

## СИЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ КОРПУСА ПОДШИПНИКА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКАХ

Юрий Александрович РАВИКОВИЧ родился в 1951 г. в городе Ленинграде. Заведующий кафедры МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области исследования и проектирования высокоскоростных турбомашин с подшипниками скольжения. Автор более 100 научных работ. E-mail: yurav@mai.ru

Yury A. RAVICOVICH, D. Sci., was born in 1951, in Leningrad. He is the Head of a Department at the MAI. His scientific interests are in research and development of high-speed turbo-machines with friction bearing. He has published over 100 technical papers. E-mail: yurav@mai.ru

Тимофей Николаевич КИЯНСКИЙ родился в 1954 г. на Украине в городе Макеевке Донецкой области. Начальник бюро НТЦ «МКБ «Гранит». Кандидат технических наук. Основные научные интересы в области обеспечения надёжности двигателей летательных аппаратов на стадии проектирования. Автор 9 научных работ. E-mail: granit@salut.ru

Timofey N. KIANSKY, Ph.D., was born in 1954, in the Donetsk Region. He is the Head of a Bureau at the «Granite» Moscow Design Bureau. His scientific interests are in reliability-based design support for aircraft engines. He has published 9 technical papers. E-mail: granit@salut.ru

Андрей Сергеевич АМЕЛЬКИН родился в 1983 г. в городе Москве. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области конструирования и проектирования двигателей летательных аппаратов. E-mail: a-a-c@yandex.ru

Andrey S. AMELKIN, was born in 1983, in Moscow. He is a Postgraduate Student at the MAI. His research interests are in design and development of aircraft propulsion systems. He has published 1 technical paper. E-mail: a-a-c@yandex.ru

Николай Александрович КАБАНОВ родился в 1954 г. в городе Балашихе Московской области. Начальник группы НТЦ «МКБ «Гранит». Основные научные интересы — в области проектирования технических систем. E-mail: granit@salut.ru

Nikolay A. KABANOV, was born in 1954, in the Moscow Region. He is the Head of a Group at the «Granite» Moscow Design Bureau. His research interests are in the development of engineering systems. E-mail: granit@salut.ru

*В настоящей статье показано, как упругие деформации посадочных поверхностей подшипника термической и механической природы оказывают сильное повреждающее воздействие на подшипник. Предложены рекомендации по проектированию подшипниковых узлов, свободных от этого недостатка.*

*It is shown that thermal and mechanical elastic deformations of a bearing mounting surface result in a damage of the bearing. Recommendations are suggested to design bearing mount assemblies free of this defect.*

**Ключевые слова:** корпус подшипника, нестационарные тепловые потоки, силовые деформации, проектирование подшипниковых узлов, дефекты подшипниковых опор.

**Key words:** bearing housing, non-stationary thermal flows, power deformations, designing of bearing mount assemblies, defects of bearing assembly.

Стремление к уменьшению массы конструкции часто приводит к понижению жесткости деталей, что способствуют повышению их деформаций в рабочих условиях. В сборных роторах это приводит к ухудшению условий работы его опор.

### Силовые деформации цапфы турбины

В цапфе 1 турбины (рис. 1) установлен подшипник 3, над которым находится уплотнение, затянутое гайкой 4.

Низкая жесткость цапфы приводит к тому, что при затяжке гайки 2 она деформируется, изменяя форму и размеры наружной обоймы подшипника 4. Измерения в плоскостях А-А и Б-Б (рис. 1) показали, что при изменении момента затяжки беговая дорожка наружного кольца подшипника овалируется и приобретает конусность с вершиной конуса, направленной назад (на рис. 1 — вправо).

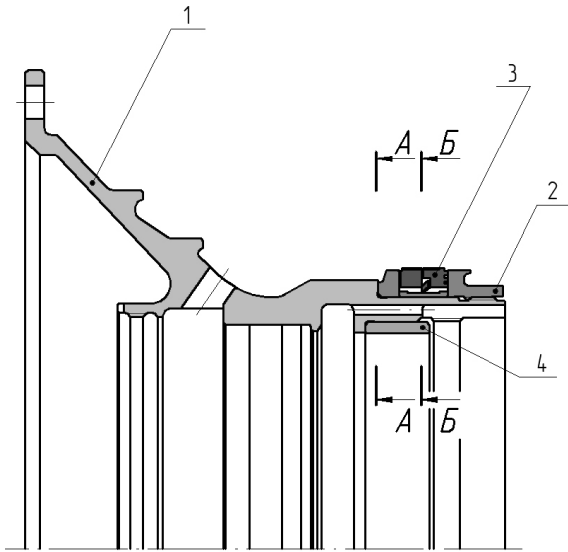


Рис. 1. Цапфа турбины:  
1 — цапфа; 2 — гайка; 3 — уплотнение;  
4 — наружная обойма подшипника

Результаты измерений показаны на рис. 2, 3, 4. Эксперимент показал, что конусность (разность средних диаметров в плоскостях А-А и Б-Б) возрастает с увеличением момента затяжки гайки и при полном моменте 0,005 мм. В плоскости Б-Б бего-

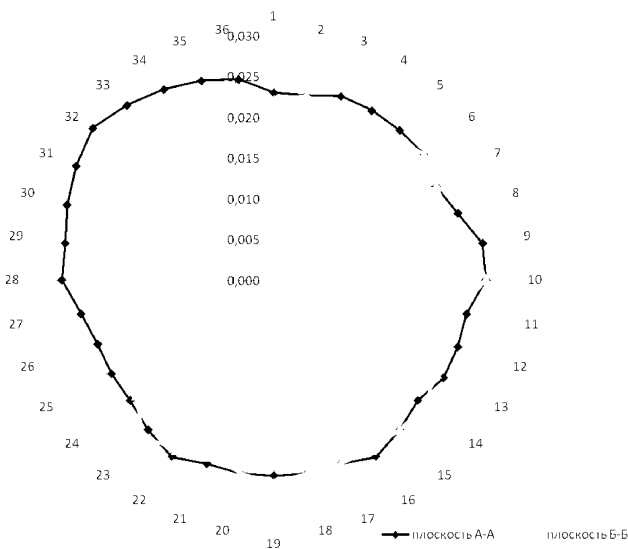


Рис. 2. Форма беговой дорожки наружного кольца подшипника в свободном состоянии

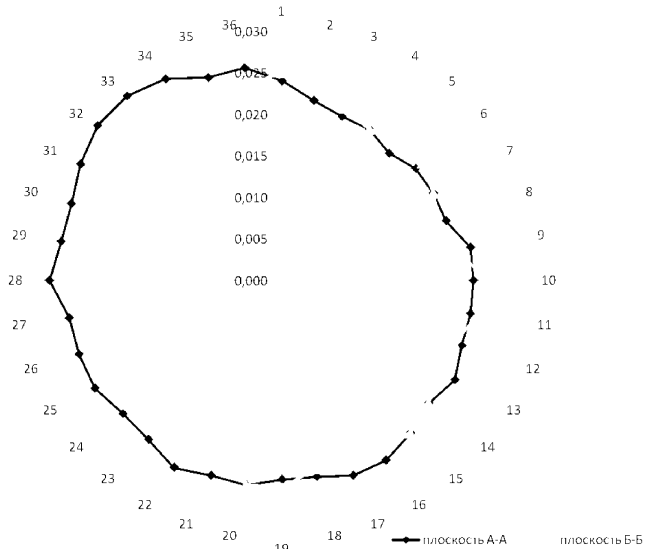


Рис. 3. Форма беговой дорожки наружного кольца подшипника при моменте затяжки гайки 50% от максимального

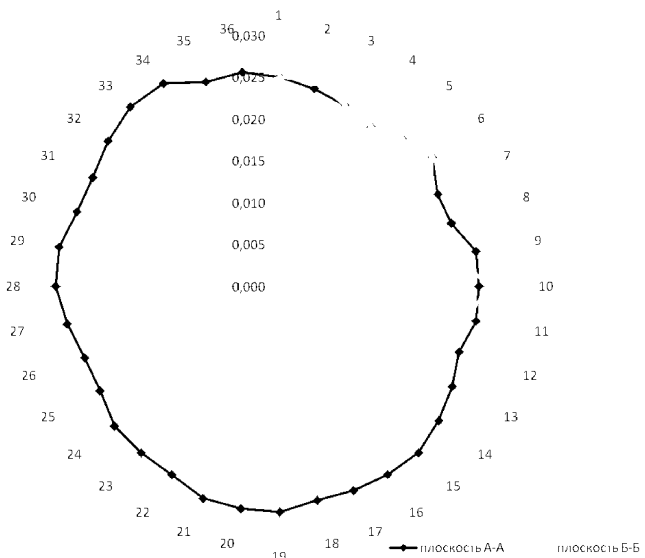


Рис. 4. Форма беговой дорожки наружного кольца подшипника при моменте затяжки гайки 100% от максимального

вая дорожка приобретает восьмигранную форму (рис. 5). Количество граней соответствует количеству групп отверстий и пазов, которые создают окружную неравномерность жесткости цапфы. «Огранка» наружного кольца увеличивается с увеличением момента затяжки гайки и при полной затяжке гайки достигает 0,01 мм.

### Термические деформации цапфы турбины

Известно, что при наличии радиального градиента температур в стенке цилиндрической оболочки диаметр её свободного конца отличается от равновесного диаметра всей оболочки (рис. 6, а, б) [2]. Напряжения сжатия-растяжения, возникающие в

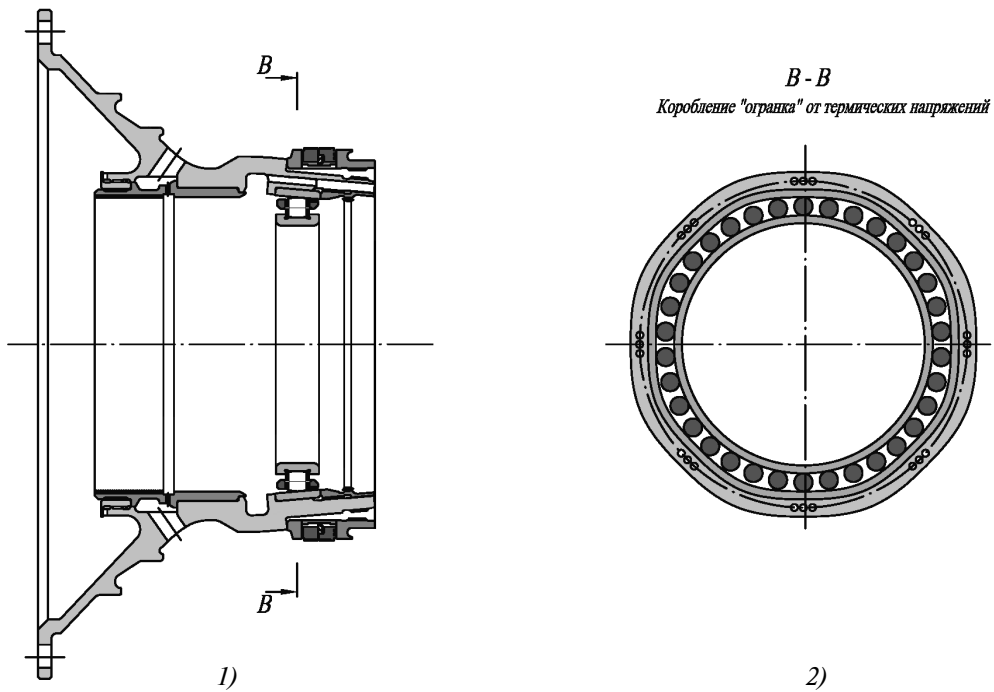


Рис. 5. Ухудшение условий работы подшипника при деформации цапфы:  
1 — цапфа; 2 — подшипник

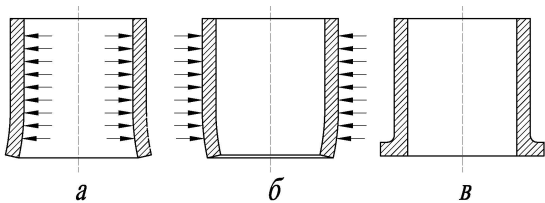


Рис. 6. Деформации свободного конца цилиндра:  
*a* — при нагреве изнутри; *б* — при нагреве снаружи;  
*в* — кольцевое ребро жесткости на торце для сохранения формы

стенке оболочки при таких деформациях, могут достигать значительных величин. Так, для стального цилиндра с внутренним диаметром 100 мм и толщиной стенки 20 мм при разнице температур стенок в 30 °С термические напряжения растяжения на внутренней холодной стенке (рис. 6, б) получают-ся такими же, как при разрыве внутренним давлением в 11,6 МПа (116 кгс/см<sup>2</sup>) [1].

Для оценки величины термических деформаций цапфы турбины в зоне установки подшипника был проведен эксперимент, схема которого показана на рис. 7. В цапфу турбины 1 с термоизолирующей заглушкой 5, установленной на термоизолирующей подставке 9, подается вода с температурой, близкой к температуре кипения. С помощью фотокамеры 3 фиксируются изменения по времени показаний микрометров 2 и 8. Микрометры установлены таким образом, чтобы замерять изменения диаметров цапфы в плоскостях А-А и Б-Б (см. рис. 1).

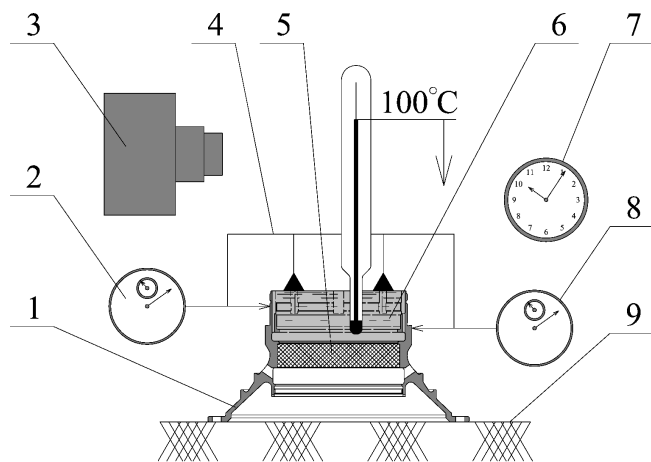


Рис. 7. Схема эксперимента по оценке термических деформаций цапфы турбины:  
1 — цапфа турбины; 2, 8 — микрометры;  
3 — фотокамера; 4 — штатив микрометров;  
5 — термоизолирующая заглушка; 6 — вода;  
7 — секундомер; 9 — термоизолирующая подставка

При проведении экспериментов по условиям измерений моделировалась ситуация, показанная на рис. 6, а, когда тепловые потоки направлены изнутри цапфы наружу. Результаты экспериментов приведены на рис. 8.

Исследование показало, что во время прогрева цапфа турбины претерпевает деформации с изменением диаметра и формы посадочной поверхности МРП. Задний диаметр монотонно увеличивается (плоскость Б-Б, рис. 1). Передний (пл. А-А, рис. 1)

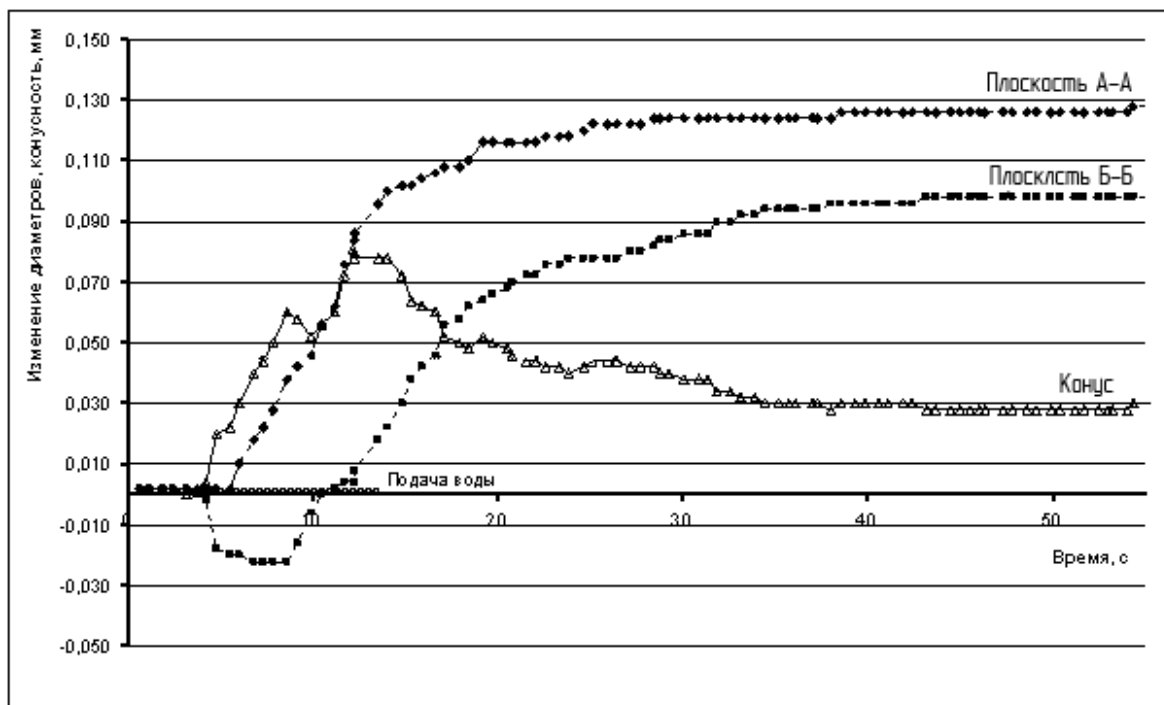


Рис. 8. Температурные деформации цапфы турбины в зоне установки подшипника

диаметр в первые секунды уменьшается, оставаясь меньше исходного в течение примерно 5 с, а в последующем — растёт. Конусность посадочной поверхности подшипника до 15 с прогрева стремительно растёт, затем плавно уменьшается до 35-й секунды и далее не изменяется. В момент, когда конусность после возрастания начинает убывать, разница температур между внутренней горячей стенкой и внешней холодной является максимальной. Стабилизация конусности свидетельствует о выравнивании температур стенок. Конусность посадочной поверхности подшипника при максимальном градиенте температур почти в три раза превышает конусность при равновесном состоянии.

С учетом симметрии упругих свойств конструкционного материала при растяжении и сжатии можно утверждать, что полученные результаты справедливы и для ситуации, показанной на рис. 6,б, когда тепловые потоки, направленные внутрь цапфы турбины, будут вызывать «сжатие» её свободного конца. В этом случае температурные деформации будут складываться с силовыми.

## Выводы

При комбинированном силовом и тепловом воздействии на переходных режимах форма и размеры цапфы турбины в зоне установки подшипника могут существенно отличаться от расчётных равновесных.

Нерасчётные деформации цапфы турбины могут приводить к существенному отклонению условий работы и общего напряженного состояния наружной обоймы подшипника, установленного в цапфе, от условий, закладываемых в расчёты его долговечности.

При проектировании узлов опор турбины необходимо принимать меры по устранению комбинированных тепловых и силовых деформаций цапф в зоне установки подшипников.

## Библиографический список

1. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1986.
2. *Орлов П.И.* Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. — М.: Машиностроение, 1988.
3. *Леликов О.П.* Валы и опоры с подшипниками качения. Конструирование и расчет: Справочник. — М.: Машиностроение, 2006. — (Библиотека конструктора.)

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 13.02.2009