

Новикова Юлия Дмитриевна

МЕТОД ПРОЕКТНОГО РАСЧЁТА
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
СО СВОБОДНОЙ ТУРБИНОЙ

2.5.15 – Тепловые, электроракетные
двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» на кафедре теории двигателей летательных аппаратов им. В.П. Лукачева.

Научный руководитель: Прокофьев Андрей Брониславович, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Ремизов Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», заведующий кафедрой «Авиационные двигатели»;

Федечкин Константин Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, Опытно-конструкторское бюро им. А. Люльки - филиал ПАО «ОДК-Уфимского моторостроительного производственного объединения», главный специалист.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита диссертации состоится 17 декабря 2024 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте: http://www.ssau.ru/resources/dis_protection/novikova/.

Автореферат разослан _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.10

Виноградов А. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Среди всех типов газотурбинных двигателей (ГТД) особое место занимают газотурбинные двигатели со свободной турбиной (ГТД СТ) – тепловые машины, в которых большая часть полезной тепловой энергии преобразуется на свободной турбине в механическую работу и отводится потребителю мощности. ГТД СТ широко применяются в составе силовых установок самолётов, вертолётных, они также используются в качестве вспомогательных силовых установок на борту летательных аппаратов.

ГТД СТ до передачи в эксплуатацию проходят испытания, в процессе которых определяется соответствие изготовленного двигателя заявленным характеристикам. Одним из наиболее дорогих с финансовой точки зрения и продолжительным по времени созданием элементом испытательных комплексов является тормозное устройство, обеспечивающее утилизацию вырабатываемой испытуемым двигателем механической энергии. Наиболее распространены тормозные устройства следующих типов: электрические, гидравлические и пневматические.

Гидравлические и электрические тормоза имеют определенные преимущества и недостатки, широко освещенные в научной литературе. В качестве тормозного устройства возможно использование пневматического загрузочного устройства. Под пневматическим тормозным устройством понимается многоступенчатый осевой компрессор (МОК) с лемнискатным насадком на входе и выхлопным устройством на выходе. Преимуществом данного тормозного устройства являются существенно меньшие габаритные размеры по сравнению с гидравлическими и электрическими тормозами даже в случае испытания двигателей большой мощности. Данный тормоз для своей работы использует атмосферный воздух. Таким образом, риск загрязнения окружающей среды сведён к минимуму. Устройство испытательного стенда не предусматривает наличие редуктора. Пневмотормоз можно выполнить мобильным за счёт его небольших габаритов и отсутствия дополнительного оборудования. Это позволяет проводить испытания не только в заводских условиях.

К недостаткам пневматического загрузочного устройства можно отнести высокую стоимость разработки компрессоров, лежащих в его основе. Снизить затраты и время на создание пневмотормозов возможно, если в качестве прототипа (далее базовый МОК) для создания пневмотормоза использовать геометрию серийно производимого авиационного компрессора и эксплуатировать детали, отработавшие свой лётный ресурс.

Предварительный экономический расчёт, включающий оценку затрат на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, затраты на технологическую подготовку производства и затраты на производство, позволил определить, что затраты по созданию МОК в случае модификации некоторых деталей базового МОК будут существенно ниже, чем выполнение полного цикла работ. Таким образом, создание пневмотормоза на базе готовых элементов конструкции базового МОК с применением деталей, отработавших лётный ресурс на авиационных двигателях, более выгодно.

В связи с этим представляется перспективным и актуальным создание метода проектного расчёта пневматического тормозного устройства на базе готовых элементов конструкций осевых компрессоров (ОК) для испытаний авиационных ГТД СТ.

Степень разработанности темы. Разработке пневматического тормозного устройства большой мощности в интервале от 500 кВт до 5000 кВт и более посвящены патенты Коротова М.В. (ПАО «ОДК Кузнецов») и Матюхина Н.Ф. (АО "НПЦ газотурбостроения "Салют"). Созданием пневматических тормозов на базе компрессоров в этом диапазоне мощностей за рубежом активно занимается компания «Concerts NREC», а также посвящен отчёт В. Янсена и А. Ф. Картера (Лейк-херст, Нью-Джерси, США).

Результаты создания тормозных устройств для исследования ВСУ, агрегатных и микротурбинных приводов мощностью от нескольких киловатт до нескольких сотен киловатт представлены в работах Емина О.Н., Быкова Н.Н., Крылова Б.А., Котляра И.В., Дорофеева В.М., Наталевича А.С., Тихонова Н.Т., Кленина Ю.П., Вьюнышева В.Н., Шевырина А.М. и др.

В настоящее время в процессе доводки компрессоров, в том числе на базе которых изготавливаются пневмотормоза, широко используются методы CFD моделирования их рабочего процесса с помощью таких программных комплексов, как ANSYS, NUMECA и др. Анализ технической литературы показал, что в настоящее время выполнено значительное количество исследований, посвящённых моделированию рабочего процесса ОК. Большой вклад в этой области внесли коллективы фирм, предприятий и университетов: ЦИАМ имени П.И. Баранова, ПАО «ОДК-Кузнецов», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «ОДК-Авиадвигатель», АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», МАИ, ПНИПУ, РГАТУ, Самарский университет, УГАТУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, и др. Следует отметить работы таких исследователей, как Иноземцев А.А., Милешин В.И., Федечкин К.С., Кривошеев И.А., Михеев М.Г., Матвеев В. Н., Попов Г.М., Горячкин Е.С. и других.

Однако, несмотря на большое количество работ, посвящённых численному моделированию рабочего процесса ОК, до настоящего момента не разработаны рекомендации по формированию конечно-элементных сеток моделей потока в ОК для расчёта границ рабочих областей пневматических тормозных устройств.

Цель работы. Повышение эффективности газодинамического проектирования пневматических тормозных устройств на базе готовых элементов конструкций ОК для испытаний авиационных ГТД СТ.

Задачи работы:

1. Создать метод проектного расчёта пневматического тормозного устройства, отличающийся использованием готовых элементов конструкций ОК под требования на испытания авиационных ГТД СТ.
2. Разработать методику выбора из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза, используемого в процессе испытаний авиационных ГТД СТ.
3. Определить закономерности смещения границ рабочей области пневматического тормоза, выполненного на базе МОК.
4. Разработать рекомендации по формированию конечно-элементных сеток моделей потока в МОК для расчёта границ рабочей области пневматического тормоза.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – рабочий процесс пневматического тормозного устройства, используемого в процессе испытаний авиационных ГТД СТ. Предмет исследования – методы формирования конфигурации пневмотормозов на базе готовых элементов конструкций МОК.

Научная новизна:

1. Разработан метод проектного расчёта пневматических тормозных устройств для испытания авиационных ГТД СТ, отличающийся применением готовых элементов конструкции ОК и алгоритмом их конструкторской доводки, с целью получения геометрии пневмотормоза.
2. Разработана методика выбора из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза, отличающаяся: рекомендациями по формированию конечно-элементных сеток моделей потока в ОК; используемыми закономерностями смещения границ рабочих областей пневматических тормозов в зависимости от установки дополнительных ступеней, величины подрезки ступеней базового компрессора и величины отбора воздуха за первой и второй ступенью.

3. Впервые выявлены количественные закономерности смещения границ рабочих областей пневматических тормозов в зависимости от установки дополнительных ступеней, величины подрезки ступеней базового компрессора и величины отбора воздуха за первой и второй ступенью. Применение одной и двух дополнительных ступеней позволяет сдвигать границы рабочих областей пневматических тормозов в зону больших значений мощности на 15,3 - 31,9 %. Подрезка ступеней на 15 - 45% даёт возможность сдвигать границы в зону меньших значений мощности на 16,7 - 54,4 %. Отборы воздуха за первой и второй ступенью на 5 и 10 % позволяют сместить границы рабочих областей в зону меньших значений мощности соответственно на 1,4 - 5,6 % и 1,4 - 10,4 %.

4. Разработаны рекомендации по формированию конечно-элементных сеток моделей потока в ОК для расчёта границ рабочей области пневматического тормоза, отличающиеся значениями параметров сеток в межлопаточном канале и по высоте проточной части компрессора. Предложено количество элементов для одного лопаточного венца в одном слое расчётной сетки выдерживать на уровне 10 500 элементов; максимальное значение коэффициента роста ячеек ER устанавливать на уровне 1,35; максимальную относительную высоту ячеек канала MR выдерживать приблизительно равной 2000. Такие рекомендации позволяют определять границы рабочих областей пневматических тормозов с необходимой точностью и приемлемым временем счёта.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов подготовки к проведению испытаний ГТД СТ, в частности, методов создания пневматических тормозных устройств на базе ОК, позволяющих эффективно проводить расчётные исследования влияния геометрических параметров пневмотормозов на их характеристики и диапазоны рабочих режимов.

Практическая значимость результатов состоит в повышении эффективности процесса создания пневматических тормозных устройств, а именно, уменьшении временных и финансовых затрат на их создание. Результаты диссертационной работы были использованы в процессе проектирования изделия ПТ-32 для испытаний двигателя НК-36СТ-32, что подтверждено актом, а также внедрены в учебный процесс института двигателей и энергетических установок Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Методы исследования. Общий методологический подход базируется на основных положениях механики жидкости и газа и теории лопаточных машин. Моделирование рабочего процесса ОК выполнялось с использованием методов расчёта трёхмерных течений, основанных на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод проектного расчёта пневматических тормозных устройств для испытания авиационных ГТД СТ.
2. Методика выбора из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза, используемого в процессе испытаний авиационных ГТД СТ.
3. Закономерности смещения границ рабочих областей пневмотормозов в зависимости от количества дополнительных ступеней, величины подрезки ступеней базового компрессора и величины отбора воздуха за первой и второй ступенью.
4. Рекомендации по формированию конечно-элементных сеток численных моделей потока в ОК, предназначенных для определения границ рабочих областей пневматических тормозов.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием сертифицированного коммерческого программного обеспечения «NUMECA Fine/Turbo» базирующегося на широко применяемых в газодинамических расчётах осреднённых по Рейнольдсу уравнениях

Навье-Стокса, а также совпадением результатов расчётов характеристик базового компрессора (на основе численного моделирования рабочего процесса) с экспериментальными данными.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались: на международной конференции «ASME 2015 Gas Turbine India Conference» (Индия, Хайдарабад, 2015г.); на международных научно-технических конференциях «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (2016г., 2018г. 2021г., 2023г.); на международной конференции «53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference» (США, Атланта, 2017г.); на международной конференции «10th International Conference Aerospace Technology, Communications and Energy Systems (Великобритания, Лондон, 2017г.)», на XXVI Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» (Красноярск, 2022г.), на научно-технической конференции «Климовские чтения - 2022» (Санкт-Петербург, 2022), на третьей всероссийской школе-конференции государственного университета «Дубна» «Фундаментальная физика и прикладные технологии» (Дубна, 2024 г.), на международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин» (Самара, 2024 г.), в центральном институте авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Москва, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 8 работ опубликовано в периодических изданиях, рекомендованных ВАК России, 5 статей - в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus; получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 189 страниц, включает 110 рисунков, 19 таблиц и 4 приложения. Библиографический список включает 102 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны объект и предмет исследования, обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения и сведения об апробации работы и публикациях.

В первой главе приведён анализ испытательного стенда ГТД СТ и процесса измерения и утилизации мощности, вырабатываемой двигателем на испытательном стенде. Выполнен сравнительный анализ существующих загрузочных устройств. Определены основные требования, предъявляемые к загрузочным устройствам: наименьшие габаритные размеры; наименьшая стоимость создания и эксплуатации; высокая точность применяемой системы измерения; широкий диапазон рабочих скоростей (в случае применения тормозного устройства при производстве и эксплуатации линейки двигателей); мобильность (в некоторых случаях существует необходимость проводить испытания ГТД СТ на месте эксплуатации).

На основе выполненного анализа выявлено, что выбор типа тормозного устройства при проектировании испытательного стенда обусловлен особенностями процесса испытаний конкретного двигателя (величиной вырабатываемой мощности, условиями проведения испытаний, климатическими ограничениями и т.д.). Применение пневмотормозов не так распространено, как гидравлических тормозных устройств, ввиду сложности и дороговизны их разработки и производства. Однако в случае, если для их создания используются готовые элементы конструкции базового МОК с применением деталей, отработавших лётный ресурс на авиационных двигателях, то стоимость пневмотормозов существенно сокращается за счёт снижения затрат на их проектирование и доводку, что подтверждается приведёнными в первой главе результатами оценки стоимости модификации ОК с целью его применения в составе пневмотормоза.

Выявлены наиболее часто применяемые варианты модификации МОК: масштабирование конструкции, изменение количества ступеней, использование регулируемых направляющих аппаратов, применение перепуска воздуха, изменение геометрии проточной части (лопаток и меридиональных обводов). Показано, что до настоящего времени отсутствует единая методика ориентировочной оценки изменения мощности компрессора при внедрении представленных выше вариантов модернизации МОК.

Анализ литературных источников также позволил сформировать рекомендации по созданию численных моделей осевых компрессоров, позволяющих с требуемой точностью за наименьшее количество времени выполнить численную симуляцию протекающего в них рабочего процесса. Однако существующие рекомендации не учитывают особенности определения границ рабочих диапазонов пневмотормозов, выполненных на базе МОК, в процессе большого числа их вариативных проектировочных расчётов.

Таким образом, обзор литературы показал, что в настоящее время отсутствует метод проектного расчёта пневматического тормозного устройства, отличающийся использованием готовых элементов конструкций ОК.

В результате описанного в первой главе анализа были сформулированы задачи исследования.

Во второй главе представлены исследования по влиянию параметров сеток конечно-элементных моделей на положение границ рабочей области пневматических тормозных устройств, выполненных на базе МОК. Проведение исследований было выполнено на базе прототипа - компрессора низкого давления перспективного двигателя производства ПАО «ОДК-Кузнецов» (далее - базовый МОК). Схема базового МОК и его параметры приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 – Параметры базового МОК

| Параметр | Обозначение | Значение |
|---|------------------------------------|-----------------------|
| Количество ступеней, шт. | z | 3 |
| Относительный диаметр втулки рабочего колеса, (первая / вторая / последняя ступень) | $\bar{d}_{вти} = D_{вти} / D_{ки}$ | 0,46 / 0,66 / 0,71 |
| Относительная высота рабочей лопатки, (первая / вторая / последняя ступень) | $\bar{h}_{ли} = h_{ли} / S_i$ | 2,37 / 2,07 / 1,82 |
| Окружная скорость на периферии РК, м/с, приведенная к стандартным атмосферным условиям (первая / вторая / последняя ступень) | $U_{пер пр}$ | 344,9 / 312,4 / 271,8 |

Численная модель базового МОК была создана в программном комплексе «NUMECA Fine/Turbo» с использованием рекомендаций, выявленных при анализе литературных источников: количество элементов для одного лопаточного венца в одном слое расчётной

сетки

$\cong 20\ 000$; безразмерный параметр, характеризующий размер элемента ближайшего к стенкам проточной части $y^+ \cong 1$; максимальное значение коэффициента роста ячеек, показывающего во сколько раз высота одной ячейки y_{i-1} больше следующей y_i , $ER = \frac{y_i}{y_{i-1}} \cong 1,2$; максимальная относительная высота ячеек канала, определяемая как отношение максимальной высоты элемента в канале y_{max} к высоте пристеночной ячейки y_{min} , $MR = \frac{y_{max}}{y_{min}} \cong 1000$. Расчёт выполнялся в стационарной постановке. Свойства рабочего тела описываются моделью идеального газа с учётом переменности теплоёмкости и вязкости в зависимости от температуры рабочего тела. Для замыкания системы уравнений Рейнольдса использовалась модель турбулентности *k-epsilon* (*k-e*). Общее число элементов составило 13 млн. элементов.

На основании экспериментальной характеристики базового МОК была сформирована его рабочая область как пневмотормоза в координатах: относительная мощность (\overline{N}_K) – относительная частота вращения компрессора (\overline{n}) (рисунок 2).

Анализ рабочей области пневмотормоза позволяет определить, что граница «запирания» компрессора, характерная для повышенных расходов воздуха через МОК, является нижней границей рабочей области пневмотормоза. Верхняя граница рабочей области пневмотормоза проходит через точки характеристики с максимальным значением мощности.

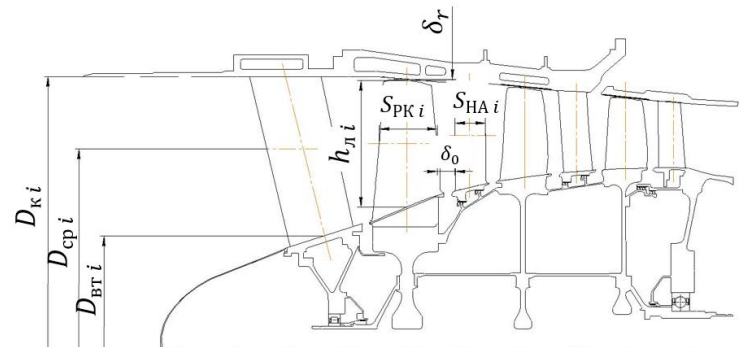


Рисунок 1 – Схема базового МОК

Таким образом, граница срывных режимов работы МОК, соответствующая пониженному расходу воздуха, не является границей рабочей области пневмотормоза. В связи с этим в рамках решаемой задачи рекомендации по формированию конечно-элементных сеток моделей потока в МОК для расчёта границ рабочей области пневматического тормоза были получены для участка характеристики от границы «запирания» до максимального значения вырабатываемой МОК мощности.

Из анализа картины течения потока в проточной части МОК на границе «запирания» (рисунок 3), полученной с помощью созданной численной модели, очевидно, что «запирание» происходит в самом узком сечении проточной части МОК, горле направляющего аппарата третьей ступени. Также можно отметить характерную для компрессора низкого давления картину: на периферии первого, второго и третьего рабочих колёс также происходит «запирание» канала. Это связано с высокими окружными скоростями в этих зонах и относительно низкими температурами потока на входе в компрессор.

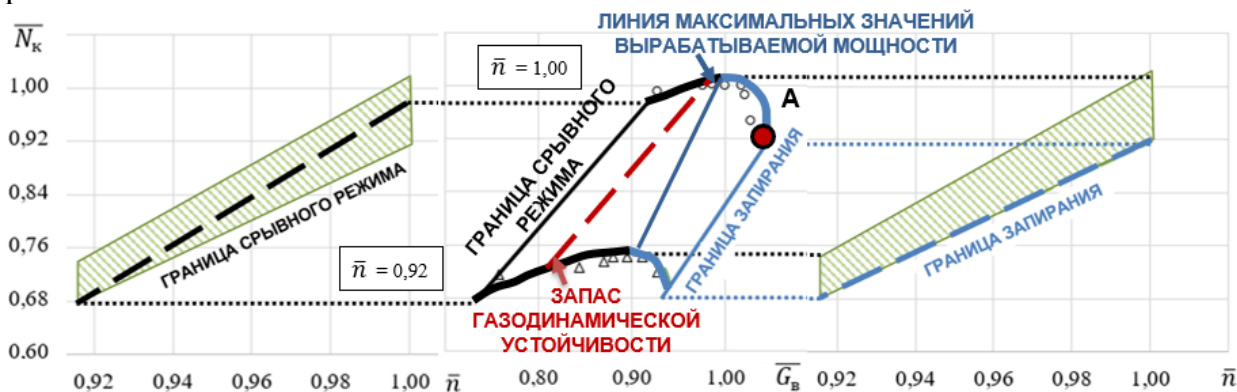


Рисунок 2 – Расположение границ работы МОК в рабочей области пневмотормоза



Рисунок 3 – Рассчитанные поля чисел Маха в относительной системе координат, полученные с помощью численной модели базового МОК в точке А (рис. 2)

Время расчёта одной точки характеристики компрессора для созданной численной модели составило в среднем 8 часов 44 минуты. Расчёты были произведены с использованием процессора Intel® Core™ i7-4790. Для ускорения процесса решения задача разделялась между семью ядрами. Принимая во внимание, что одна ветка характеристики компрессора содержит в среднем 7 точек, то время расчёта одной ветки в среднем составляет около 61 часа. Для получения рабочей области пневмотормоза необходимо получить минимум две ветки характеристики МОК. Таким образом, определение границ рабочей области одного варианта пневмотормоза (следовательно, и оценка его применимости для испытаний ГТД СТ) будет занимать в среднем не менее 5 суток. Увеличение количества рассматриваемых вариантов пневмотормоза приведёт к многократному увеличению времени проектирования пневмотормоза. В связи с этим была рассмотрена задача по уменьшению времени расчёта путём сокращения количества элементов расчётной сетки.

С целью сокращения времени расчёта проведено исследование влияния снижения числа конечных элементов модели на адекватность результатов расчёта. Установлено, что снижение числа конечных элементов для данного МОК ниже 4,6 млн. элементов до 3,4 млн. элементов, позволяет адекватно определить границу «запираания» в горле последнего направляющего аппарата МОК. Однако запираение в рабочих колесах компрессора, вызванное запираением первого рабочего колеса на периферии и распространяющееся на последующие рабочие колеса, моделируется некорректно (рисунок 4). Об этом свидетельствуют эпюры чисел Маха, построенные в области горла третьего рабочего колеса: интегральные значения чисел Маха в области периферийного сечения для сеток, насчитывающих 13 млн. и 4,6 млн. элементов, существенно больше, чем для сетки, насчитывающей 3,4 млн. элементов (рисунок 5). Также это подтверждается при сопоставлении результатов, полученных с помощью численной модели, с результатами эксперимента: точки, полученные с использованием сетки с количеством элементов менее 4,6 млн. элементов, не удовлетворяют условию адекватности.

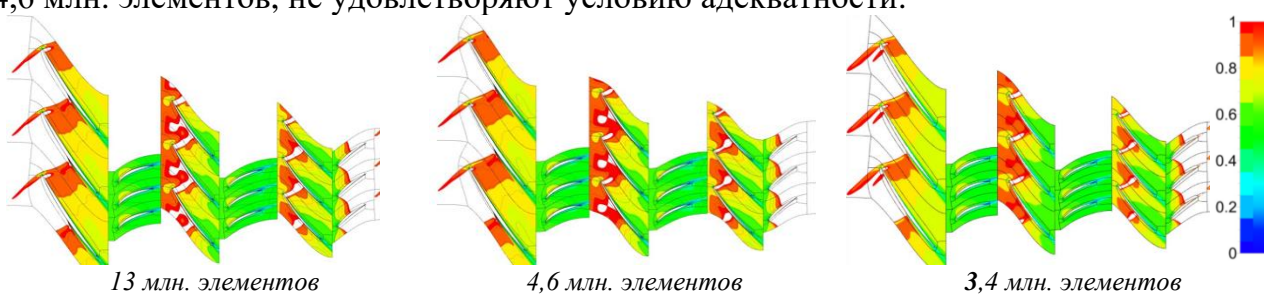


Рисунок 4 – Рассчитанные поля чисел Маха в относительной системе координат, полученные с помощью численных моделей базового МОК в точке А (рис. 2)

Для дальнейших исследований базового МОК было принято решение использовать облегчённую модель с количеством 4,6 млн. элементов и следующими параметрами: количество элементов для одного лопаточного венца в одном слое расчётной сетки $\cong 10\,500$, $y^+ \cong 1$, $ER \cong 1,35$, $MR \cong 2000$. Время расчёта одной точки характеристики компрессора для созданной численной модели составило в среднем 4 часа.

В некоторых случаях граница «Запираения» может быть не определена в процессе эксперимента, т.к. режим «Запираения» является устойчивым режимом работы компрессора, а определение границы связано с существенными финансовыми и временными затратами. Во избежание возможного попадания в зону некорректного моделирования работы компрессора при необходимости следует скорректировать нижнюю и верхнюю границы пневмотормоза, полученные расчётным путём (рисунок 6).

Таким образом, во второй главе разработаны рекомендации по формированию конечно-элементных сеток численных моделей потока многоступенчатых осевых компрессоров, сопоставимой размерности с исследуемым компрессором, для расчёта с их помощью границ рабочей области пневмотормозов.

Они сводятся к следующему:

- значение безразмерного параметра y^+ следует принимать приблизительно равным 1;
- количество элементов для одного лопаточного венца в одном слое расчётной сетки выдерживать на уровне 10 500 элементов;
- максимальное значение коэффициента роста ячеек ER устанавливать на уровне 1,35;
- максимальную относительную высоту ячеек канала MR выдерживать приблизительно равной 2000;
- при необходимости во избежание возможного попадания в зону некорректного моделирования работы компрессора следует корректировать нижнюю и верхнюю границы пневмотормоза, полученные расчётным путём.

Применение этих рекомендаций позволяет сократить время расчёта более, чем в 2 раза, и при этом обеспечить адекватность получаемых расчётных результатов экспериментальным данным.

В третьей главе представлены результаты исследований по влиянию различных вариантов модификации конструкции на смещение границ рабочей области пневмотормоза. Исследования были выполнены с помощью рекомендаций по построению численной модели рабочего процесса МОК,

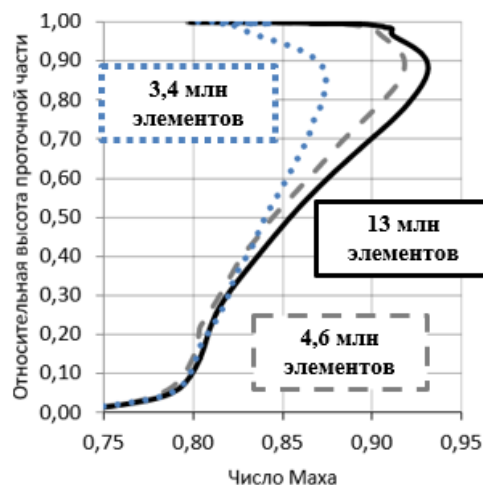


Рисунок 5 – Эпюра чисел Маха по высоте проточной части в горле рабочего колеса третьей ступени в точке А (рис.2)

описанных во второй главе.

Для исследования смещения границ рабочей области пневмотормоза было рассмотрено три типа модификаций МОК: увеличение тормозной мощности путём установки дополнительных ступеней, уменьшение тормозной мощности путём подрезки ступеней, регулирование тормозной мощности путём отбора воздуха (рисунок 7). С целью снижения затрат на создание пневмотормоза за счёт использования готовых элементов конструкции базового компрессора, в том числе с применением деталей, отработавших лётный

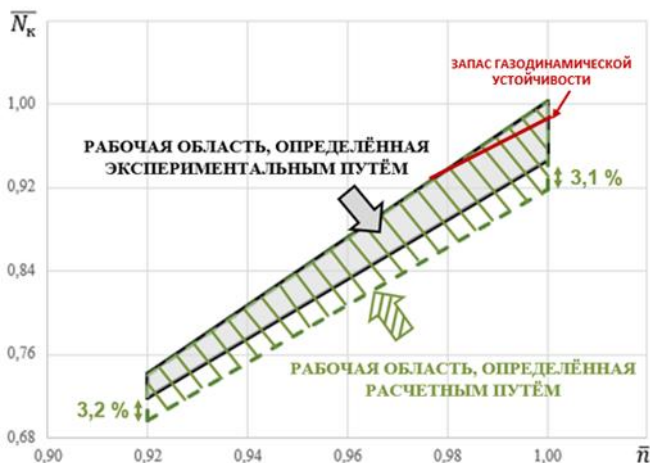
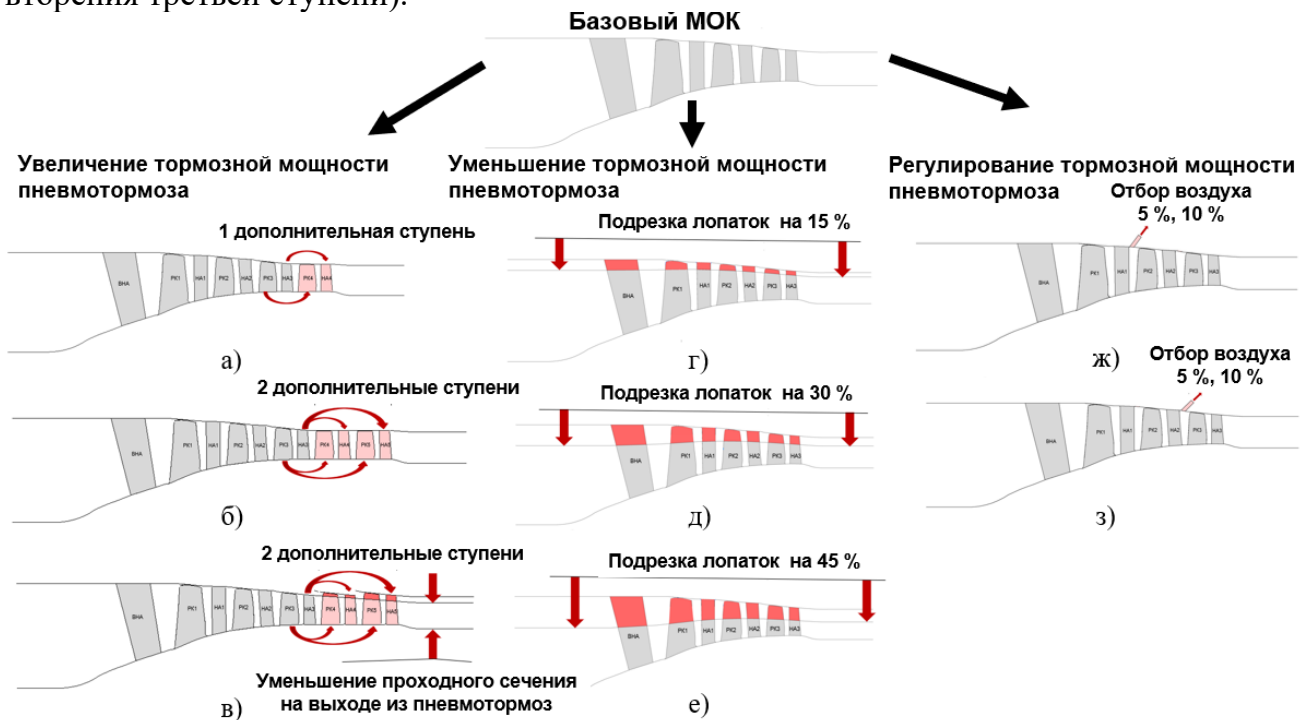


Рисунок 6 – Сопоставление рабочих областей пневмотормоза, полученных экспериментальным и расчетным путем

ресурс на авиационных двигателях, в качестве дополнительных четвертой и пятой ступеней была рассмотрена возможность применения последней (третьей) ступени базового МОК (рисунки 7а и 7б). Анализ структуры потока в межлопаточных каналах последнего направляющего аппарата пятиступенчатого компрессора показал наличие отрыва потока со спинки на втулочном сечении. Он вызван тем, что при увеличении числа ступеней и сохранении при этом исходных меридиональных обводов проточной части,

площадь проходного сечения в последних ступенях становится больше потребной, что, в свою очередь, приводит к снижению запаса газодинамической устойчивости (до 9,6 % для базового МОК на расчётном режиме, модифицированного путем двухкратного повторения третьей ступени).



- а) добавление одной ступени; б) добавление двух ступеней
- в) добавление двух ступеней и уменьшение проходного сечения на выходе из МОК
- г) подрезка лопаток МОК на 15 %; д) подрезка лопаток МОК на 30 %;
- е) подрезка лопаток МОК на 45 %; ж) отбор воздуха за первой ступенью в размере 5 и 10 %;
- з) отбор воздуха за второй ступенью в размере 5 и 10 %

Рисунок 7 – Схема вариантов модификации МОК как пневмотормоза

С целью повышения запаса газодинамической устойчивости компрессора и устранения негативных последствий дублирования ступеней также был рассмотрен вариант с уменьшенным проходным сечением на выходе из компрессора (с 0,347 до 0,325 м²) (рисунок 7в). Площадь поперечного сечения проточной части за пятой ступенью была определена в соответствии с величиной приведённой скорости потока на выходе из базового МОК. Уменьшение проходного сечения не привело к существенному изменению рабочей области пневмотормоза (рисунок 8), однако удалось добиться повышения запаса газодинамической устойчивости компрессора (с 9,6 до 11,2 %).

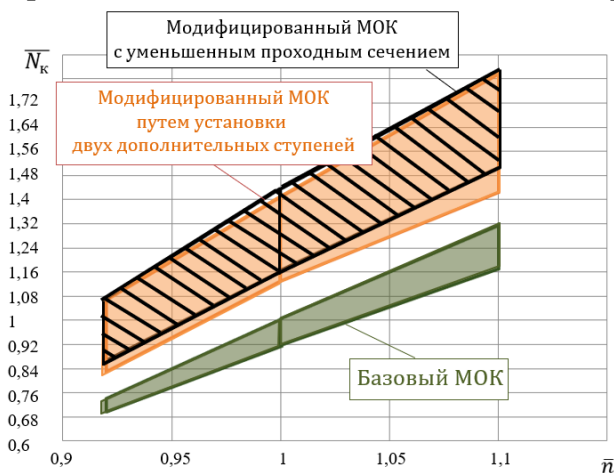


Рисунок 8 – Сопоставление рабочих областей пневмотормоза, базового и модифицированных вариантов

Уменьшение тормозной мощности пневмотормоза достигалось путём подрезки ступеней базового МОК. Было рассмотрено 3 варианта подрезки ступеней: на 15 % от высоты проточной части, а также на 30 и 45 % (рисунки 7г, 7д и 7е). Регулирование тормозной мощности было реализовано путем отбора воздуха за

второй или третьей ступенью компрессора в размере 5 и 10 % (рисунки 7ж, 7з).

В результате выполненного цикла исследований для базового МОК удалось добиться увеличения тормозной мощности более чем на 30 % и снижения мощности более чем на 50 % (таблица 2).

Анализ полученных результатов позволил выявить следующие закономерности изменения рабочей области пневмотормоза:

1. Установка дополнительных компрессорных ступеней позволяет расширить рабочую область пневмотормоза и сместить её в зону больших значений мощности.
2. Подрезка ступеней базового МОК приводит к сужению рабочей области и смещению её в зону меньших значений мощности.
3. При отборе воздуха из компрессора в большинстве случаев происходит расширение рабочей области по тормозной мощности и незначительное смещение её в зону меньших значений мощности.

Для определения ориентировочной величины сдвига области рабочих режимов по относительной тормозной мощности для *i*-го режима были предложены аналитические зависимости (таблица 3), позволяющие определить величину тормозной мощности после внедрения модификации путём дублирования ступеней и подрезки ступеней с погрешностью не более 20 %.

С использованием предложенных аналитических зависимостей была создана программа для ЭВМ «Моделирование конфигурации пневматического тормозного устройства».

Таблица 2 - Изменение положения рабочей области пневмотормоза по тормозной мощности в зависимости от режима его работы

| Изменение положения рабочей области | I доп. ступень | II доп. ступени | Подрезка на 15 % | Подрезка на 30 % | Подрезка на 45 % |
|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Расширение/сужение рабочей области | от + 1,8 до + 3,6 раз | от + 2,7 до + 6 раз | от - 1,2 до - 1,3 раз | от - 1,3 до - 2,0 раз | от - 1,7 до - 2,5 раз |
| Смещение рабочей области | от + 15,3 % до + 16 % | от + 29,6 % до + 31,9 % | от - 16,7 % до - 20,8 % | от - 34,7 % до - 38,4 % | от - 51,4 % до - 54,4 % |
| Изменение положения рабочей области | Отбор за 1 ступенью (5 %) | Отбор за 1 ступенью (10 %) | Отбор за 2 ступенью (5 %) | Отбор за 2 ступенью (10 %) | |
| Расширение/сужение рабочей области | от - 1,3 до + 1,4 раз | от 1,0 до + 2,4 раз | от 1,0 до + 1,8 раз | от + 1,2 до + 2,2 раз | |
| Смещение рабочей области | от - 1,4 % до - 5,6 % | от - 1,4 % до - 8 % | от - 2,8 % до - 4,8 % | от - 5,6 % до - 10,4 % | |

Таблица 3 - Ориентировочная оценка смещения рабочей области пневмотормоза

| Модификация путём установки дополнительных ступеней | Модификация путём подрезки ступеней |
|--|--|
| $\frac{\bar{N}_{\text{мод}i} - \bar{N}_{\text{баз}i}}{\bar{N}_{\text{баз}i}} \cdot 100\% = \left(\frac{\pi_{\text{к мод}i}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\pi_{\text{к баз}i}^* \frac{k-1}{k} - 1} - 1 \right) \cdot 100\%$ | $\frac{\bar{N}_{\text{баз}i} - \bar{N}_{\text{мод}i}}{\bar{N}_{\text{баз}i}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{F_{\text{км}i}}{F_{\text{кб}i}} \right) \cdot 100\%$ |

В четвёртой главе на основе выявленных закономерностей изменения рабочей области пневмотормоза и полученных рекомендаций по формированию конечно-элементных сеток численных моделей потока в МОК была сформирована методика выбора из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза, используемого в процессе испытаний авиационных ГТД СТ. Алгоритм, описывающий суть методики, представлен на рисунке 21 (1 этап).

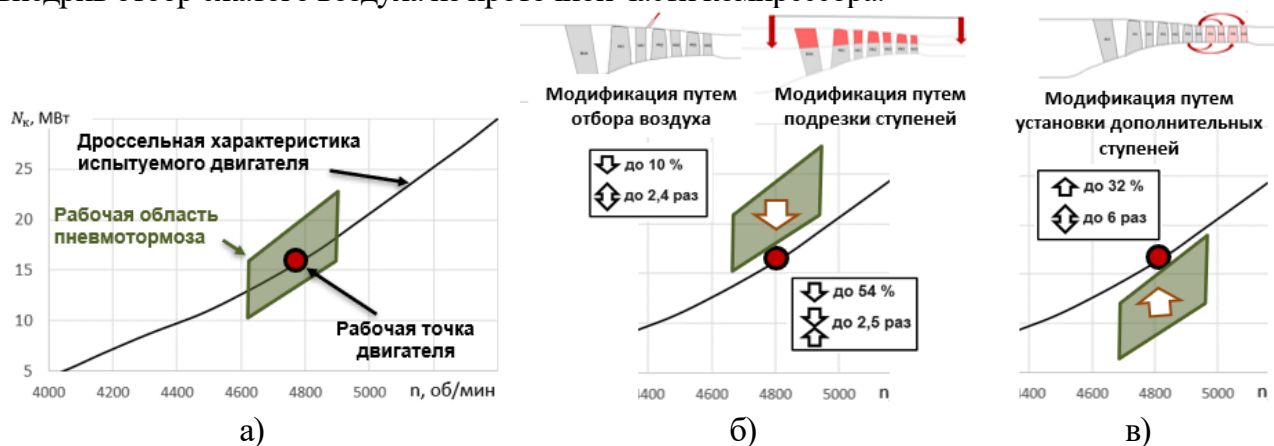
В рамках предлагаемой методики необходимо выполнить графическое сопоставление характеристик двигателя и пневмотормоза. Для этого необходимо построить дроссельную характеристику ГТД СТ и нанести на неё диапазон или конкретные точки рабочих режимов двигателя. Далее необходимо на этот график нанести рабочую область пневмотормоза (рисунок 9).

В результате сопоставления рабочей области пневмотормоза с дроссельной характеристикой двигателя возможны три случая их взаимного расположения:

- рабочая область пневмотормоза полностью перекрывает исследуемые участки дроссельной характеристики (рисунок 9а). В этом случае следует переходить к газодинамическому численному моделированию рабочего процесса в 3D постановке модернизированного МОК.

- рабочая область находится выше исследуемого участка дроссельной характеристики (рисунок 9б). В этом случае необходимо смоделировать подрезку ступеней базового МОК путём применения предложенных аналитических зависимостей без выполнения 3D симуляций. В случае незначительного превышения тормозной мощности её уменьшения возможно добиться, внедрив отбор сжатого воздуха из проточной части компрессора.

- рабочая область находится ниже исследуемого участка дроссельной характеристики (рисунок 9в). В этом случае необходимо рассмотреть установку дополнительных ступеней для увеличения тормозной мощности, используя предложенные аналитические зависимости без выполнения 3D симуляций. Незначительного уменьшения тормозной мощности можно добиться, внедрив отбор сжатого воздуха из проточной части компрессора.



- рабочая область полностью перекрывает исследуемый участок дроссельной характеристики;
- рабочая область расположена выше исследуемого участка дроссельной характеристики;
- рабочая область расположена ниже исследуемого участка дроссельной характеристики.

Рисунок 9 – Сопоставление рабочей области пневмотормоза с дроссельной характеристикой испытуемого двигателя

Таким образом, применение выявленных закономерностей и предложенных аналитических зависимостей позволяет в короткий срок сформировать стратегию модификации базового МОК с целью создания на его основе пневмотормоза. В случае, если ни один из предлагаемых вариантов не позволяет добиться перекрытия рабочей областью пневмотормоза исследуемого участка дроссельной характеристики, то необходимо вернуться к этапу поиска МОК, обладающего потенциалом для создания на его основе пневмотормоза.

Для уточнения положения границ рабочей области пневмотормоза и оценки запаса газодинамической устойчивости в рамках данной методики предлагается выполнить численное моделирование рабочего процесса, модернизированного МОК. Для этого создается численная модель рабочего процесса базового МОК с использованием рекомендаций по формированию конечно-элементных сеток, полученных во второй главе, и выполняется её верификация с использованием экспериментальных характеристик базового МОК. При выявлении несоответствия запаса газодинамической устойчивости предъявляемым требованиям необходимо скорректировать газодинамические обводы проточной части и/или геометрию профилей лопаток.

С целью обеспечения запуска и выхода на режим испытуемого двигателя и исключения разрушения пневмотормоза на малых частотах вращения на данном этапе при необходимости (существенном уменьшении проходного сечения на выходе из компрессора) следует выполнить численное моделирование рабочего процесса модернизированного МОК в эксплуатационном диапазоне частот вращения и рассмотреть возможность регулирования компрессора на режимах запуска.

В результате использования методики выбора из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза, формируется геометрия проточной части МОК, отвечающая всем заявленным требованиям для создания на её основе пневмотормоза, а также численная модель потока в МОК, содержащая расчётные значения газодинамических параметров потока в проточной части. В дальнейшем полученные результаты предполагается использовать для решения таких задач, как прочностная доводка, тепловой анализ и т.д.

Выполнена апробация предлагаемой методики выбора из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза, используемого в процессе испытаний авиационных ГТД СТ. В связи с расширением семейства двигателей НК-36СТ, производства ПАО «ОДК-Кузнецов», предназначенных для газоперекачивающих агрегатов, возникла необходимость в создании нового, более мощного тормозного устройства. Одним из требований, предъявляемых к данному устройству, стала его универсальность: пневмотормоз должен позволять испытывать двигатели мощностью 25 МВт (соответствует частоте вращения 5000 мин⁻¹) и новые, мощностью 32 МВт (соответствует частоте вращения 5500 мин⁻¹).

В качестве базового МОК был выбран компрессор низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя, производства ПАО «ОДК-Кузнецов», включающий три вентиляторные ступени, стойку опоры и направляющий аппарат во втором контуре (рисунок 10). Сопоставление рабочей области выбранного МОК и дроссельных характеристик испытуемых двигателей представлено на рисунке 11. Очевидно, что тормозной мощности базового МОК недостаточно для поглощения вырабатываемой испытываемыми двигателями мощности (рабочая область пневмотормоза не перекрывает требуемые рабочие точки А и Б).

С использованием созданной программы для ЭВМ, реализующей автоматизированный подбор конфигурации пневмотормоза, был смоделирован вариант модификации базового компрессора путём добавления одной дополнительной ступени, дублирующей третью ступень базового МОК (рисунок 12). В результате моделирования было получено, что предлагаемый вариант модификации позволит поглотить всю вырабатываемую в процессе испытаний мощность (рисунок 13) (рабочая область пневмотормоза перекрывает требуемые рабочие точки А и Б).

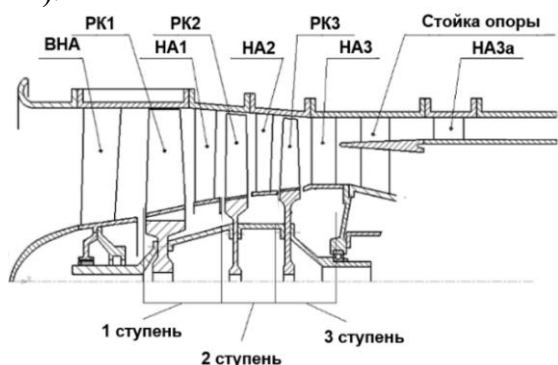


Рисунок 10 – Схема компрессора низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя (базовый МОК)

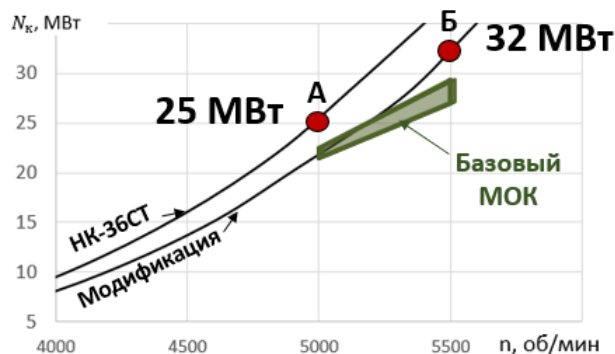


Рисунок 11 – Сопоставление рабочей области пневмотормоза с дроссельными характеристиками испытуемых двигателей

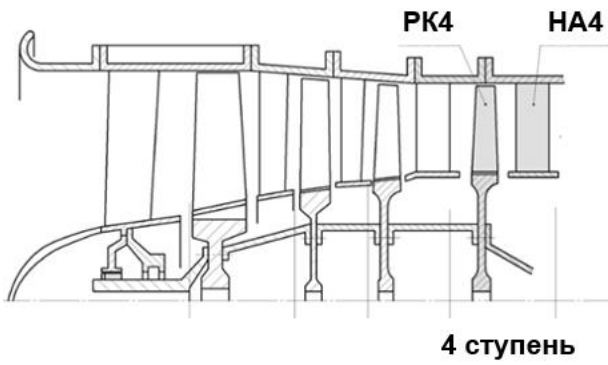


Рисунок 12 – Схема модифицированного МОК

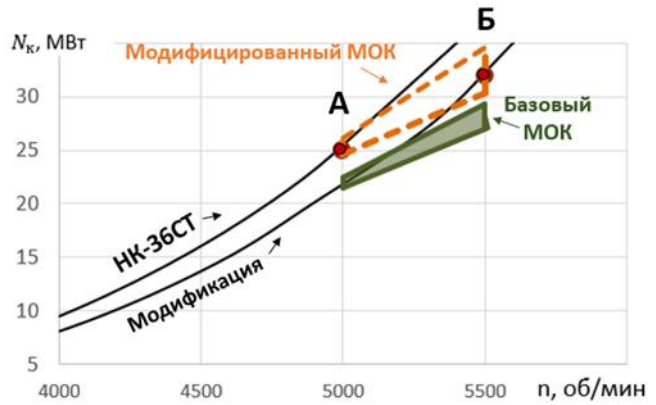


Рисунок 13 – Сопоставление рабочей области пневмотормоза, модернизированного путем дублирования ступени, с дроссельными характеристиками испытываемых двигателей

Далее была создана численная модель рабочего процесса модифицированного МОК с учётом рекомендаций, полученных во второй главе, и верифицирована по экспериментальным характеристикам. Анализ результатов, полученных с помощью численной модели, показал, что предлагаемая конструкция пневмотормоза позволяет утилизировать требуемую мощность в 25 МВт при частоте вращения 5000 мин^{-1} и в 32 МВт - при частоте вращения 5500 мин^{-1} , однако, компрессор данной конструкции обладает малыми запасами устойчивой работы: 5,8% и 6,11% при 5000 мин^{-1} и 5500 мин^{-1} соответственно (рисунок 14). Анализ картины течения потока в проточной части показал, что причиной низких запасов является срыв потока со спинки лопаток четвёртой ступени во втулочном сечении (рисунок 15). С целью устранения срыва был рассмотрен вариант уменьшения площади проходного сечения на выходе из МОК (с $0,825$ до $0,785 \text{ м}^2$). Внедрение предлагаемой модификации периферийного обвода привело к увеличению запасов устойчивой работы компрессора: до 11,25% для частоты вращения 5000 мин^{-1} и до 10,93% - для 5500 мин^{-1} (рисунок 16). Анализ структуры потока показал, что за счёт изменения периферийного обвода отрыв потока в рабочем колесе был устранен, а в направляющем аппарате - существенно уменьшился (рисунок 17).

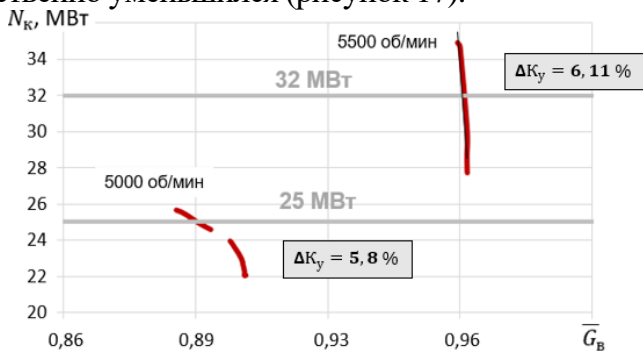


Рисунок 14 – Мощностная характеристика модифицированного МОК (вариант без уменьшения проходного сечения)

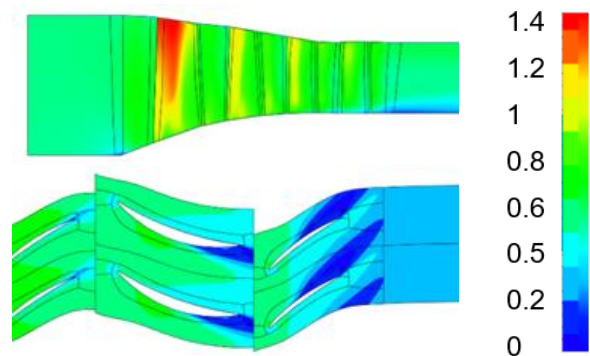


Рисунок 15 – Рассчитанные поля чисел Маха в относительной системе координат во втулочном сечении в рабочей точке

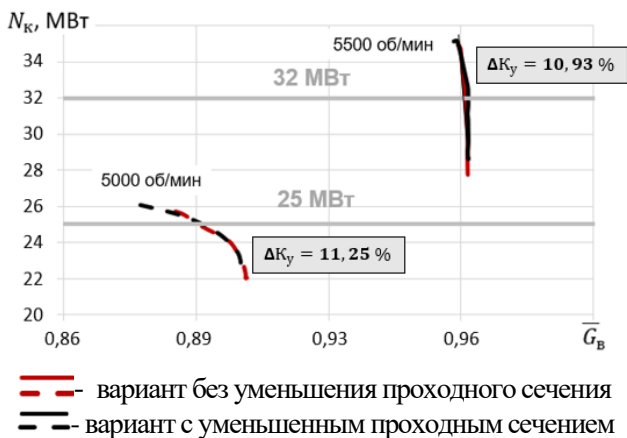


Рисунок 16 – Мощностная характеристика модифицированного МОК

Апробация разработанной методики выбора из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза, используемого в процессе испытаний авиационных ГТД СТ позволила осуществить газодинамическое проектирование и доводку пневматического тормозного устройства на базе компрессора низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя производства ПАО «ОДК-Кузнецов» для нужд предприятия. Полученная конфигурация пневматического тормоза позволяет утилизировать мощность 25 МВт при частоте вращения выходного вала $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ и 32 МВт при $n=5500 \text{ мин}^{-1}$. Конструкция пневматического тормоза была создана с максимальным сохранением деталей компрессора - прототипа, что позволит изготовить его с минимальными затратами времени и материальных средств. Пневматический тормоз обеспечивает запас устойчивой работы не менее 10,9 %.

Анализ полученной геометрии модифицированного МОК показал, что использование в качестве базового ранее входящего в состав ГТД компрессора приводит к образованию остаточной закрутки потока на выходе из него, что может стать причиной существенных потерь энергии в выходном устройстве. Остаточная закрутка на выходе из спроектированного компрессора составила в среднем 31° от оси вращения.

Для устранения остаточной закрутки за направляющим аппаратом четвертой ступени было предложено установить спрямляющий аппарат. Такая компоновка пневматического тормозного устройства со спрямляющим аппаратом показана на рисунке 18. Предполагается выполнение лопаток спрямляющего аппарата из листа шириной 4 мм, с последующей обработкой его кромок (рисунок 19). Также в данной компоновке были введены углы наклона периферийного и втулочного обводов, 7° и 10° , соответственно. Величина наклона втулочного обвода была выбрана из соображений размещения заднего подшипникового узла с необходимыми системами, в том числе для размещения сменной шайбы, применяемой для разгрузки подшипника от осевых сил.

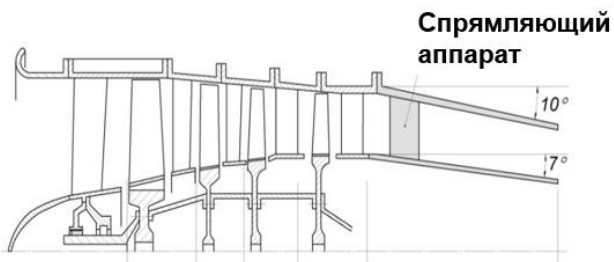


Рисунок 18 – Схема пневмотормоза со спрямляющим аппаратом

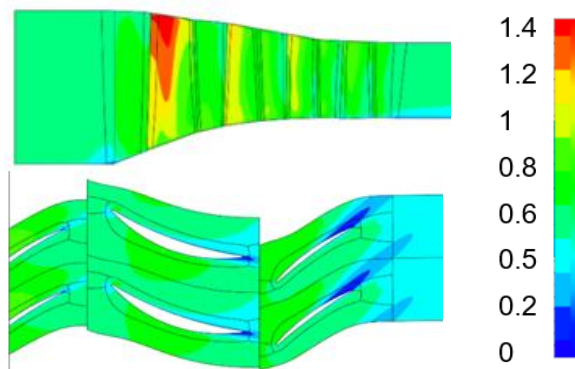


Рисунок 17 – Рассчитанные поля чисел Маха в относительной системе координат во втулочном сечении в рабочей точке (с уменьшенным проходным сечением)

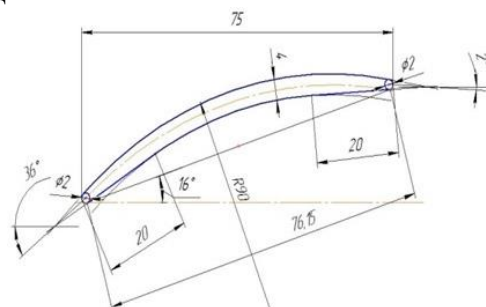


Рисунок 19 – Геометрия спрямляющего аппарата

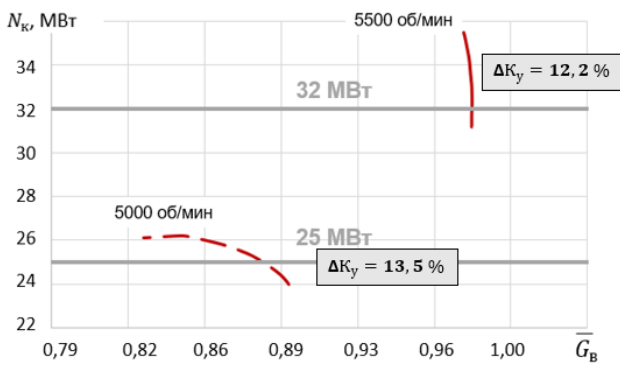


Рисунок 20 – Мощностная характеристика пневмотормоза со спрямляющим аппаратом

Анализ результатов расчёта и построенной на их основе мощностной характеристики показал, что предлагаемая компоновка четырёхступенчатого пневматического тормозного устройства со спрямляющим аппаратом позволяет утилизировать требуемую величину мощности на основных режимах работы испытуемых двигателей, обеспечивая осевое вытекание потока. При этом запас устойчивой работы пневмотормоза составляет не менее 12,2 % (рисунок 20).

Определены параметры специального выходного устройства, обеспечивающего требуемый уровень противодействия на выходе из пневмотормоза, который необходим для утилизации пневмотормозом требуемой мощности. Величины площадей, а также втулочных и периферийных диаметров на срезе сопла на двух режимах работы при частотах вращения 5000 мин⁻¹ и 5500 мин⁻¹ представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Величины внутреннего и периферийного диаметров сопел для двух режимов работы

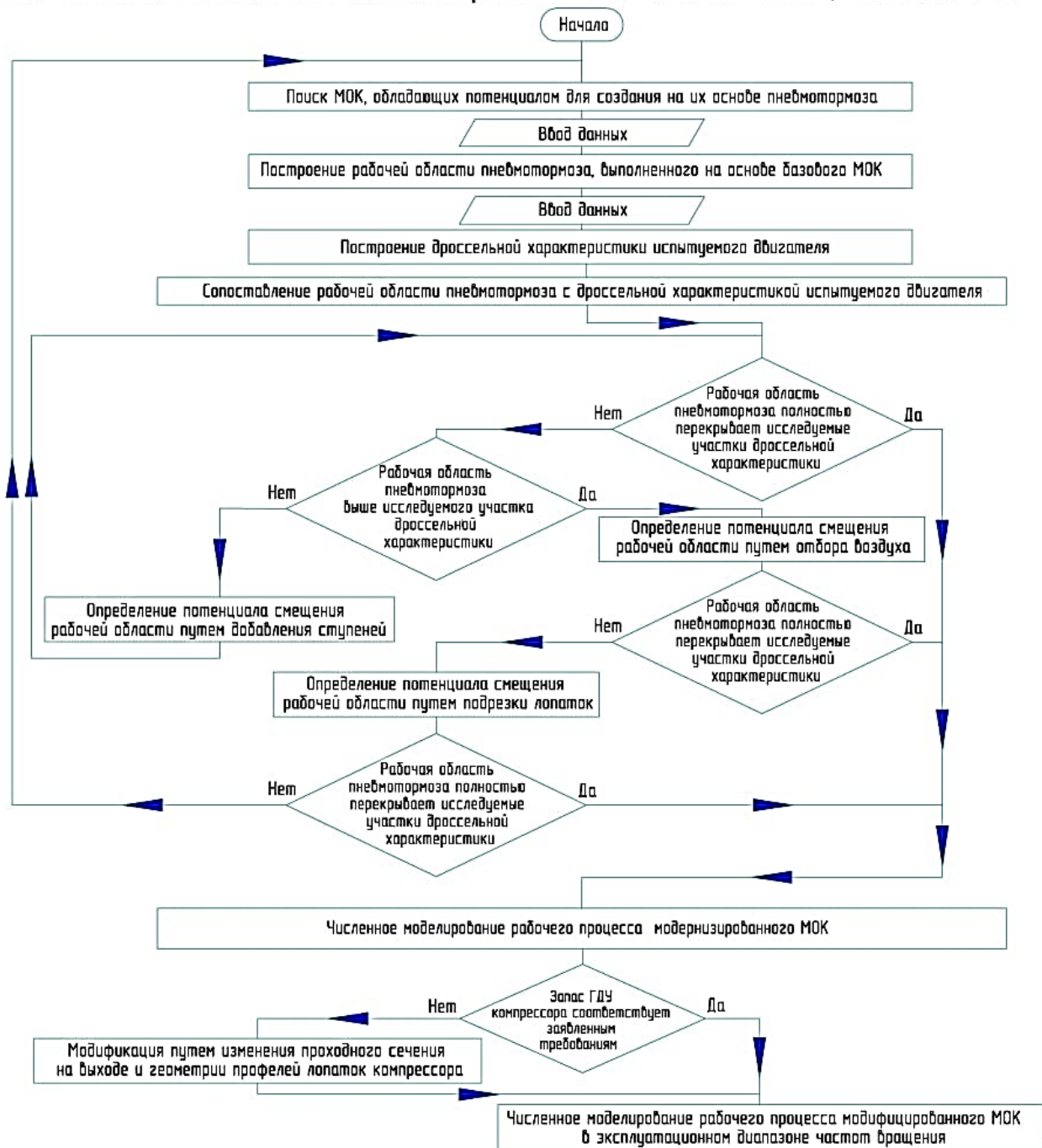
| n , об/мин | F_c , м ² | $D_{вт}$, м | D_k , м |
|--------------|------------------------|--------------|-----------|
| 5000 | 0.471 | 0.509 | 0.927 |
| 5500 | 0.493 | 0.526 | 0.951 |

Площади сопел для этих двух режимов отличаются друг от друга незначительно (разница не более 5%). По этой причине было принято решение оснастить пневмотормоз единым унифицированным соплом, площадь которого составила 0,482 м². Такое решение, хотя и несколько смещает рабочие точки пневмотормоза от проектных, но позволяет снизить его стоимость. Также упрощается процесс испытания двигателей разных мощностей, так как не требуется смена сопел пневмотормоза при переходе с одного двигателя на другой.

Для проверки правильности принятого решения было выполнено численное моделирование рабочего процесса в четырёхступенчатом пневмотормозе совместно с унифицированным соплом. В результате были определены интегральные параметры пневмотормоза на двух режимах его работы с учётом совместной работы со спрямляющим аппаратом и соплом. Получено, что четырёхступенчатый пневмотормоз с унифицированным соплом позволяет при $n=5000$ мин⁻¹ утилизировать мощность 25 МВт и при $n=5500$ мин⁻¹ - 32 МВт с погрешностью, не превышающей 0,3 МВт (менее 1,5%).

Результатом проделанной работы стало создание метода проектного расчёта пневматических тормозных устройств для испытания авиационных ГТД СТ, отличающегося применением готовых элементов конструкции ОК и алгоритмом их конструкторской доводки с целью получения геометрии пневмотормоза (рисунок 21). Метод включает в себя два этапа. Первый этап представляет собой реализацию методики выбора из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза, используемого в процессе испытаний авиационных ГТД СТ. Второй этап включает обязательную последующую конструкторскую доводку пневмотормоза, состоящую из разработки спрямляющего аппарата и сопел с центральным телом.

1 ЭТАП: Выбор из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза для испытаний авиационных ГТД СТ



2 ЭТАП: Конструкторская доводка пневмотормоза

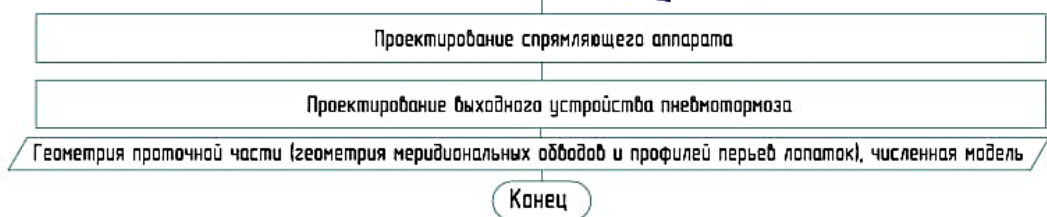


Рисунок 21 – Алгоритм проектного расчёта пневматического тормозного устройства для испытаний газотурбинных двигателей со свободной турбиной

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена важная научно-техническая задача повышения эффективности газодинамического проектирования пневматических тормозных устройств на базе готовых элементов конструкций серийно производимых осевых компрессоров авиационных газотурбинных двигателей.

1. Предложен подход к созданию пневматических тормозов с использованием готовых элементов конструкции серийно-производимых авиационных компрессоров, отработавших свой лётный ресурс. Оценка затрат на разработку и производство пневмотормоза, созданного с использованием данного подхода, позволила выявить сокращение затрат на НИОКР более чем в 5,6 раз.

2. Сформирован метод проектного расчёта пневматических тормозных устройств для испытания авиационных двигателей со свободной турбиной, отличающийся применением готовых элементов конструкции осевых компрессоров и алгоритмом их конструкторской доводки с целью получения геометрии пневмотормоза.

3. Разработана методика выбора из существующих МОК наиболее подходящего для создания динамического пневмотормоза, используемого в процессе испытаний авиационных ГТД СТ, отличающаяся: рекомендациями по формированию конечно-элементных сеток моделей потока в осевых компрессорах; используемыми закономерностями смещения границ рабочих областей пневматических тормозов в зависимости от установки дополнительных ступеней, величины подрезки ступеней базового компрессора и величины отбора воздуха за первой и второй ступенью.

4. Выявлены закономерности смещения границ рабочей области пневматического тормоза, выполненного на базе многоступенчатого осевого компрессора. Применение одной и двух дополнительных ступеней позволяет сдвигать границы рабочих областей пневматических тормозов в зону больших значений мощности на 15,3 - 31,9 %. Подрезка ступеней на 15 – 45 % даёт возможность сдвигать границы в зону меньших значений мощности на 16,7 - 54,4 %. Отборы воздуха за первой и второй ступенью на 5 и 10 % позволяют сместить границы рабочих областей в зону меньших значений мощности соответственно на 1,4 - 5,6 % и 1,4 - 10,4 %.

5. Разработаны и апробированы рекомендации по формированию конечно-элементных сеток моделей потока в осевых компрессорах для расчёта с их помощью границ рабочих областей пневмотормозов, отличающиеся значениями параметров сеток. Предложено: количество элементов для одного лопаточного венца в одном слое расчётной сетки выдерживать на уровне 10 500 элементов; максимальное значение коэффициента роста ячеек ER устанавливать на уровне 1,35; максимальную относительную высоту ячеек канала MR выдерживать приблизительно равной 2000. Разработанные рекомендации позволяют более чем в 2 раза сократить время газодинамического проектирования пневматических тормозов.

6. Апробация разработанного метода позволила осуществить газодинамическое проектирование и доводку пневматического тормозного устройства на базе компрессора низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя, производства ПАО «ОДК-Кузнецов» для нужд предприятия. Полученная конфигурация пневматического тормоза позволяет утилизировать мощность 25 МВт при частоте вращения выходного вала $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ и 32 МВт при $n=5500 \text{ мин}^{-1}$. Пневматический тормоз обеспечивает расчетный запас устойчивой работы не менее 12%. Полностью устранена остаточная закрутка потока за компрессором. Пневматический тормоз оснащен универсальным соплом, которое позволяет испытывать ГТД СТ мощностью 25 и 32 МВт без перенастройки.

7. Результаты исследований использованы при выполнении ряда хозяйственных и госбюджетных научно-исследовательских работ, а также внедрены в учебный процесс института двигателей и энергетических установок Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Дальнейшее проведение исследований связано с изучением влияния совместного внедрения различных вариантов модификации МОК, в частности, добавления и подрезки ступеней компрессора и одновременным отбором воздуха. А также изучение закономерностей смещения границ рабочей области пневмотормоза, выполненного на базе компрессора с центробежными ступенями

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Новикова, Ю.Д. Разработка рекомендаций по формированию численных моделей рабочего процесса осевых компрессоров для расчёта с их помощью границ рабочей области пневмотормоза [Текст] / А.Б. Прокофьев, Ю.Д. Новикова, В.Н.Матвеев // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10. – № 4. – С. 1-8.
2. Новикова, Ю.Д. Использование компрессора низкого давления для создания тормозной системы испытательного стенда газотурбинных двигателей [Текст] / Г.М. Попов, Е.С. Горячкин, Ю.Д. Новикова, В.М. Зубанов, А.А. Волков, А.И. Корнеева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 6 (86). – С. 144-151.
3. Новикова, Ю.Д. Газодинамическое проектирование пневматической тормозной системы [Текст] / Г.М. Попов, Ю.Д. Новикова, Е.С. Горячкин // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2016. – № 1 (36). – С. 172-178.

Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus

4. Новикова, Ю.Д. Проектирование и доводка пневматического тормозного устройства для испытания газотурбинной установки [Текст] / Г.М. Попов, Ю.Д. Новикова, Е.С. Горячкин, О.В. Батулин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2021. – № 1. – С. 49-56.
5. Novikova Yu.D. Gas-dynamic designing of the exhaust system for the air brake [Текст] / Yu.D. Novikova, E.S. Goriachkin, A.A. Volkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – vol. 302 (1). – Article number 012029. – p. 1-6.
6. Novikova Yu.D. The process of gas-dynamic design of pneumatic braking system using the baseline compressor [Текст] / Yu.D. Novikova, G.M. Popov, E.S. Goryachkin, O.V. Baturin, V.M. Zubanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – vol. 232. – Article number 012068. – p. 1-10.
7. Novikova Yu.D. Design and operational development a pneumatic braking system for a gas-turbine units test bench [Текст] / V.N. Matveev, Yu.D. Novikova, G.M. Popov, O.V. Baturin, E.S. Goryachkin // Proceedings of the ASME Turbo Expo. – 2017. – Paper No. GT2017-64738. – p. 1-11.
8. Novikova Yu.D. Gas dynamic designing of pneumatic braking system for gas turbine engine test bench [Текст] / G.M. Popov, Y.D. Novikova, E.S. Goriachkin // Proceedings of the ASME Turbo Expo. – 2015. – Paper No. GT2015- 1273. – p. 1-6.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

9. Свидетельство № 2019663600 Российская Федерация. Программа определения условий совместной работы воздушного тормозного устройства и газотурбинного двигателя.: № 2019662573: заявлено 11.10.2019, опубликовано: 21.10.2019 / Новикова Ю. Д., Поветкин И. С., Попов Г. М., Горячкин Е. С., Волков А. А., Зубанов В. М.; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет).

Статьи в прочих изданиях

10. Новикова, Ю.Д. Оценка влияния параметров расчётной сети на моделирование течения в межлопаточных каналах осевого компрессора на режиме «Запирания» [Текст] / А.Б. Прокофьев, Ю.Д. Новикова, С.Е. Петров // Сборник трудов третьей всероссийской школы-конференции государственного университета «Дубна» «Фундаментальная физика и прикладные технологии». – Дубна, 2024. — С. 1-2
11. Новикова, Ю.Д. Разработка рекомендаций по формированию численных моделей рабочего процесса осевых компрессоров для расчёта с их помощью границ рабочей области пневмотормоза [Текст] / А.Б. Прокофьев, Ю.Д. Новикова, С.Е. Петров // Сборник докладов шестой междунар. научн.-техн. конф., 04–06 сентября 2024 г. – Самара: Издательство Самарского университета, 2024. — С. 227-229
12. Новикова, Ю.Д. Обзор вариантов измерения крутящего момента для испытательного стенда ГТД [Текст] / А.Д. Прошлецов, А.С. Аргумбаев, Ю.Д. Новикова // Материалы Всероссийской молодёжной научной конференции с международным участием «XVII КОРОЛЁВСКИЕ ЧТЕНИЯ», 3–5 октября 2023 г. – Т.1. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. — С. 219-220
13. Новикова, Ю.Д. Влияние увеличения количества ступеней осевого компрессора на его характеристики [Текст] / Ю.Д. Новикова // Сборник международной научно-технической конференции «Климовские чтения — 2022. Перспективные направления развития двигателестроения». - СПб.: Скифия-принт, — 2022. — С. 90-96