

Рис. 3. Зависимость давления газа в криогенной емкости от времени хранения криопродукта

ные результаты выполненных исследований. Их анализ и сравнение с теорией позволяют сделать основной вывод о

УДК 621.822.5-9.001.24

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОТОРА НА ГАЗОВЫХ ОПОРАХ

Темис Ю.М., Темис М.Ю., Егоров А.М., Гаврилов В.В., Огородов В.Н.

ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва

Проведено расчетно-экспериментальное исследование динамических характеристик малоразмерной газотурбинной установки с ротором в лепестковых подшипниках скольжения. В рамках исследования разработана математическая модель ротора[1], с использованием которой определены орбиты вращения ротора в подшипниках в широком диапазоне частот вращения. Экспериментальная проверка моделей роторов и лепестковых подшипников, а также верификация их численных моделей, проведена на основе испытательного стенда с роторо-имитатором.

Конечно-элементная модель ротора на газодинамических подшипниках состоит из стержневой модели вала, верифицируемой при помощи объемной модели вала, а также включает в себя модель газодинамической

достаточно высоком соответствии экспериментальных данных расчетной модели, описывающих теплофизику процесса в баллоне.

Последнее позволяет считать, что система охлаждения на базе данного баллона будет иметь ожидаемые улучшенные характеристики по времени функционирования, или по массе.

### Библиографический список

1. Довгялло, А.И. Анализ работы баллоного микроохлаждителя при использовании азота с околокритическими параметрами / А.И. Довгялло, А.П. Логашкин, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов. - Вестник СГАУ, 2009, №3 (Ч.2), - С. 143-146.

лепестковой опоры[2] и модель стяжки ротора. Исследование динамики ротора проведено при помощи прямого интегрирования уравнений движения системы по схеме Ньюмарка.

При помощи конечно-элементной модели стяжки ротора, учитывающей контактное взаимодействие между деталями ротора, производится проверка напряженно-деформированного состояния конструкции и оценивается величина силы стяжки элементов ротора в зависимости от частоты вращения ротора.

Модель лепестковой опоры учитывается в конечно-элементной модели ротора при помощи специализированного конечного элемента, характеристики которого определяются при решении многодисциплинарной задачи упругогазодинамического

контакта четырех тел шейки вала - газовая смазка – лепестки - обойма подшипника - корпус опоры. Параметры течения смазки в зазоре газодинамического подшипника определяются при решении двумерного уравнения Рейнольдса для сжимаемой смазки, решение которого ведется методом конечных элементов с применением алгоритма самокоррекции. Зазор для смазки при смещенной шейке вала определяется с учетом деформаций лепестков в подшипнике, определенных при решении контактной задачи деформирования лепестков под действием давления смазки в зазоре. Контакт между лепестками подшипника моделируется при помощи специализированных контактных конечных элементов с учетом взаимодействия лепестков друг с другом и с обоймой подшипника. Итоговое распределение давлений в подшипнике и напряженно-деформированное состояние лепестков определяется для каждого положения шейки вала методом последовательных нагружений с итерационным уточнением на каждом шаге. Характеристики жесткости корпуса опоры рассчитаны при помощи объемной или оболочечной конечно-элементной модели. Совокупность характеристик лепесткового подшипника и корпуса опоры составляют конечный элемент опоры, включенный в динамическую модель ротора.

Исследование динамических характеристик ротора на лепестковых подшипниках проведено для различных значений дисбаланса ротора, конструкционного демпфирования системы и вязкости смазки, характеризующей температурное состояние опоры. Определены орбиты вращения ротора в опорах и проведен их спектральный анализ.

Для экспериментального определения статических и динамических характеристик газодинамических подшипников скольжения и верификации математических моделей, описывающих рабочий процесс в газодинамическом подшипнике и динамику ротора на газовых опорах разработан и испытан узел ротора-имитатора ВГТД ТА-20 (рис. 1). Выполнены эксперименты по разгону, выходу на стационарный режим и останову ротора имитатора для трех схем

опирания: в два подшипника качения, один подшипник качения и один газодинамический подшипник и два газодинамических подшипника.



*Рис.1. Испытательный стенд*

Представлено описание объекта испытаний, методика проведения эксперимента и результаты экспериментального исследования для трех вариантов опирания ротора-имитатора. Определены динамические характеристики системы при опирании ротора-имитатора в два подшипника качения, в подшипник качения и лепестковый подшипник и в два лепестковых подшипника. Для обеспечения изгибной жесткости и минимизации дисбалансов системы ротор-имитатор представляет собой сварную конструкцию. Для анализа динамического поведения ротора применены датчики положения, позволяющие записывать траектории движения вала в двух характерных плоскостях, расположенных вблизи опор. На основе записанных в процессе эксперимента траекторий построены орбиты ротора в подшипниках, выполнен спектральный анализ динамического поведения ротора. Полученные экспериментальные диаграммы сопоставлены с теоретическими результатами. Определена характеристика всплытия ротора в подшипниках и произведено сравнение с аналогичным результатом, полученным теоретически. Результаты верификации показывают, что теоретические модели удовлетворительно описывают характер движения ротора в нелинейных опорах.

#### **Библиографический список**

1. Temis JM, Temis MJ, Contribution of Bearing Structure in Gas Turbine Power Unit

Rotor Dynamics. (2005) Proc. 3rd Int. Symp. on Stability Control of Rotating Machinery: 570-581

2. Temis JM, Temis MJ, Mescheryakov

AB, Elastohydrodynamic Contact Theory in Foil Gas Bearing (2007) Proc. 4rd Int. Symp. on Stability Control of Rotating Machinery: 228-238

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИМИ

Ножницкий Ю.А.<sup>1</sup>, Бычков Н.Г.<sup>1</sup>, Першин А.В.<sup>1</sup>, Хамидуллин А.Ш.<sup>1</sup>, Опокин В.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г.Москва

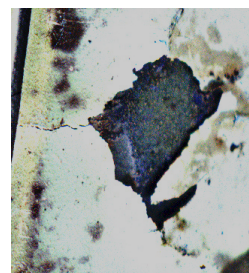
<sup>2</sup>НПО «Сатурн, г. Москва

Применяемые в турбинах ГТД жаропрочные материалы на никелевой основе обычно работают при предельно допустимых температурах. В настоящее время на «горячих» деталях двигателей широко применяются керамических теплозащитные покрытия (ТЗП на основе двуокиси циркония, стабилизированного оксидом иттрия ( $ZrO_2 + 5-9\%Y_2O_3$ ), которые обладают высокой рабочей температурой и относительно низким коэффициентом теплопроводности [1]. Применяемыми методами нанесения керамических ТЗП на лопатки ТВД являются плазменная и электронно-лучевая технологии (ЭЛТ). ТЗП, полученные по электронно-лучевой методике, имеют столбчатую структуру с диаметрами столбиков от 0,5 до 2 мкм. Использование в технологии нанесения керамических покрытий жаростойких подслоев различных составов (в том числе с элементами платиновой группы) позволяет добиться хорошей адгезии керамических покрытий на лопатках турбины. «Узким» местом, однако, остается низкая прочность керамического слоя ТЗП при растяжении [2].

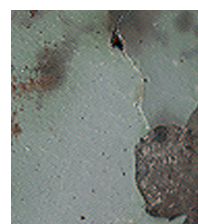
В данной работе экспериментально определялась термоциклическая долговечность лопаток турбин с ТЗП толщиной 100...120 мкм, нанесенными по плазменной и электронно-лучевой технологии. Эффективность снижения температуры металла на рабочих лопатках с плазменным покрытием составила 70°C, а на лопатках с ЭЛТ покрытием – 100...120°C.

Испытания на термическую усталость проводились по режиму  $T_{max} \leftrightarrow T_{min} = 400 \leftrightarrow 1000^\circ C$  при индукционном высокочастотном поверхностном разогреве на машине [3], разработанной и изготовленной в ЦИАМ, с соблюдением основных положений, изложенных в стандартах [4] и [5].

Термоциклическая долговечность технологической лопатки без теплозащитного покрытия составила 11 000 циклов. На лопатках с плазменным ТЗП вспучивание и отслоение покрытия наблюдалось через 21565 циклов (рис. 1а), а со столбчатым ТЗП - через 23000 циклов (рис. 1б).



а



б

Рис. 1. Отслаивание покрытия и трещина от термической усталости на корыте лопаток с плазменным (а) и электронно-лучевым (б) ТЗП