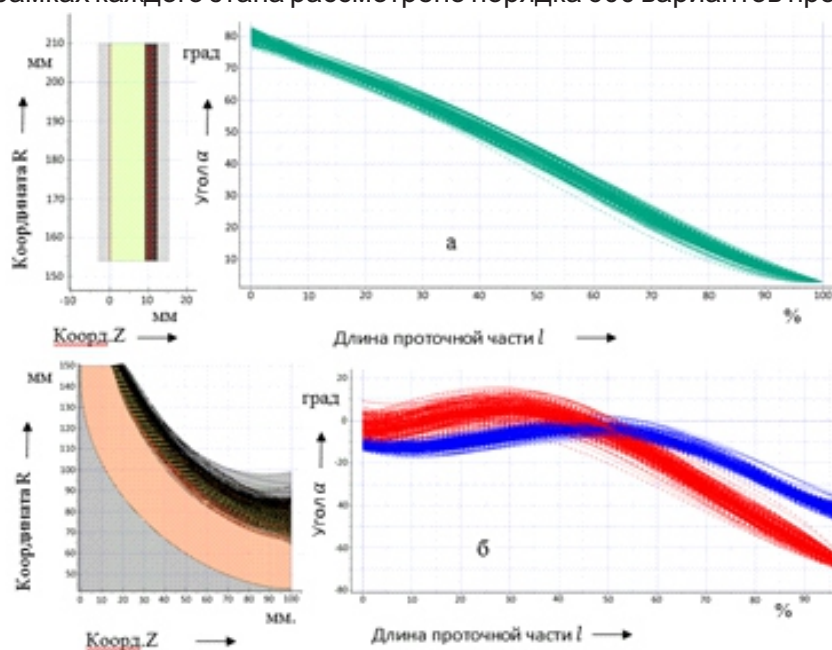


Рис.4. Диапазоны варьирования геометрии на финальном этапе оптимизации
а) сопловой аппарат
б) рабочее колесо

Fig.4. Geometry variation ranges for the final stage of optimisation
a) nozzle apparatus
b) the impeller

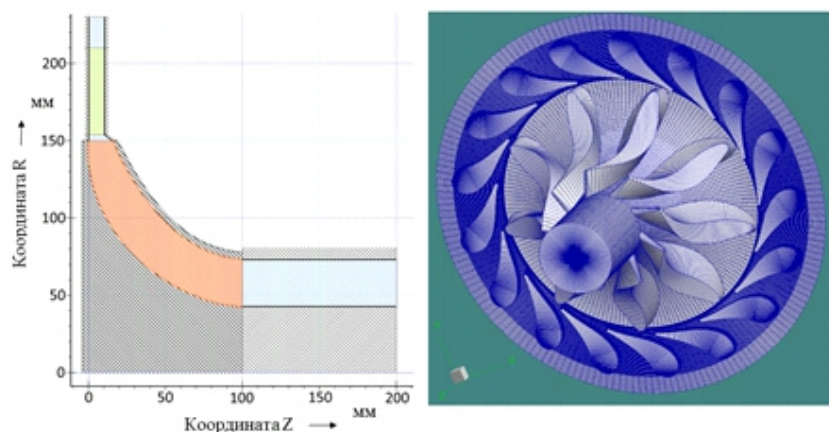


Рис.5. Внешний вид оптимизированной ступени

Fig.5. Optimised stage appearance

Газодинамическая характеристика турбины при номинальном угле установки соплового аппарата приведена на рис. 6.

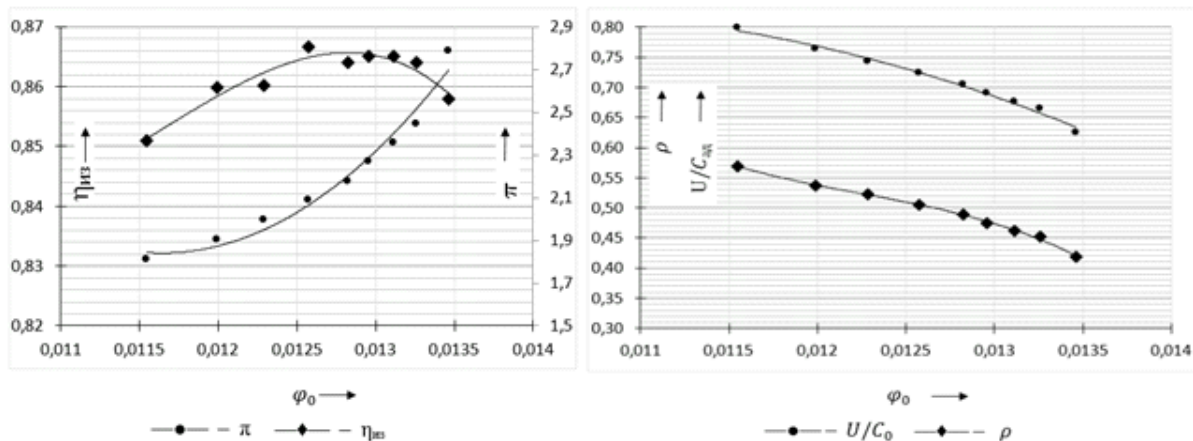


Рис.6. График зависимости газодинамических параметров от коэффициента расхода для оптимизированной ступени

Fig.6. Plot of gas dynamic parameters dependence on the flow coefficient for the optimised stage

С целью исследования возможности регулирования производительности, рассчитаны два режима при изменении положения угла соплового аппарата α_1 - плюс 4 градуса (предельный угол, обеспечивающий запас до касания лопаток РК лопатками СА) и минус 5 градусов. Для определения положения оси поворота лопатки, проведены исследования на зависимость величины крутящего момента от положения оси вращения. Обобщающая характеристика турбинной ступени при разных углах установки соплового аппарата приведена на рис. 7.

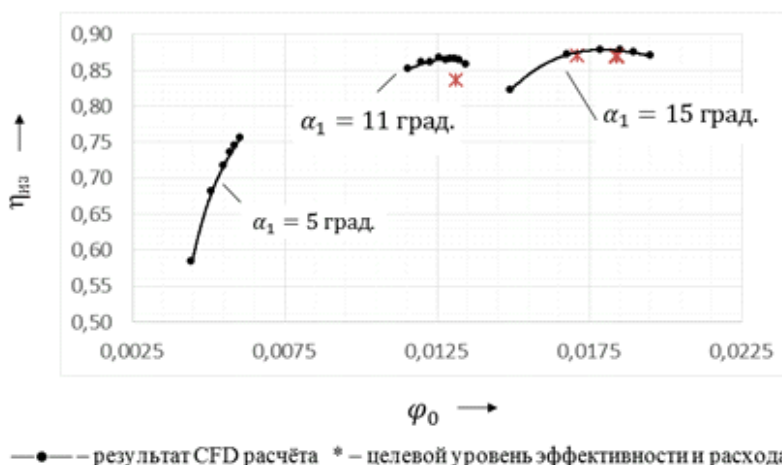


Рис.7. График зависимости изоэнтальпийного КПД от условного коэффициента расхода малорасходной турбины по входу для разных углов установки соплового аппарата

Fig.6. Plot of isoentropic efficiency dependence on the nominal inlet flow coefficient for the low-flow turbine for different angles of nozzle diaphragm

Обсуждение

На выходе из конического диффузора рабочего колеса выполнено поджатие, чтобы избежать обратного тока при CFD – расчётах. Сопловой аппарат ожидаемо получился зауженным относительно входа в рабочее колесо, так как при малых коэффициентах расхода равенство ширин предполагало бы неприемлемо малые углы выхода потока с точки зрения технологичности и возможности регулирования производительности поворотом СА. Форма рабочего колеса технологичная, горло лопатки позволит пройти фрезе при механической обработке. Ступень имеет 17 лопаток в сопловом аппарате и 9 лопаток в рабочем колесе.

Турбина имеет выраженный максимум эффективности при $U_1 / C_{a0} = 0,72$ и отсутствие закрутки потока на выходе из ступени, что свидетельствует о кинематической согласованности проточной части.

Исследования на прочность показали возможность работы при окружных скоростях до 437 м/с.

Спроектированная ступень турбины удовлетворяет целевым показателям. Однако, в случае су-

щественной разницы объемной производительностей компрессорной и турбинной ступени, целесообразнее эффективнее увеличивать Φ_0 компрессорной ступени, чем уменьшать Φ_0 у турбинной ступени. Наиболее расходной компрессорной ступенью в ряду АО НИИТК является первая базовая модельная ступень. Газодинамическая характеристика при испытаниях с диаметром РК 300мм. приведена на рис. 8.

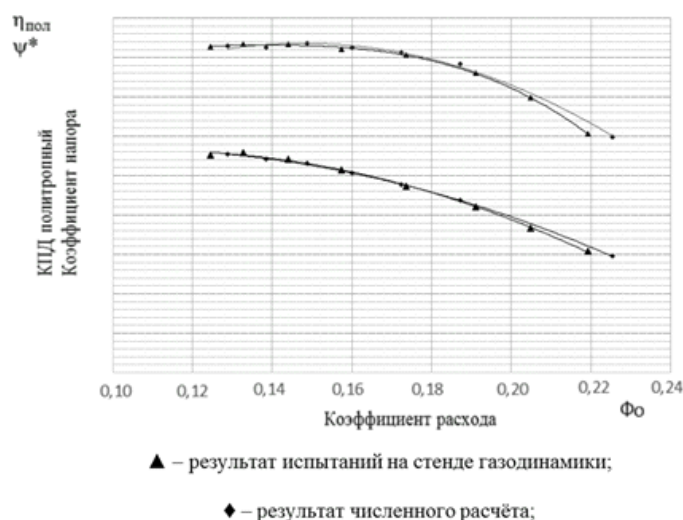


Рис.8. Газодинамическая характеристика высокорасходной компрессорной ступени

Fig.8. Gas dynamic characteristic of high-flow compressor stage

Закключение

Разработанная малорасходная ступень турбины с повышенной парциальностью лопаточной решетки обеспечила целевые показатели проектирования и может быть рекомендована для расширения границ применения типоразмерного ряда ступеней для ТДА.

Литература

1. Хасанов, Н.Г. Высокоэффективный нагнетатель природного газа / Н.Г. Хасанов, Е.В. Дубинин, Р.Ф. Муртазин, П.В. Солтеев, А.Л. Хрипунов – Текст непосредственный // Труды XIX Международной научно-практической конференции по компрессоростроению, посвященной 100-летию со дня рождения Владимира Борисовича Шнеппа 20–21 июня 2024 года. / Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им.В.Б. Шнеппа, под редакцией Е.Р. Ибрагимова, Е.Е. Костылевой, И.И. Хабибуллина. - Казань: ООО «ВИЗАРД», 2024. – С. 118-124.
2. Хасанов, Н. Г. Проектирование радиальных турбин методом вычислительной гидродинамики и пересчет характеристик с учетом фазового состояния смеси / Н. Г. Хасанов, Р. Ф. Муртазин, Е. В. Дубинин Р.Р. Фахрутдинов, И.Ф. Хуснутдинов – Текст непосредственный // Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин: Труды XI Международной научно-технической конференции молодых специалистов 21–22 апреля 2022 года. / Ассоциация компрессорщиков и пневматиков (АСКОМП); Акционерное общество «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» (Группа ГМС); Акционерное общество «Казанькомпрессормаш» (Группа ГМС); Академия наук Республики Татарстан; Акционерное общество «Группа ГМС», под редакцией Н.В. Соколов. - Казань: ООО «ВИЗАРД», 2022. – С. 179-185.
3. Крюков, А.А. Трехмерный газодинамический расчет соплового аппарата малорасходной центростремительной турбины. Крюков, А.А. – Текст непосредственный // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: морская техника и технология. - 2019. - № 4. - С 89-95.
4. Serrano, J. Extremely Low Mass Flow at High Blade to Jet Speed Ratio in Variable Geometry Radial Turbines and its Influence on the Flow Pattern: A CFD Analysis / J. Serrano, A. Gil, R. Navarro, L. Inhestern. - DOI:10.1115/GT2017-63368. – Текст: электронный // Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. – 2017. – V. 50954. - P. 1 – 13.
5. Фершалов, М. Ю. Степень реактивности малорасходной турбины с малыми конструктивными углами выхода сопел соплового аппарата / М. Ю. Фершалов, Ю. Я. Фершалов, Г. В. Алексеев – Текст непосредственный // Научное обозрение. – 2013. – № 1. – С. 149-153.
6. Соломахин, Ю.В. Характеристики парциальных микротурбин с малым углом выхода сопел/ Ю.В. Соломахин, В. М. Акуленко, А. А. Яценко. – Текст непосредственный // Вестник Астраханского

7. Забелин, Н.А. Особенности течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, В.А. Рассохин, А. А. Себелев, М.В. Смирнов. – Текст непосредственный // Глобальная энергия. 2013. - №1 - (166). - С. 45-53.

8. Крюков, А. А. Влияния шага сопловой лопатки на коэффициент скорости центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков – Текст непосредственный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2023. - Т. 15 (1). - С. 73-81.

References

1. Hasanov, N. G. Vysokoeffektivnyj nagnetatel' prirodnogo gaza / N. G. Hasanov, E. V. Dubinin, R. F. Murtazin, P.V. Solteev, A.L. Hripunov – Текст непосредственный // Trudy XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii po kompressorostroeniyu, posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya Vladimira Borisovicha Shneppa 20–21 iyunya 2024 goda. / Nauchno-issledovatel'skij i konstruktorskij institut centrobeznyh i rotornyh kompressorov im.V.B. Shneppa, pod redakciej E.R. Ibragimova, E.E. Kostylevoj, I.I. Habibullina. - Kazan': ООО «VIZARD», 2024. – S. 118-124.

2. Hasanov, N. G. Proektirovanie radial'nyh turbin metodom vychislitel'noj gidrodinamiki i pereschet harakteristik s uchetom fazovogo sostoyaniya smesi / N. G. Hasanov, R. F. Murtazin, E. V. Dubinin R.R. Fahrutdinov, I.F. Husnutdinov – Текст непосредственный // Issledovanie, konstruirovaniye i tekhnologiya izgotovleniya kompressorov mashin: Trudy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii molodyh specialistov 21–22 aprelya 2022 goda. / Associaciya kompressorshchikov i pnevmatikov (ASKOMP); Akcionernoe obshchestvo «NII turbokompressor im. V.B. Shneppa» (Gruppa GMS); Akcionernoe obshchestvo «Kazan'kompressoromash» (Gruppa GMS); Akademiya nauk Respubliki Tatarstan; Akcionernoe obshchestvo «Gruppa GMS», pod redakciej N.V. Sokolov. - Kazan': ООО «VIZARD», 2022. – S. 179-185.

3. Kryukov, A.A. Trekhmernyj gazodinamicheskij raschet soplovogo apparata maloraskhodnoj centrostremitel'noj turbiny. Kryukov, A.A. – Текст непосредственный // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: morskaya tekhnika i tekhnologiya. - 2019. - № 4. - S 89-95.

4. Serrano, J. Extremely Low Mass Flow at High Blade to Jet Speed Ratio in Variable Geometry Radial Turbines and its Influence on the Flow Pattern: A CFD Analysis / J. Serrano, A. Gil, R. Navarro, L. Inhestern. - DOI:10.1115/GT2017-63368. – Текст: elektronnyj // Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. – 2017. – V. 50954. - P. 1 – 13.

5. Fershalov, M. Yu. Stepen' reaktivnosti maloraskhodnoj turbiny s malymi konstruktivnymi uglami vyhoda sopel soplovogo apparata / M. Yu. Fershalov, Yu. Ya. Fershalov, G. V. Alekseev – Текст непосредственный // Nauchnoe obozrenie. – 2013. – № 1. – S. 149-153.

6. Solomahin, Yu.V. Harakteristiki parcial'nyh mikroturbin s malym uglom vyhoda sopel / Yu.V. Solomahin, V. M. Akulenko, A. A. Yacenko. – Текст непосредственный // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. - 2017. - №4. - С 100-107.

7. Zabelin, N.A. Osobennostej techeniya v maloraskhodnyh turbinnyh stupenyah konstrukcii LPI / N.A. Zabelin, G.L. Rakov, V.A. Rassohin, A. A. Sebelev, M.V. Smirnov. – Текст непосредственный // Global'naya energiya. 2013. - №1 - (166). - S. 45-53.

8. Kryukov, A. A. Vliyaniya shaga soplovoj lopatki na koefficient skorosti centrostremitel'noj turbiny s chastichnym oblopachivaniem rabocheho kola / A. A. Kryukov – Текст непосредственный // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova. - 2023. - Т. 15 (1). - S. 73-81.

Авторы публикации

Ахметзянов Альберт Мингаязович – управляющий директор АО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», 420029, Российская Федерация, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д.40; e-mail: albert.ahmetzyanov@niitk.ru

Хасанов Нариман Гаязович – кандидат технических наук, начальник бюро АО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», 420029, Российская Федерация, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д.40; e-mail: hasanovnariman@mail.ru

Бережной Дмитрий Михайлович – инженер по расчётам и режимам 2 категории АО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», 420029, Российская Федерация, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д.40; e-mail: dmitriy.berezhnoy@niitk.ru

Лунев Александр Тимофеевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела АО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», 420029, Российская Федерация, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д.40; e-mail: aleksandr.lunev@niitk.ru

Authors of the publication

Albert Akhmetzyanov, Managing Director of JSC NIIturbocompressor n.a. V.B. Shnepp, address: 40, Sibirsky Trakt str., Kazan, 420029, Russian Federation; e-mail: albert.ahmetzyanov@niitk.ru

Nariman Khasanov, PhD in Engineering, Head of Bureau, JSC NIIturbocompressor n.a. V.B. Shnepp, address: 40, Sibirsky Trakt str., Kazan, 420029, Russian Federation; e-mail: hasanovnariman@mail.ru

Dmitry Berezhnoy, Category 2 Engineer for calculations and modes, JSC NIIturbocompressor n.a. V.B. Shnepp, address: 40, Sibirsky Trakt str., Kazan, 420029, Russian Federation; e-mail: dmitriy.berezhnoy@niitk.ru

Alexander Lunyov, PhD in Engineering, Deputy Head of Department, JSC NIIturbocompressor n.a. V.B. Shnepp, address: 40, Sibirsky Trakt str., Kazan, 420029, Russian Federation; e-mail: aleksandr.lunev@niitk.ru

Поступила в редакцию: 17.02.2025

Принята в печать: 03.03.2025

УДК 621.512.2

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ОТНОШЕНИЙ ДАВЛЕНИЙ В ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ НЕСМАЗЫВАЕМОЙ ПОРШНЕВОЙ МАШИНЕ

Бусаров С.С.

ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»,
г. Омск, Россия
bssi1980@mail.ru

Аннотация: Появление современных материалов, применяемых для изготовления цилиндропоршневых уплотнений поршневых бессмазочных компрессоров, позволило взглянуть по-другому на ограничения степени повышения давления в одной поршневой ступени. Отсутствие жидкой смазки позволило ориентироваться на температуру работы уплотнений на основе фторопласта. Проведённые исследования для различных газов показало, что принципиально повышение давлений в одной ступени может достигать 70 ...80 в одной ступени. С учётом приемлемой эффективности рабочих процессов с значениями коэффициента подачи и индикаторного изотермического КПД не менее 0,7 степень повышения давления может достигать 30. Данные исследования в дальнейшем могут позволить в некоторых случаях пересмотреть рекомендации для проектирования многоступенчатых поршневых машин.

Ключевые слова: поршневой несмазываемый компрессор, математическая модель отношение давлений в ступени, температура нагнетания, эффективность рабочего процесса, показатель политропы сжатия, мобильный компрессорные установки

EXTENSION OF THE RANGE OF PRESSURE RATIO IN A SINGLE-STAGE NON-LUBRICATED PISTON MACHINE

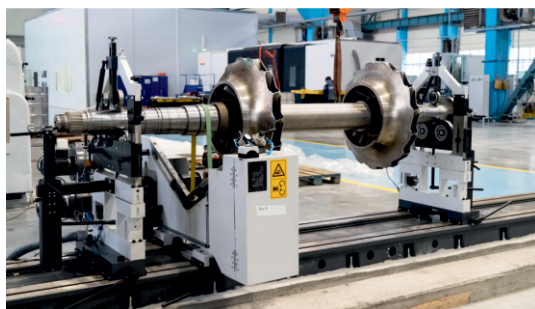
Busarov S. S.

Omsk State Technical University, Omsk, Russia
bssi1980@mail.ru

Abstract: The emergence of modern materials used to manufacture cylinder-piston seals for piston lubrication-free compressors has allowed us to take a different look at the limitations of the pressure increase degree in one piston stage. The absence of liquid lubrication has allowed us to focus on the operating

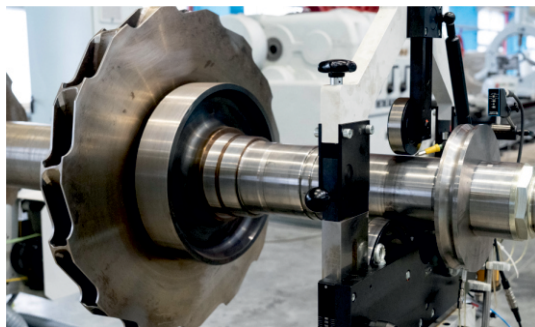
МЫ СОЗДАЕМ НАДЕЖНОСТЬ. МЫ ГАРАНТИРУЕМ БЕЗОПАСНОСТЬ!

- Минимизация рисков аварийных остановок
- Точность определения дефектов до 99,8%
- Снижение простоев оборудования до 70%
- Сокращение расходов на аварийный ремонт



ПЕРЕДОВАЯ ДИАГНОСТИКА

- Соответствие международным стандартам API
- Расширенная вибродиагностика компрессорного оборудования (по 6 параметрам)
- Неразрушающий контроль мирового уровня
- Балансировка роторов и валопроводов
- Разгонные испытания рабочих колес центробежных компрессоров
- Техническая экспертиза оборудования



ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД

- Собственные научные разработки
- Патентованные методики диагностики
- Постоянное технологическое совершенствование

КОНТАКТЫ

АО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа»

Тел. +7 (843) 2215353 / (620) 9680

Электронная почта:

niitk@niitk.ru

renat.garaev@niitk.ru

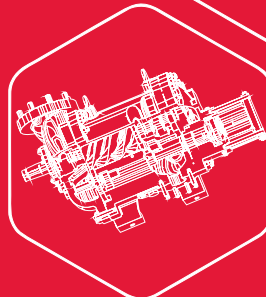
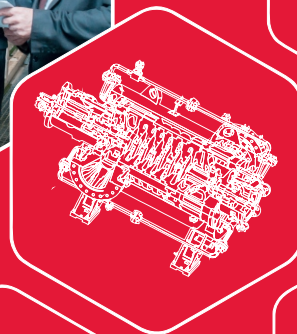


ОТДЕЛ
ВИБРОДИАГНОСТИКИ
И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ





НИИТУРБОКОМПРЕССОР



ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ КОМПРЕССОРОСТРОЕНИЯ

РАЗРАБОТАНО
БОЛЕЕ 450 НАИМЕНОВАНИЙ
КОМПРЕССОРОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

ПО ПРОЕКТАМ ИНСТИТУТА
ИЗГОТОВЛЕНО
СВЫШЕ 4800 ЦЕНТРОБЕЖНЫХ
И 17 800 ВИНТОВЫХ
КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК

РЕКЛАМА

АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа»
Россия, Республика Татарстан
420029, г. Казань, Сибирский тракт, 40

Тел: +7 (843) 221-53-53
E-mail: niitk@niitk.ru
www.niitk-kazan.ru