

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.565:621.59



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-2-23-30

Оригинальная статья / Original article

**Проблема создания и развития комплексного подхода к нормированию
процесса проведения автоматизированных испытаний турбодетандеров**

В.М. Мамедов, И.А. Архаров

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является обсуждение вопроса создания и развития комплексного методичного подхода к отработке и нормированию процесса проведения испытаний турбодетандеров на базе средств автоматизации с учетом имеющегося и потенциального спроса на отечественные турбоагрегаты к 2035 году в условиях санкционного давления. **Метод.** Выявление проблемы и формирование подхода к ее решению на основании имеющегося отечественного опыта испытаний турбодетандеров с учетом внедрения средств автоматизации и анализа потенциальных потребителей должным образом размеченных и структурированных данных о характеристиках низкотемпературной машины. Развитие и реализация систем автоматического регулирования и управления низкотемпературными машинами. **Результат.** В соответствии с общей классификацией испытаний продукции выделены 9 видов исследований, представляющих научный и практический интерес в вопросах экспериментального определения наиболее актуальных параметров турбодетандеров: изэнтропный коэффициент полезного действия, устойчивость ротора и рабочих колес, прочность рабочих колес, вибрационная и шумовая характеристики. **Вывод.** На основании перечня испытаний и основных характеристик машин определено место приложения экспериментальных данных и сформированы требования к средствам проведения автоматизированных испытаний в целях оптимизации криогенных систем в целом.

Ключевые слова: турбодетандер; испытания; средства и методы автоматизация; энергетические характеристики; устойчивость; прочность

Для цитирования: В.М. Мамедов, И.А. Архаров. Проблема создания и развития комплексного подхода к нормированию процесса проведения автоматизированных испытаний турбодетандеров. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(2):23-30. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-23-30

**The problem of creating and developing an integrated approach to standardization
process of automated testing of turboexpanders**

V.M. Mamedov, I.A. Arkharov

N.E. Bauman Moscow State Technical University,
2nd Baumanskaya St., 5, building 1, Moscow 105005, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to discuss the issue of creating and developing an integrated methodological approach to testing and standardizing the process of testing turboexpanders based on automation equipment, taking into account the existing and potential demand for domestic turbine units by 2035 under the conditions of sanction pressure. **Method.** Identification of the problem and formation of an approach to its solution based on the existing domestic experience in testing turboexpanders, taking into account the introduction of automation tools and analysis of potential consumers of properly marked and structured data on the characteristics of the machine. Development and implementation of automatic regulation and control systems for low-temperature machines. **Result.** In accordance with the general classification of product testing, 9 types of research have been identified that are of scientific and practical

interest in the experimental determination of the most relevant parameters of turboexpanders: isentropic efficiency, stability of the rotor and impellers, strength of impellers, vibration and noise characteristics. **Conclusion.** Based on the list of tests and the main characteristics of the machines, the place of application of experimental data was determined and requirements for means of conducting automated tests were formed in order to optimize cryogenic systems as a whole.

Keywords: turboexpander; testing; automation means and methods; energy characteristics; stability; strength

For citation: V.M. Mamedov, I.A. Arkharov. The problem of creating and developing an integrated approach to standardizing the process of automated testing of turboexpanders. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(2):23-30. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-23-30

Введение. Развитие нефте- и газоперерабатывающей отрасли в условиях санкционного давления способствовало укреплению позиций отечественных научно-производственных и производственных объединений на рынке турбодетандеров, турбокомпрессоров и турбоагрегатов. Анализ показал, что до 2035 года только на объектах ПАО «Газпром» потребность в крупнотоннажных агрегатах оценивается в 113 единиц [1], а в компактных турбоагрегатах в составе газораспределительных сетей – 589 единиц [2]. На государственной площадке zakupki.gov.ru за последние 10 лет по теме турбодетандеров и турбоагрегатов было размещено более 2300 заявок [3] на изготовление, научно-исследовательские и ремонтные работы, поставку запасных частей и пр.

Наиболее остро стоит проблема отсутствия нормативной документации, регламентирующей порядок проведения испытаний существующих и вновь разрабатываемых турбодетандеров. При этом технические требования и методы испытаний турбокомпрессоров ввиду их повсеместной распространенности в общепромышленном и специальном исполнении представлены в государственных стандартах Российской Федерации [4, 5]. Для турбодетандеров аналогичные документы не разработаны, поэтому комплексный методичный подход к отработке процесса испытаний машин расширительного типа является актуальным.

Постановка задачи. Решение этой проблемы предлагается начать с определения перечня испытаний, выделения актуальных характеристик машин расширительного типа, которые должны быть получены и проанализированы по итогам проведения экспериментальных исследований, и формулирования требований к средствам автоматизации, непосредственно реализующим процесс испытаний турбодетандеров.

Согласно [6], под испытаниями в общем случае понимается процесс экспериментального определения количественных и/или качественных характеристик свойств объекта испытаний при его функционировании в условиях воздействия внешних факторов. Выделяют 9 категорий и 47 видов испытаний, 9 из которых могут проводиться для турбодетандеров с использованием автоматизированных средств, классифицируемых:

1. В соответствии с назначением:
 - исследовательские – испытания, проводимые для определения наиболее важных с практической и научной точки зрения характеристик машины;
 - сравнительные – испытания аналогичных по характеристикам или одинаковых машин, проводимых в идентичных условиях для сравнения характеристик их свойств;
 - определительные – испытания, проводимые для определения значений характеристик машины с заданными значениями показателей точности и/или достоверности;
2. В соответствии с приемочными процедурами готовой продукции:
 - приемо-сдаточные – контрольные испытания машин при приемочном контроле;

- типовые испытания – контрольные испытания производимых машин, проводимые с целью оценки эффективности и целесообразности изменений, вносимых в конструкцию или технологический процесс;

3. В соответствии с условиями и местом проведения испытаний:

- стендовые – испытания, проводимые на испытательном оборудовании, обеспечивающем воспроизведение условий испытаний;
- эксплуатационные – испытания, проводимые в реальных условиях эксплуатации, обеспечивающие наработку наиболее полного и достоверного объема данных о характеристиках свойств объекта испытаний;

4. В соответствии с результатом воздействия внешних факторов:

- испытания на прочность отдельных элементов – испытания, проводимые для установления факта сохранения элементами механической прочности в процессе эксплуатации и при незначительном превышении рабочих параметров;
- испытания на устойчивость – испытания, проводимые для установления факта сохранения устойчивости изделия в процессе эксплуатации и при незначительном превышении рабочих параметров;

5. В соответствии с определяемыми характеристиками объекта – состав и объем испытаний определяется назначением изделия и программой испытаний.

Методы исследования. Для всех видов предложенных испытаний определены общие целевые характеристики машин, представляющие наибольший научный и практический интерес и требующие контроля:

Изоэнтропный КПД, который на этапе расчета и проектирования турбодетандера назначается исходя из опытно-статистических данных об эксплуатации типовой или подобной машины. Степень соответствия значений изоэнтропного КПД, принятого при расчетах, и фактического в большей степени характеризует качество разработанной конструкции, эффективность принятых технических и технологических решений. Разработка новых турбодетандеров с применением прогрессивных конструкционных материалов, прецизионных средств механической обработки и внедрения алгоритмов CDF-оптимизации требует накопления и систематизации опытных данных об эффективности вновь разработанных машин для уточнения существующих рекомендаций при назначении изоэнтропного КПД в процессе расчета.

Крупные турбодетандеры зачастую оснащены регулируемым сопловым аппаратом, что позволяет динамически подстраивать производительность машины с учетом параметров расширяющегося потока. В этом случае особую ценность представляет не номинальное значение изоэнтропного КПД, приведенное к скоростному коэффициенту, а зависимость варьируемого геометрического параметра, чаще – угла установки сопла (процента открытия сопла, процента вылета зубчатой рейки механического привода соплового аппарата и пр.).

Определение изоэнтропного КПД в процессе испытаний сопровождается трудностью в обеспечении автомодельности процесса расширения, поскольку присутствуют различия в рабочей среде, ее теплофизических параметрах, расходе и условиях окружающей среды. Условия и критерии автомодельности процесса расширения широко описаны в печатных изданиях для турбодетандеров классических криогенных систем с относительно небольшой производительностью. При этом вопрос достижения автомодельности в условиях перехода от многокомпонентной смеси углеводородов к воздуху или азоту и правомерности такого перехода по существующим методикам является открытым и требует экспериментального исследования.

Устойчивость ротора и рабочих колес. Отечественный опыт разработки криогенных турбодетандеров показывает, что подавляющее большинство машин имеют жесткий ротор (рабочая частота вращения меньше первой собственной частоты) с запасом до первой критической частоты порядка 1,2...1,4. К ним относятся газовые и парожидкостные

турбодетандеры, работающие в классических криогенных циклах термостатирования и ожижения с чистыми рабочими веществами (продукты разделения воздуха, водород, неон, гелий и др.). Расчетное определение собственных частот выполняется с составлением принципиальной модели ротора и использованием модуля «роторная динамика» в NX.Nastran, а оценка результатов чаще проводится по диаграммам Кэмпбелла.

С учетом активного развития рынка энергетических ресурсов и возникновения потребности в разработке и производстве крупнотоннажных турбодетандерных агрегатов, работающих на смеси углеводородов в составе нефте- и газоперерабатывающих комбинатов, требуется экспериментальное обоснование устойчивости их роторов и рабочих колеса. В качестве подвеса ротора в таких машинах используются активные магнитные подшипники, за счет чего отсутствует конструктивная необходимость в развитии центральной части ротора в радиальном направлении, что заведомо приводит к снижению значения первой собственной частоты.

Для крупнотоннажных турбоагрегатов запас до первой критической частоты составляет не более 10 % относительно рабочей. При этом система защиты активного магнитного подвеса препятствует набору частоты в области резонанса.

В тоже время диапазон регулирования соплового аппарата смещен в область большего сечения горла, так, что при расчетном положении сопел процент открытия аппарата находится в пределах 25-35 %. Такое решение позволяет уменьшить частоту вращения ротора ценой снижения общей эффективности машины. Отсюда следует необходимость комплексного анализа эффективности машин во всем доступном диапазоне регулирования, в том числе с определением запаса по устойчивости. В случае испытаний турбодетандера с гибким ротором (рабочая частота вращения превосходит первую собственную частоту) система нормальной эксплуатации активного магнитного подвеса реализует режимы ускоренного прохождения резонансной зоны, а на этапе проектирования назначаются зазоры большей величины между подвижными и неподвижными элементами машины. Контроль прохождения резонансной зоны сопровождается записью тренда изменения вибрационной характеристики турбоагрегата.

Прочность рабочих колес ограничивает возможность разработки и производства высокооборотных крупнотоннажных турбоагрегатов. Для технологически рациональных конструкционных материалов (алюминиевых сплавов), применяемых при изготовлении рабочих колес, величина окружной скорости ограничена 300...320 м/с.

Использование труднообрабатываемых титановых сплавов позволяет достичь величины окружной скорости на уровне 500...520 м/с. Помимо выбора материала существуют конструктивные решения, повышающие прочность рабочих колес, в том числе переменная толщина корня лопаток, установка покрывного диска и др. Для качественной оценки прочности рабочих колес и устойчивости ротора турбоагрегата подвергается в процессе испытаний нагрузкам, при которых частота вращения ротора превышает номинальную рабочую на 3...20 % с контролем вибрационной характеристики.

Вибрационная характеристика турбодетандера представляет большой практический интерес, поскольку для каждого элемента машины могут быть выявлены спектральные составляющие частот, на основе которых возможна разработка система вибродиагностики реального времени для формирования рекомендаций о назначении внепланового технического осмотра и ремонта, принятия корректирующих мер в случае обнаружения неисправности того или иного узла машины. Должным образом в государственных стандартах отражен процесс исследования вибрационных характеристик машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками [7, 8].

Для выявления соответствующих зависимостей необходима наработка экспериментальных и эксплуатационных данных для групп машин, в которых используются одинаковые по принципу действия элементы и узлы. Применение нейронного сетевого аппарата при достаточном количестве размеченных данных потенциально может выявить более

широкий диапазон признаков изменения технического состояния машины во времени. Пример такой сети для расчета вибрационной характеристики ротора представлен в [9].

Шумовая характеристика турбодетандеров дает качественное представление о техническом состоянии машины, в случае, когда попадание инородного тела в проточную часть или кавитация приводят к изменению интенсивности или тональности звуковых волн, исходящих из мест возникновения механического трения в машине.

На сегодняшний день общая оценка технического состояния турбодетандеров в составе системы криогенного обеспечения сверхпроводящего комплекса на базе мегапроекта NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility, г. Дубна) осуществляется специалистом посредством акустического контроля через трубку-резонатор органом слуха. Аналогичный принцип, реализованный с использованием средств автоматизации, позволит контролировать и анализировать состояние машины в комплексной системе диагностики в режиме реального времени.

Обсуждение результатов. С учетом предложенного перечня испытаний турбодетандеров и актуальных к исследованию характеристик низкотемпературных машин можно определить цель, которая должна выполняться при использовании тех или иных средств проведения испытаний, в том числе автоматизированных: сборе, разметке, структурировании, анализе и хранении данных об изменении состояния машины, теплофизических параметров рабочей среды, конструктивных особенностей и пр.

Средство проведения испытаний должно занимать существенную роль в жизненном цикле турбодетандера, поскольку наработанные данные полезны:

- на этапе разработки и проектирования машины, аналогично турбокомпрессорам [10, 11];
- в процессе эксплуатации машины для оценки деградации ее элементов и узлов на основании прямого сравнения с эталонными значениями [12];
- для обучения нейронных сетей контроллера и аппроксиматора в составе дискретного нейронного сетевого регулятора [13, 14];
- для создания агрегированных цифровых двойников турбодетандеров в целях оптимизации криогенных систем в целом [15], а также для VR-тренажеров (Virtual Reality) технических систем [16, 17];
- при верификации численных, аналитических и CFD-методик расчета за счет возможности многократного использования размеченных данных [18, 19];
- при создании и обучении нейронных сетевых аппроксиматоров расчетных методик [9] и CFD-алгоритмов расчета;
- при создании и обучении нейронных сетей в составе систем предиктивной аналитики [20] и пр.

В условиях цифровой экономики такое средство должно быть автоматизированным, входить в состав системы управления жизненным циклом изделия (Product Life-Cycle Management, PLCM) и удовлетворять следующим требованиям:

- капитальные и временные затраты, а также длительность простоя готовой к отгрузке заказчику машины на испытательной площадке завода-изготовителя должны быть минимальны;
- функциональные возможности средства должны быть ориентированы на проведение испытаний турбодетандеров в широком диапазоне производительности и обеспечивать наработку всех актуальных характеристик машины вне зависимости от ее габаритов, используемого рабочего вещества и пр.;
- архитектура средства должна быть модульной, при этом каждый модуль может быть построен как на базе алгоритмических и численных расчетов, так и на результатах работы нейронных сетей;
- средство должно иметь функциональные возможности для трансляции/передачи наработанных размеченных и структурированных данных в программное

обеспечение сторонних разработчиков и поддерживать широкий набор протоколов для передачи этих данных в условиях локальной и глобальной сети;

- по результатам испытаний с использованием средства проведения этих испытаний в автоматическом режиме должен формироваться протокол, содержащий результаты замеров и расчетов всех актуальных характеристик машины, по принятой государственной или отраслевой форме с учетом пресечения несанкционированного внесения изменений в содержание наработанных данных;
- порог вхождения при использовании и внедрении средства должен быть низким, а весь функционал описан и задокументирован в руководствах по эксплуатации.

Вывод. На сегодняшний день представленные в периодических изданиях и монографиях методики проведения испытаний турбодетандеров в большей степени регламентируют последовательность действий, ориентированных на определение ограниченного набора характеристик турбодетандеров, и не нацелены на комплексное системное исследование машин с наработкой размеченных и структурированных данных с длительным жизненным циклом.

При этом в условиях цифровой экономики создание и внедрение средств автоматизации испытаний с учетом требований, изложенных в настоящей статье, в условиях возникающего спроса на разработку и изготовление отечественных турбодетандеров становится актуальной задачей.

Прежде всего, необходимость внедрения таких средств основана на острой необходимости в наработке размеченных и структурированных данных, поскольку с соответствии с приказом Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» и утвержденной в нем «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года» увеличение объема доступных данных, прошедших разметку и структурирование является основным фактором развития технологии искусственного интеллекта, применение которого в составе систем регулирования и управления техническими системами, при оптимизации проектирования машин и в системах предиктивной аналитики реального времени уже находит практическое применение.

Библиографический список:

1. Хетагуров В.А., Слугин П.П., Воронцов М.А., Кубанов А.Н. Опыт и перспективы применения турбодетандерных агрегатов на промышленных технологических объектах газовой промышленности России. // Газовая промышленность. 2018. Т. 11, № 777. С. 14–22.
2. Яценко И.А., Хворов Г.А., Юмашев М.В., Юров Е.В. Реализация потенциала энергосбережения и повышение энергетической эффективности ПАО «Газпром» на основе применения турбодетандерных технологий // Газовая промышленность. 2017. № S1 (750). С. 60–63.
3. Мамедов В.М., Архаров И.А. Особенности энергетических и динамических испытаний крупнотоннажных турбодетандеров // Сборник Всероссийской студенческой конференции «Студенческая научная весна», посвященная 170-летию В.Г. Шухова, 2023, С. 743–745.
4. ГОСТ Р 53637-2009. Турбокомпрессоры автотракторные. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 2010–01–06. – М.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.
5. ГОСТ Р 51743-2001. Машины холодильные. Машины для охлаждения жидкости на базе турбокомпрессоров. Методы испытаний. – Введ. 2002–01–01. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 21 с.
6. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Введ. 1982–01–01. М.:Стандартинформ, 2011. 24 с.
7. ГОСТ Р ИСО 14839-2-2011. Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 2. Оценка вибрационного состояния. – Введ. 2012–01–09. – М.: Стандартинформ, 2012. – 24 с.
8. ГОСТ Р ИСО 14839-3-2013. Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 3. Определение запаса устойчивости. – Введ. 2011–09–11. – М.: Стандартинформ, 2014. – 36 с.
9. Болотов М.А., Печенин В.А., Печенина Е.Ю., Рузанов Н.В. Алгоритм прогнозирования вибрационного состояния ротора турбины с использованием машинного обучения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 1. С. 18–27. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-18-27

10. Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Семеновский В.Б. и др. Развитие подходов и опыт оптимального проектирования центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2022. Т. 6. № 2. С. 9-20. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-9-20.
11. Каминский В.Н., Каминский Р.В., Лазарев А.В. и др. Создание стендов для контрольно-исследовательских испытаний турбокомпрессоров // Известия МГТУ «МАМИ», № 2(14), 2012, Т. 1. С. 143-148.
12. Меньшиков С.Н., Кильдияров С.С. Моисеев В.В., Полозов В.Н., Кувитченко Б.Г. Повышение качества ремонта турбодетандерных агрегатов, установленных на бованенковском НГКМ // Газовая промышленность, 2014, №3 (773). С. 28-33.
13. Мамедов В.М., Архаров И.А. Перспективы методов регулирования в инженерных системах // Холодильная техника. 2022. Т. 111, № 4. С. 213–220. DOI: <https://doi.org/10.17816/Rf321953>.
14. Yuhan Li, Haitao Hu, Rui Lei. Performance simulation and diagnosis of faulty states in air-cycle refrigeration systems in civil aircrafts // International Journal of Refrigeration, Volume 156, 2023, Pages 232-242, ISSN 0140-7007, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.10.006>.
15. Блинов В.Л., Богданец С.В. Цифровые двойники турбомашин: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. 162 с.
16. Мамедов В.М. Разработка интерактивного VR-тренажеров на базе программного обеспечения VR Concept и фреймворка Ionium Collider // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. –Т. 11, №. 9. – С. 83-91.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617337 Российская Федерация. Ionium Collider Framework для создания интерфейсов АСУ ТП: № 2023615806: заявл. 21.03.2023; опубл. 07.04.2023 / В.М. Мамедов.
18. Клименко Д.В., Тимушев С.Ф., Фирсов В.П. и др. Численное моделирование пульсаций давления в турбодетандере перспективной системы криостатирования // Динамика и виброакустика. 2014. Т. 1. № 2. С. 50-55.
19. Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Соловьева О.А. и др. Статистическая математическая модель расчета коэффициента полезного действия компрессоров турбодетандерных агрегатов: усовершенствование и идентификация // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2022, № 7, С. 68–81, DOI: 10.18698/0536-1044-2022-7-68-81.
20. Баширова Э.М., Жаринов Ю.А., Терентьев А.А. Применение нейронных сетей для решения задач прогнозирования технического состояния электрического оборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы, № 2 (18), 2022. С. 21-31.

References:

1. Hetagurov, V.A. Experience and prospects for the use of turboexpander units at field technological facilities of the Russian gas industry. V.A. Hetagurov, P.P. Slugin, M.A. Voroncov et al. *Gas industry*. 2018; 11(777):14-22. (In Russ)
2. Yacenko, I.A. Realizing the energy saving potential and increasing the energy efficiency of PJSC Gazprom based on the use of turboexpander technologies. I.A. Yacenko, G.A. Hovorov, M.V. Yumashev et al. *Gas industry*. 2017; S1 (750):60-63. (In Russ)
3. Mamedov, V.M. Features of energy and dynamic tests of large-capacity turboexpanders. V.M. Mamedov, I.A. Arkharov. *Collection of the All-Russian student conference "Student Scientific Spring"*, dedicated to the 170th anniversary of V.G. Shukhova, 2023; 743-745. (In Russ)
4. GOST R 53637-2009. Automotive turbochargers. General technical requirements and test methods. – Enter. 2010–01–06. – М.: *Standartinform*, 2010;12. (In Russ)
5. GOST R 51743-2001. Refrigerating machines. Machines for liquid cooling based on turbocompressors. Test methods. – Enter. 2002–01–01. – М.: *Standards Publishing House*, 2001; 21. (In Russ)
6. GOST 16504-81. System of state testing of products. Testing and quality control of products. Basic terms and definitions. – Enter. 1982–01–01. – М.: *Standartinform*, 2011; 24. (In Russ)
7. GOST R ISO 14839-2-2011. Vibration. Vibration of rotary machines with active magnetic bearings. Part 2. Vibration state assessment. – Enter. 2012–01–09. – М.: *Standartinform*, 2012;24. (In Russ)
8. GOST R ISO 14839-3-2013. Vibration. Vibration of rotary machines with active magnetic bearings. Part 3. Determination of the stability margin. – Enter. 2011–09–11. – М.: *Standartinform*, 2014;36. (In Russ)
9. Bolotov, M.A. Algorithm for predicting the vibration state of a turbine rotor using machine learning / M.A. Bolotov, V.A. Pechenin, E.Yu. Pechenina, et al. *Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering*. 2020; 19(1):18-27. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-18-27. (In Russ)

10. Galerkin, Yu. B., A. F. Rekstin, V. B. Semenovskiy et al Development of approaches and experience in optimal design of centrifugal compressors of turboexpander units. *Omsk Scientific Bulletin. Series "Aviation, missile and power engineering"*. 2022; 6(2) 9-20. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-9-20. (In Russ)
11. Kaminsky, V.N. Creation of stands for control and research tests of turbochargers / V.N. Kaminsky, R.V. Kaminsky, A.V. Lazarev and etc. . *News of MSTU "MAMI"*. 2(14), 2012; 1:143-148. (In Russ)
12. Menshikov, S.N. Improving the quality of repair of turboexpander units installed at the Bovanenkovo oil and gas condensate field / S.N. Menshikov, S.S. Kildiyarov, V.V. Moiseev et al. *Gas industry*, 2014; 3 (773): 28-33. (In Russ)
13. Mamedov, V.M., Arkharov I.A. Prospects for control methods in engineering systems. *Refrigeration Technology*. 2022; 111(4): 213-220. DOI: 10.17816/RF321953(In Russ)
14. Yuhua Li, Haitao Hu, Rui Lei. Performance simulation and diagnosis of faulty states in air-cycle refrigeration systems in civil aircrafts. *International Journal of Refrigeration*, 2023; 156:232-242, ISSN 0140-7007, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.10.006>.
15. Blinov, V.L. Digital twins of turbomachines: a tutorial. V.L. Blinov, S.V. Bogdanets. *Ekaterinburg: Ural Publishing House. Univ.*, 2022; 162. (In Russ)
16. Mamedov, V.M. Development of interactive VR simulators based on VR Concept software and Ionium Collider framework. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023;11(9): 83-91. (In Russ)
17. Certificate of state registration of the computer program No. 2023617337 Russian Federation. Ionium Collider Framework for creating APCS interfaces: No. 2023615806: Appl. 03/21/2023: publ. 04/07/2023 / V.M. Mamedov. (In Russ)
18. Klimenko D.V., Timushev S.F., Firsov V.P. et al. Numerical modeling of pressure pulsations in the turboexpander of a promising cryostat system. *Dynamics and vibroacoustics*. 2014; 1(2): 50-55. (In Russ)
19. Galerkin, Yu.B. Statistical mathematical model for calculating the efficiency of compressors of turboexpander units: improvement and identification. Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, O.A. Solovyova and etc. *News of higher educational institutions. Mechanical Engineering*, 2022;7: 68–81, DOI: 10.18698/0536-1044-2022-7-68-81. (In Russ)
20. Bashirova, E.M. Application of neural networks to solve problems of predicting the technical condition of electrical equipment. E.M. Bashirova, Yu.A. Zharinov, A.A. Terentyev. *Electrical engineering and information complexes and systems*, 2022; 2(18):21-31. (In Russ)

Сведения об авторах:

Владислав Марсельевич Мамедов, аспирант, ассистент, кафедры Э4 «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», инженер-конструктор 1 категории; mamedov-vm@bk.ru, ORCID 0009-0004-8780-7401

Иван Алексеевич Архаров, доктор технических наук, профессор, кафедры Э4 «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», arkharov@bmstu.ru; ORCID 0000-0002-1624-171X

Information about authors:

Vladislav M. Mamedov, Postgraduate Student, Assistant Teacher, Department E4 «Refrigeration and cryogenic technology, air conditioning and life support systems», Design Engineer I-st category; ORCID 0009-0004-8780-7401

Ivan A. Arkharov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department E4 «Refrigeration and cryogenic technology, air conditioning and life support systems», ORCID 0000-0002-1624-171X

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 15.02.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 09.03.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 09.03.2024.