

УДК: 621.438

ОПЫТ ДОВОДКИ ГТУ ПО УСТРАНЕНИЮ ЗАКЛИНИВАНИЯ РОТОРА ОХЛАЖДАЕМОЙ ТУРБИНЫ ТУРБОКОМПРЕССОРА

© 2012 И. С. Козлякова, В. П. Крупин, А. Н. Поткин, В. А. Фадеев

Научно - производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

В статье рассмотрен опыт ОАО НПО Сатурн по доводке ГТУ с целью устранения заклинивания роторов.

Газотурбинная установка, турбина высокого давления, система охлаждения турбины, система управления радиальными зазорами.

Одним из приоритетных направлений при создании высокотемпературных ГТУ является разработка и внедрение систем управления радиальными зазорами в компрессоре и турбине. Для обеспечения заданного уровня радиальных зазоров на режимах используют системы активного/пассивного управления зазорами (СУЗ), которые корректируют относительные деформации корпуса и ротора за счёт действия тепловых перемещений статорных элементов конструкции. Дополнительная герметизация осуществляется при помощи различных уплотнений.

Снижение радиальных зазоров (РЗ) между ротором и статором турбины является значительным резервом улучшения характеристик двигателя. Чем больше перепад давления, срабатываемый в турбине, и чем больше степень реактивности, тем сильнее проявляется влияние зазора на КПД турбины.

Снижение РЗ является комплексной задачей, зависящей не только от конструкции турбины и условий её охлаждения, но и от конструкции двигателя. При этом предъявляются жёсткие требования к силовой схеме двигателя, деформациям ротора и статора от механических и тепловых нагрузок.

Опыт эксплуатации двигателей наземного и авиационного применения показывает, что стремление повысить термодинамические параметры ГТД за счёт уменьшения радиальных зазоров в компрессоре и турбине до нулевых значений и ниже сопровождается врезаниями роторных деталей в статорные, особенно это проявляется на запуске и выходе двигателя на режимы работы и, что особенно важно, «заклиниванием» или «подтормаживанием» роторов после нормального и особенно аварийного остановов (АО).

Существуют различные способы устранения данных дефектов ГТУ. Наиболее эффективным способом является применение в конструкции двигателя СУЗ, которая позволяет за счёт охлаждения корпусов обеспечивать минимальные РЗ на номинальных (крейсерских) режимах работы при минимально достаточных зазорах для предотвращения врезания ротора в статор на запусках и «заклинивания» ротора после остановов.

Отмеченный способ борьбы с нежелательными уменьшениями РЗ в турбомашине ниже нулевых значений сопровождается значительным усложнением конструкции и системы автоматического управления при применении управляемого СУЗ. Кроме того, применение СУЗ приводит к повышению веса, что для авиационного ГТД является нежелательным, а также к некоторому снижению эффективности термодинамического цикла двигателя за счёт отбора рабочего тела на собственные нужды.

Другим способом решения проблемы «заклинивания» ротора ГТД после останова является вынужденная прокрутка ротора непосредственно после или до окончания останова с помощью нормального стартера. Данное решение проблемы имеет отрицательное влияние, которое может выражаться в нежелательных износах роторных и статорных деталей. Кроме того, данные износы накапливаются в процессе длительной эксплуатации ГТУ и дополнительно негативно влияют на снижение эффективности термодинамического цикла. Опыт доводки и эксплуатации двигателя ГТД-4РМ разработки ОАО «НПО «Сатурн» подтверждает это.

Основное назначение двигателя ГТД-4РМ (индекс Н4) - наземное использование

для закачки природного газа в подземные хранилища. Основные исходные данные для проектирования системы охлаждения двухступенчатой турбины высокого давления (ТВД) определены частными ТЗ на проектирование узлов, в соответствии с которыми для двигателя первого образца в расчётах принимались следующие величины основных параметров:

- температура за компрессором:

$$T_k^* = 657\text{K};$$

- частота вращения ротора ТВД:

$$n = 14700 \text{ об/мин};$$

- температура газа перед РК 1:

$$T_{г.рк}^* = 1220\text{K};$$

Конструктивная схема ТВД представлена на рис. 1.

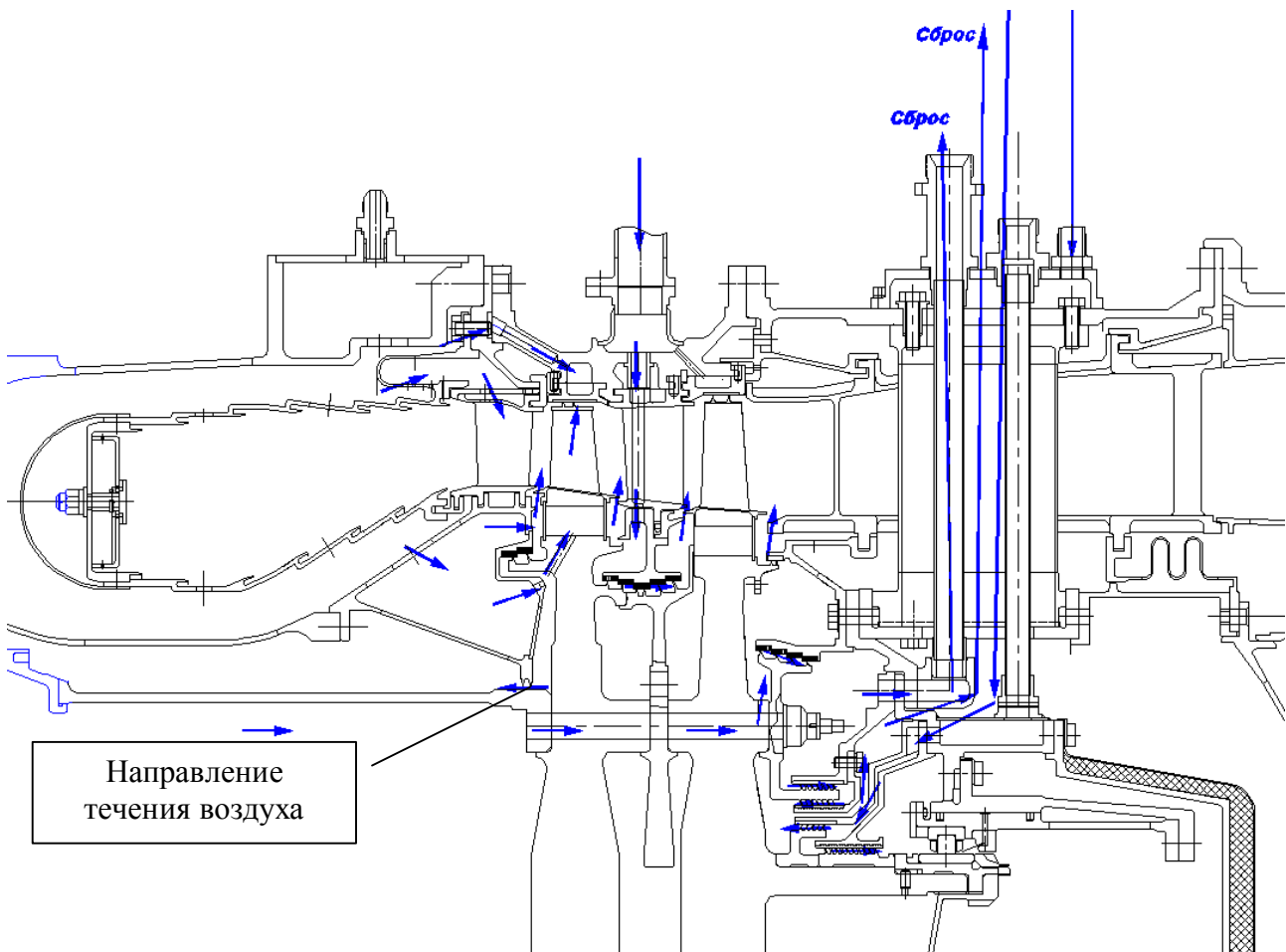


Рис. 1. Конструктивная схема ТВД ГТД-4РМ

В конструкции ТВД ГТД-4РМ использованы конструктивные решения, по которым имеется богатый опыт доводки как на «НПО «Сатурн», так и в отрасли. Ротор турбины имеет стяжные болты на большом радиусе, что обеспечивает его жёсткость и центрирование. Охлаждаемые рабочие лопатки первой ступени и неохлаждаемые рабочие лопатки второй ступени установлены в замках ёлочного типа, щели в замках закрыты сегментами. Лопатки снабжены аэродинамическими бандажными полками, для РК второй ступени также обеспечивающими

снижение вибрационных напряжений. Схема охлаждения рабочей лопатки первой ступени имеет простую конструкцию с продольными рёбрами без внутренних концентраторов напряжений, обеспечивает устойчивость характеристик при массовом производстве и низкий процент брака литья. Охлаждаемые сопловые лопатки первой ступени выполнены литыми секторами по три лопатки с постановкой традиционных пластичных уплотнений по боковым поверхностям полков, благодаря чему обеспечивается хорошее уплотнение. Вставки над рабочими лопатками вы-

полняются с мелкими сотами малой высоты, выполненными из высокохромистого материала колец методом электроэрозии. Такие вставки имеют большую наработку с хорошими показателями. В других лабиринтных уплотнениях ТВД используются паяные соты, производство и серийное применение которых освоено на «НПО «Сатурн» для двигателей Д-30КУ/КП. Сопловые и рабочие лопатки второй ступени ТВД являются неохлаждаемыми.

Для проведения расчётно-исследовательских работ создана подробная теплогидравлическая модель охлаждаемой ТВД, которая по геометрии и параметрам воздуха в местах отбора на охлаждение и сброса в проточную часть турбин полностью соответствует двигателю ГТД-4РМ. Расчётная гидравлическая модель предусматривала определение потребных расходов воздуха наддува и суфлирования межлабиринтных полостей и полостей опоры.

При создании теплогидравлической модели ТВД двигателя ГТД-4РМ использован накопленный опыт работы с ЦИАМ им. П.И. Баранова и Snesta по созданию теплогидравлической модели охлаждаемой ТНД, которая использована при двух сертификациях двигателя SaM-146 (версии 1S17 и 1S18).

По результатам испытаний опытного газогенератора двигателя ГТД-4РМ, на котором проводились работы по термометрированию деталей ротора и статора ТВД на стационарных и нестационарных режимах, выполнена верификация теплогидравлической модели системы охлаждения ТВД.

Проект ТВД двигателя ГТД-4РМ выполнен с обеспечением по всем деталям конструкции расчётных запасов статической и динамической прочности выше нормируемых, при этом использованы современные методы расчёта газодинамики, гидравлики, теплового состояния, напряжений и деформаций, в том числе и трёхмерные. В конструкции применены традиционные апробированные конструктивные решения и материалы, что позволило без значительных доводочных работ получить заявленные параметры.

В [1] сказано, что остановки ГТУ могут быть штатными и аварийными. Полный перечень ситуаций, при которых персонал

должен немедленно остановить ГТУ, приведён в местных инструкциях.

Все валы ГТУ оснащены высокоповоротными устройствами, которые предназначены для их равномерного остывания. Если ротор не проворачивать, то в результате более интенсивного остывания нижней части он при естественной конвекции изогнётся вверх. Вращение ротора в прогнутом состоянии приводит к задеваниям и повышенной вибрации, что делает невозможным эксплуатацию ГТУ». Основным мероприятием, исключающим дефект износа гребешков междискового лабиринта, является проведение охлаждения двигателя ГТД-4РМ в соответствии с инструкцией по эксплуатации, т.е. проведение технологической прокрутки (ТП) ротора турбокомпрессора (ТК) с оборотами $n_{\text{ТК}}=700$ об/мин в течение $\tau=20$ мин с помощью штатного стартера.

Опыт доводки и промышленной эксплуатации ГТД-4РМ на подземных хранилищах газа (ПХГ) ОАО «Газпром» выявил два элемента конструкции ТВД, которые при касании деталей ротора о детали статора приводили к локализованным разрушениям и (или) к длительным заклиниваниям ротора после останова двигателя. Это касания гребешком междискового лабиринта о соты внутреннего корпуса соплового аппарата второй ступени и касания гребешков рабочих колёс первой и второй ступени о поверхность надроторных вставок ТВД.

Дефект зоны касания гребешком междискового лабиринта о соты внутреннего корпуса соплового аппарата второй ступени ТВД проявился при проведении предварительных комплексных испытаний ГПА-4РМ №2 с газотурбинным двигателем ГТД-4РМ. При испытаниях произошёл АО агрегата по причине загазованности отсека нагнетателя. После завершения алгоритма АО ввиду повышенной температуры за турбокомпрессором с целью более интенсивного охлаждения проточной части ГТД вместо предусмотренной руководством по эксплуатации одной ТП были выполнены три холодные прокрутки (ХП: $n_{\text{ТК}} = 4000$ об/мин, $\tau = 2$ мин) с помощью штатного стартера. При выполнении третьей ХП выявлен недобор штатных оборотов ХП и уменьшение выбега ротора ТК. По окончании выбега при попытке ручной прокрутки ротора ТК обнаружена невозмож-

ность проворачивания ротора ТК. После естественного охлаждения до температуры наружного воздуха ротор остался в заклиненном состоянии.

При разборке двигателя после возвращения из эксплуатации обнаружено разрушение двух гребней междискового диска-лабиринта. На ответной детали – сотовом уплотнении второй ступени турбины – имеется недопустимое врезание от гребней диска-лабиринта и налипание продуктов износа.

Для определения возможных причин врезания гребней диска-лабиринта после серии холодных прокруток был выполнен нестационарный теплогидравлический расчёт деталей турбины высокого давления, имитирующий режимы аварийного останова и регламент проведения серии холодных прокруток. Расчёт проводился на верифицированной теплогидравлической модели ТВД. По результатам нестационарного теплогидравлического расчёта определены деформации деталей ротора и статора ТВД и рассчитаны величины радиальных зазоров по гребешкам междискового лабиринта. По результатам расчёта получено, что минимальный радиальный зазор реализуется после проведения третьей ХП над двумя центральными гребешками междискового лабиринта.

Расчётом доказано уменьшение радиального зазора по гребешкам лабиринтного уплотнения междискового лабиринта к концу третьей ХП до величины 0,032 мм. С учётом замеренного после разборки двигателя биения ротора 0,09 мм могло произойти дополнительное уменьшение зазора, которое привело к врезанию гребней в статорную деталь (соты корпуса лабиринта), износу гребней с наволакиванием материала на сотовые поверхности статора и заклинке ротора турбокомпрессора.

Расчёты показывают тенденцию уменьшения радиального зазора по гребешкам лабиринтного уплотнения междискового лабиринта в процессе остывания при проведении трёх ХП (рис. 2). Видно, что ситуация врезания и износа гребней во время выполнения третьей ХП реалистична и имеет возможность проявляться на двигателе при данном регламенте останова. Вторым элементом конструкции ТВД, который при касании деталей ротора о детали статора приводил к длительным заклиниваниям ротора после останова двигателя, является касание гребешков рабочих колёс первой и второй ступени о поверхности надроторных вставок ТВД. Данные касания являлись причиной посторонних шумов при прокручивании ротора ТК.

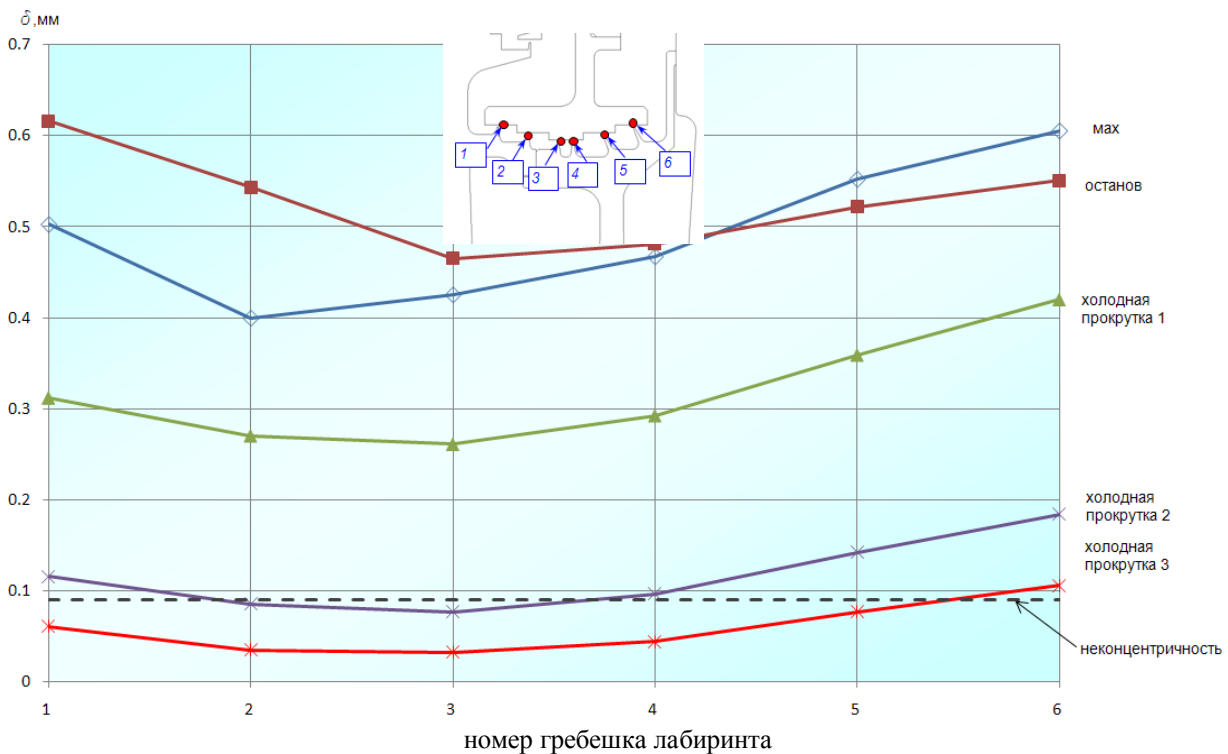


Рис. 2. Изменение радиального зазора между междисковым лабиринтом и корпусом СА 2 ступени от начала цикла (максимальный режим) до окончания 3ХП

В ходе промышленной эксплуатации двигателя ГТД-4РМ отмечено наличие посторонних шумов при прокручивании ротора турбокомпрессора после нормального останова при проведении предъявительских испытаний (ПИ) двигателей. С целью определения причин появления шумов после разборки каждого из двигателей проводились осмотры деталей, образующих радиальные зазоры в лабиринтных уплотнениях и в лабиринтах над рабочими колесами в зоне компрессора и турбины на предмет касания.

Проведён анализ радиальных зазоров в лабиринтных уплотнениях двигателей ГТД-4РМ с целью определения причин посторонних шумов при прокручивании ротора ТК после нормального останова. Анализ проводился для отправных двигателей, а также двигателей, находящихся в эксплуатации и прошедших ПИ без регистрации в протоколах испытаний наличия посторонних шумов.

Анализ показал, что предположительной причиной появления посторонних шумов при прокручивании ротора ТК после нормального останова на двигателях ГТД-4РМ является касание гребней рабочих лопаток первой и второй ступени ТВД о сотовые поверхности вставок соплового аппарата.

Для обеспечения требований технического задания на двигатель ГТД-4РМ по термодинамической эффективности, начиная с одного из двигателей ГТД-4РМ, принято решение о снижении монтажных радиальных зазоров над РК первой ступени и РК второй

ступени ТВД с $(\Delta_{рз}/D) \times 100\% = 0,106 \dots 0,124\%$ до $0,090 \dots 0,108\%$.

Для исключения появления посторонних шумов предложены два варианта доработки конструкции ТВД. По первому варианту на одном из двигателей ГТД-4РМ реализовано увеличение радиальных зазоров над РК ТВД на $\delta(\Delta_{рз}/D) \times 100\% = 0,082\%$ (0,5мм) с $(\Delta_{рз}/D) \times 100\% = 0,090 \dots 0,108\%$ до $0,172 \dots 0,190\%$ по всей ширине надроторных вставок. Эффективный КПД данного двигателя после указанной доработки уменьшился по сравнению с предыдущей сборкой на $\Delta\eta_{дв\ эф} = 0.5\%$.

Таким же образом был доработан следующий из отправных двигателей ГТД-4РМ, и по результатам испытаний был получен аналогичный результат.

Второй вариант доработки надроторных вставок ТВД предложен с учётом осмотра поверхностей вставок после испытаний и анализа величин приработки, а также расчёта осевых перемещений ротора относительно статора. На следующем двигателе ГТД-4РМ было реализовано увеличение радиальных зазоров над рабочими колесами ТВД на $\delta(\Delta_{рз}/D) \times 100\% = 0,057\%$ (0,35 мм) с $(\Delta_{рз}/D) \times 100\% = 0,090 \dots 0,108\%$ до $0,147 \dots 0,165\%$ с «уступами» в зоне гребешков ротора (рис. 3). Данные «уступы» создают дополнительное сопротивление перетеканию газа через радиальный зазор и вследствие этого благоприятно влияют на газодинамическую эффективность ТВД и термодинамическую эффективность двигателя в целом.

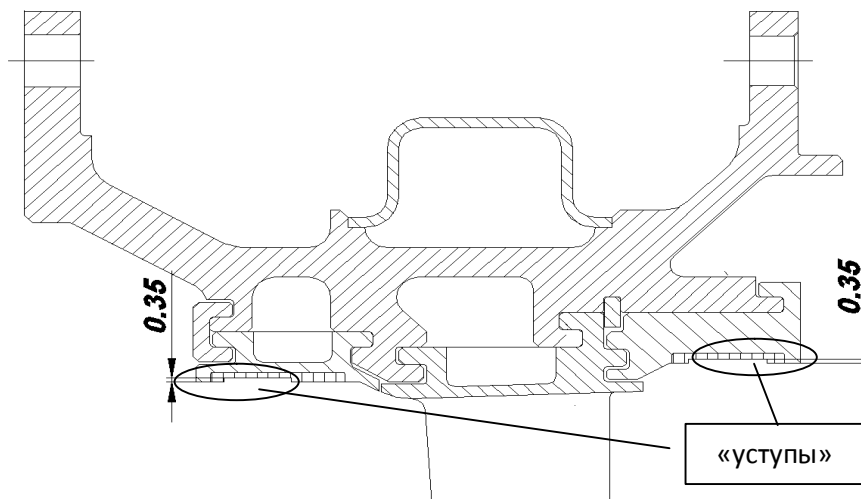


Рис.3. Схема доработки надроторных вставок ТВД с «уступами» в зоне работы гребешков ротора

По результатам испытаний двигателя выполнение доработок надроторных вставок ТВД по второму варианту не повлияло на величину эффективного КПД двигателя. Таким образом, выбранная схема доработки вставок с «уступами», с учётом фактических величин приработки, обеспечила сохранение термодинамических характеристик двигателя.

Следует отметить, что предложенные доработки лабиринтов над РК ТВД, выполненные на указанных трёх отправных двигателях ГТД-4РМ обеспечили испытания двигателей и штатные остановы без посторонних шумов при «ручной» прокрутке и без заклинивания ротора ТК.

Таким образом, опыт работ по доводке двигателя ГТД-4РМ показал, что исключение дефекта заклинивания ротора

турбокомпрессора наземного ГТД возможно внедрением конструктивных мероприятий без потерь КПД термодинамического цикла двигателя.

Библиографический список

1. Крюков, А.И. Некоторые вопросы проектирования ГТД [Текст]: учеб. пособие / А.И. Крюков. — М.: Изд-во МАИ, 1993. — 336 с.
2. Соколов, В.С. Газотурбинные установки [Текст]: учебное пособие для ПТУ / В.С. Соколов. - М.: Высшая школа, 1986. - 151 с.
3. Ковалевский, М.М. Стационарные ГТУ открытого типа [Текст] / М.М. Ковалевский. — М.: Машиностроение, 1979. — 262 с.

GAS-TURBINE UNIT DEVELOPMENT EXPERIENCE FOR ROTORS WEDGING CORRECTION

© 2012 I. S. Kozlyakova, V. P. Krupin, A. N. Potkin, V. A. Fadeev

«NPO «Saturn», Rybinsk

In this article is considered NPO Saturn experience on gas-turbine unit development with aim of rotors wedging correction.

Gas-turbine unit, high-pressure turbine, turbine cooling system, radial clearance control system.

Информация об авторах

Козлякова Ирина Сергеевна, ведущий специалист конструкторского отдела Турбин, Научно-производственное объединение «Сатурн»; аспирант, Рыбинский государственный авиационный технологический университет имени П. А. Соловьёва. E-mail: iri-na_kons@mail.ru. Область научных интересов: конструкция, проектирование и расчёт турбин.

Крупин Валерий Павлович, начальник бригады тепловых расчётов конструкторского отдела турбин, Научно-производственное объединение «Сатурн»; аспирант, Рыбинский государственный авиационный технологический университет имени П. А. Соловьёва. E-mail: krupin.v.p@rambler.ru. Область научных интересов: расчёт, проектирование и конструкция турбин.

Поткин Андрей Николаевич, заместитель начальника конструкторского отдела турбин, Научно-производственное объединение «Сатурн»; аспирант, Рыбинский государственный авиационный технологический университет имени П. А. Соловьёва. E-mail: oksanapotkina@rambler.ru. Область научных интересов: расчёт, проектирование и конструкция турбин.

Фадеев Владимир Алексеевич, главный специалист по газодинамическим расчётам конструкторского отдела турбин, Научно-производственное объединение «Сатурн». E-mail:

Vlad-Fad1@yandex.ru. Область научных интересов: расчёт, проектирование и конструкция турбин.

Kozlyakova Irina Sergeevna, Leading specialist, Turbine Design Department of NPO «Saturn», postgraduate student of Rybinsk State Aviation Technical University. E-mail: irina_kons@mail.ru. Area of research: turbine design.

Krupin Valeriy Pavlovich, Heat calculations team manager Turbine Design Department of «NPO «Saturn», postgraduate student of Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk. E-mail: krupin.v.p@rambler.ru. Area of research: turbine design.

Potkin Andrey Nikolaevich, Deputy Head of Design Department Turbines of NPO «Saturn», postgraduate student of Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk. E-mail: ok-sanapotkina@rambler.ru. Area of research: turbine design.

Fadeev Vladimir Alekseevich, Chief Specialist Gas Dynamics Calculation Turbine Design Department of NPO «Saturn», Rybinsk. E-mail: Vlad-Fad1@yandex.ru. Area of research: turbine calculation and design.