

УДК 62-762

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ УПЛОТНЕНИЙ КРИОГЕННЫХ НАСОСОВ

© 2009 А. В. Иванов

Воронежский государственный технический университет

Одна из основных проблем, возникающих при эксплуатации уплотнений насосов – контакт роторного и статорного элементов уплотнений при работе. Зачастую это связано с неправильным выбором рабочего зазора из-за некорректного учета термических деформаций элементов уплотнения.

Уплотнение, ротор, статор, термические деформации, температурный коэффициент линейного расширения, уплотнительный зазор, захлаживание

Одним из основных направлений в повышении эффективности и экологичности ЖРД является использование в качестве компонентов топлива криогенных компонентов: жидких кислорода, метана, водорода. Работа насосов, перекачивающих криогенные жидкости, характеризуется значительным изменением температуры при работе по сравнению с температурой при сборке. Температурные деформации элементов уплотнения могут привести к изменению размеров и взаимному перекоосу осей элементов уплотнения. Это ведет к перераспределению давления в уплотнительном зазоре, изменению расходных и динамических характеристик уплотнения. Поэтому при проектировании криогенных агрегатов необходимо проводить анализ влияния температурных деформаций на достаточность зазоров в уплотнениях при: сборке, захлаживании; основном режиме работы; переходных режимах работы.

В общем случае радиальные температурные деформации уплотнения можно определить по следующей зависимости:

$$\Delta R_r = R_y \cdot \int_{T_{сб.у}}^{T_{раб.у}} \alpha_y(T) dT - R_p \cdot \int_{T_{сб.р}}^{T_{раб.р}} \alpha_p(T) dT,$$

R_p – радиус уплотнительного диаметра роторной части уплотнения;

R_y – радиус уплотнительного диаметра статорной части уплотнения;

α_p – температурный коэффициент линейного расширения материала роторной части уплотнения;

α_y – температурный коэффициент ли-

нейного расширения материала статорной части уплотнения;

$T_{раб.р}$ – температура роторного элемента уплотнения при работе;

$T_{сб.р}$ – температура роторного элемента уплотнения при сборке;

$T_{раб.у}$ – температура статорного элемента уплотнения при работе;

$T_{сб.у}$ – температура статорного элемента уплотнения при сборке.

Для анализа влияния температурных деформаций на основании данных работы [1] были составлены полиномиальные зависимости для определения температурных коэффициентов линейного расширения. Для выполнения анализа были выбраны следующие материалы: сталь 12X18H10T, сталь AISI 440 по своим характеристикам близкая к подшипниковым сталям, титановые сплавы BT6 и BT5-1, антифрикционная бронза БрБ2, алюминиевый сплав АК6. Графики изменения температурных коэффициентов линейного расширения для выбранных материалов приведены на рис. 1, аппроксимирующие зависимости в табл. 1.

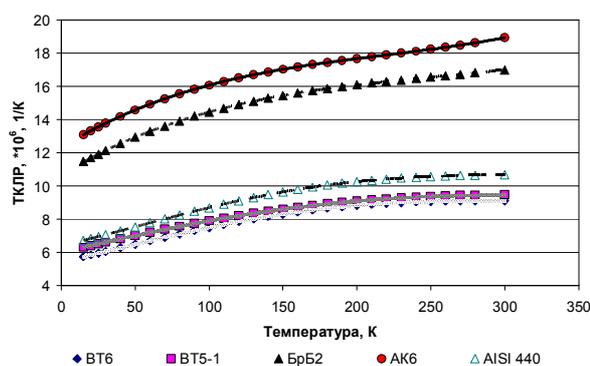


Рис. 1. Температурные коэффициенты линейного расширения

Таблица 1. Аппроксимирующие зависимости температурного коэффициента линейного расширения от температуры

Материал	Аппроксимирующая зависимость
ВТ6	$5,61 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 - 3,941 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 4,287 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 1,965 \cdot 10^{-2} \cdot T + 5,441$
ВТ5-1кт	$2,46 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 - 1,932 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 3,894 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 2,084 \cdot 10^{-2} \cdot T + 5,995$
АК6	$3,01 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 1,978 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 5,428 \cdot 10^{-2} \cdot T + 10,715$
БрБ2	$2,27 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 1,73 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 5,237 \cdot 10^{-2} \cdot T + 10,715$
AISI 440	$8,51 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 - 5,794 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 7,832 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 1,994 \cdot 10^{-2} \cdot T + 6,405$

При сборке и захлаживании уплотнения необходимо исключение возникновения натяга между роторным и статорным элементами уплотнения, так как это может привести к значительному увеличению момента страгивания ротора и повреждению уплотнительных поверхностей. При захлаживании в зависимости от материала конструкции, коэффициентов теплопроводности, конфигурации и массы деталей может реализоваться несколько различных вариантов изменения уплотнительного зазора: одновременное захлаживание роторного и статорного элементов уплотнения; более быстрое захлаживание роторного или статорного элемента уплотнения.

Кроме того, при захлаживании важно знать материал какого из элементов уплотнения – роторного или статорного имеет большее значение температурного коэффициента линейного расширения. Для примера рассмотрим различные варианты изменения радиального уплотнительного зазора при захлаживании в зависимости от сочетания материалов роторного и статорного элементов уплотнения. Для анализа рассмотрим следующие варианты сочетания пар материалов:

- ротор – титановый сплав ВТ6С, статор – бронза БрБ2;
- ротор – титановый сплав ВТ5-1кт, статор – сталь типа AISI 440;
- ротор – АК6, статор – сталь типа AISI 440.

Также при проведении анализа рас-

смотрим три возможных варианта изменения температуры роторного и статорного элементов уплотнения при захлаживании, которые реализуются в зависимости от конструктивного исполнения элементов уплотнения, массы роторного и статорного элементов уплотнения, коэффициентов теплопроводности материалов роторного и статорного элементов уплотнения:

- одновременное захлаживание роторного и статорного элементов уплотнения;
- более быстрое захлаживание роторного элемента уплотнения по сравнению со статорным;
- более медленное захлаживание роторного элемента уплотнения по сравнению со статорным.

Проведенные расчеты теплового состояния различных конструкций криогенных агрегатов показывают, что разность температур между роторным и статорным элементами уплотнения может достигать 50 К. Эту величину разности температур элементов уплотнения будем использовать при анализе изменения зазоров в процессе захлаживании.

При проведении анализа будем использовать понятие относительного зазора в уплотнении – отношение радиального зазора уплотнения к радиусу уплотнительной поверхности роторного элемента уплотнения – $\bar{\delta R} = \delta R / R_p$. Для большинства бесконтактных уплотнений значение относительного зазора в уплотнении находится в диапазоне от 0,001–0,005. Кроме того, используем понятие относительного радиуса уплотнительной поверхности роторного – $\bar{R}_p = R_p / R_p^{c\bar{o}}$ и

статорного – $\bar{R}_c = R_c / R_c^{c\bar{o}}$ элементов уплотнения (R_p^p – радиус уплотнительной поверхности ротора при работе (захлаживании), $R_p^{c\bar{o}}$ – радиус уплотнительной поверхности ротора при сборке, R_c^p – радиус уплотнительной поверхности статора при работе (захлаживании), $R_c^{c\bar{o}}$ – радиус уплотнительной поверхности статора при сборке)

На рис. 2 приведено изменение относи-

тельного радиуса уплотнительной поверхности ротора водородного насоса в процессе захлаживания при его изготовлении из титановых или алюминиевых сплавов.

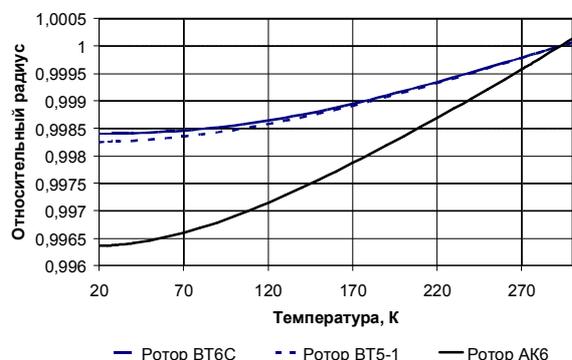


Рис. 2. Изменение относительного диаметра роторного элемента уплотнения при захлаживании

На рис. 3 приведено изменение относительного радиуса уплотнительной поверхности статорного элемента уплотнения водородного насоса в процессе проведения захлаживания для различных материалов при относительном зазоре в уплотнении 0,025.

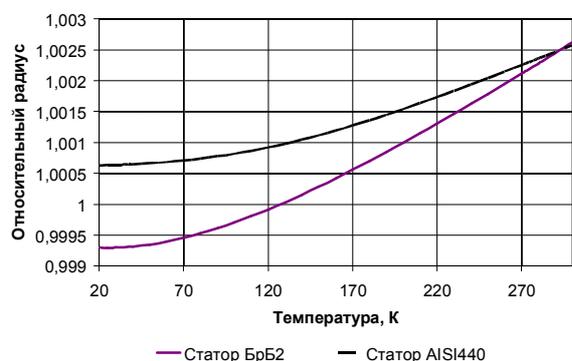


Рис. 3. Изменение относительного диаметра статорного элемента уплотнения при захлаживании

Из рис. 2 и 3 видно, что при расчете зазора необходимо тщательно выбирать монтажный зазор, так как при ошибке в его выборе в процессе захлаживания может произойти заклинивание уплотнения, что приведет к повышенному моменту страгивания и вращения ротора турбонасосного агрегата при запуске, повреждению уплотнительных поверхностей, а при определенных условиях – выходу агрегата из строя.

На рис. 4 приведено изменение относительного зазора для сочетания материалов: ротор – титановый сплав VT6C, статор – бронза БрБ2, на рис. 5 – ротор – титановый

сплав VT5-1кт, статор – сталь типа AISI 440, на рис. 6 – ротор – АК6, статор – сталь типа AISI 440 водородного насоса при различном сочетании скоростей захлаживания роторного и статорного элементов уплотнения. Значение монтажного относительного зазора в уплотнении для всех трех сочетаний пар материалов – 0,025.

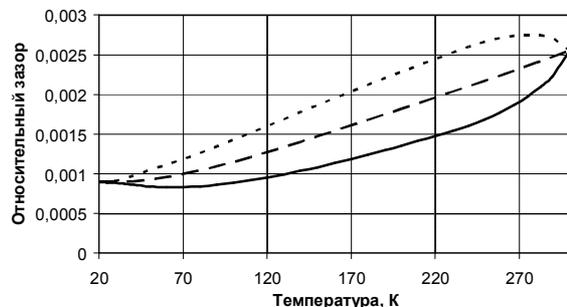


Рис. 4. Изменение относительного зазора для пары материалов: ротор – титановый сплав VT6C, статор – бронза БрБ2

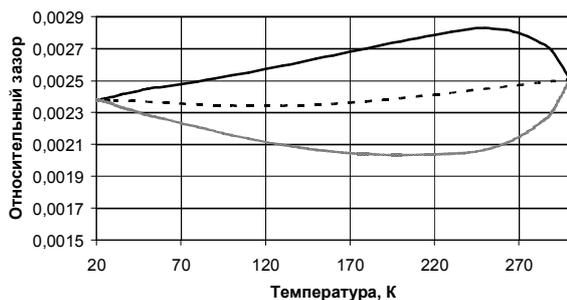


Рис. 5. Изменение относительного зазора для пары материалов: ротор – титановый сплав VT5-1кт, статор – сталь типа AISI 440

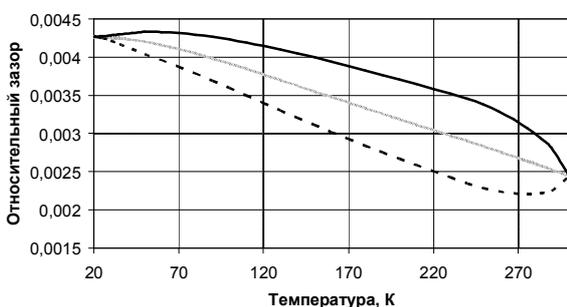


Рис. 6. Изменение относительного зазора для пары материалов: ротор – алюминиевый сплав АК6, статор – сталь типа AISI 440

Из рисунков видно, что для при сочетании большего температурного коэффициента линейного расширения материала ста-

торного элемента уплотнения по сравнению с роторным (ротор – титановый сплав ВТ6С, статор – бронза БрБ2) зазор при захолаживании уменьшается более чем в 2 раза. При этом с точки зрения работоспособности уплотнения более важное значение имеет выбор монтажного зазора, чем сочетание темпа захолаживания роторного и статорного элементов уплотнения.

При использовании материалов с близкими температурными коэффициентами линейного расширения (титановый сплав ВТ5-1кт и сталь типа AISI 440) изменение зазора между роторным и статорным элементами уплотнения невелико по сравнению с величиной первоначального монтажного зазора. Однако при более быстром по сравнению с ротором захолаживании статорного элемента уплотнения при определенном зазоре в уплотнении может произойти контакт (заклинивание) роторного и статорного элементов уплотнения. То есть при близости значений температурных коэффициентов линейного расширения важно выбирать не только зазор в уплотнении, но темп изменения температуры роторного и статорного элементов уплотнения.

При использовании сочетания материалов с большим температурным коэффициентом линейного расширения роторного элемента уплотнения по сравнению со статорным (ротор – алюминиевый сплав АК6, статор – сталь типа AISI 440) в процессе захолаживания происходит увеличение зазора в уплотнении примерно в 1,5 раза. Изменение зазора не приводит к появлению возможности заклинивания уплотнения. Таким образом, в этом случае важнее выбрать первоначальный зазор в уплотнении, чем темп изменения температуры роторного и статорного элементов уплотнения.

Необходимо отметить, что любое изменение зазоров в уплотнениях ведет к изменению экономичности за счет изменения утечек через уплотнение и динамических характеристик системы ротор – уплотнение из-за перераспределения давления в уплотнительном зазоре и связанного с ним изменения сил. Изменение сил в уплотнительном зазоре при определенных условиях может привести к автоколебаниям в системе ротор – уплотнение, что вызывает повреждение

уплотнительных поверхностей, приводит к росту потребляемой мощности и в дальнейшем – выходу агрегата из строя.

На основном режиме работы при определении зазоров в уплотнениях необходимо учитывать не только силовые, но и термические деформации. Так, для уплотнения водородного насоса с полуподвижным кольцом [2], имеющим внутренний диаметр 100 мм, сравним термические и силовые деформации кольца при перепадах давления 5, 10, 15 МПа. Пересчет силовых деформаций кольца при изменении температуры осуществлялся по следующей зависимости:

$$\delta R_{\Delta p}^T = (E_T / E_{сб}) \cdot \delta R_{\Delta p}^{сб},$$

где $\delta R_{\Delta p}^T$, $\delta R_{\Delta p}^{сб}$ – радиальные деформации кольца от перепада давления Δp при температуре T и при температуре сборки;

E_T , $E_{сбК}$ – модули упругости материала кольца при температуре T и при сборке.

Температурные деформации кольца:

$$\delta R_{\Delta T} = \alpha \cdot R_y \cdot \Delta T,$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения материала кольца;

ΔT – изменение температуры уплотнения при работе по сравнению с температурой при сборке.

Ниже приведен график зависимости $K_T = \delta R_{\Delta T} / \delta R_{\Delta p}^T$ – отношения температурных и силовых деформаций от температуры уплотнения (рис. 7).

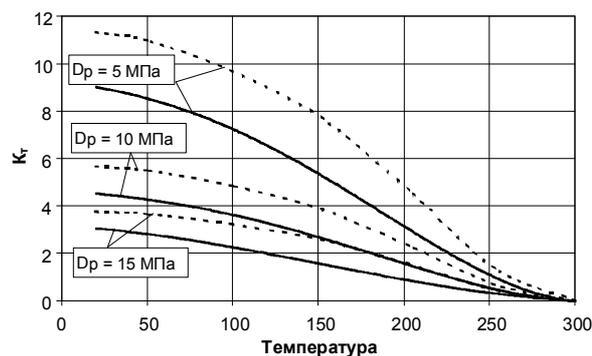


Рис. 7. Зависимость отношения температурных и силовых деформаций плавающих колец от их температуры

— — — кольцо из бронзы; — — — — — кольцо из стали

Из рисунка видно, что чем меньше перепад давления на уплотнении, тем быстрее начинается превышение температурных деформаций над силовыми. Например, для рас-

смаатриваемого уплотнения, в случае его изготовления из стали при перепаде давления 10 МПа при температуре жидкого водорода (20 К) температурные деформации превышают силовые примерно в 5,5 раза, а при изготовлении кольца из бронзы – примерно в 4,5 раза. Больше превышение температурных деформаций над силовыми для стали по сравнению с бронзой связано с тем, что соотношение между коэффициентами линейного расширения стали и бронзы составляет 0,83–0,91, а соотношение между модулями упругости стали и бронзы – 1,5–1,6, что свидетельствует о большей величине силовых деформаций кольца из бронзы по сравнению со стальным при сопоставимых значениях температурных деформаций колец из этих материалов.

Таким образом, при создании уплотнений криогенных насосов нельзя ограничиваться рассмотрением только захлаживания или только основного режима работы. Так, чтобы минимизировать влияние температурных деформаций на зазоры в уплотнениях необходимо либо подбирать материалы роторного и статорного элементов уплотнения с близкими значениями коэффициентов линейного расширения, либо использовать одинаковые материалы. Кроме того, при

проектировании агрегата необходимо выполнять расчет экономичности и динамических характеристик роторов с учетом зазоров в уплотнениях, полученных с учетом влияния всех факторов, в том числе температурных деформаций.

Библиографический список

1. Новицкий, Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник / Л.А. Новицкий, И.Г. Кожевников. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
2. Белоусов, А.И. Особенности конструкции и работы уплотнений проточной части водородных насосов / А.И. Белоусов, А.В. Иванов // Изв. Вузов. Авиационная техника. – 2007, № 1. – С. 31–33

References

1. Novitskiy L.A., Kozhevnikov I.G. Low temperature thermalphysic properties of materials. Handbook. – M.: Mashinostroenie, 1975 – 216 pp.
2. Belousov A.I., Ivanov A.V. Structural features and behavior of seals in the hydrogen pump flow passages // Russian aeronautics, 2007, Vol. 50, № 1, Allerton press, – pp. 37–40.

THERMAL DEFORMATION INFLUENCE TO CRYOGENIC PUMPS SEALS OPERABILITY

© 2009 A. V. Ivanov

Voronezh State Technical University

The bush seals and seals with semi-movable rings are widely used in rocket engines turbopumps. One of abnormal function of this seals causes is – contact of rotor and stator elements. This occurs due to incorrect selection of seal clearance that connected with thermal deformations.

Seal, rotor, stator, thermal deformation, temperature coefficient of linear expansion, sealing clearance, chill-down

Информация об авторе

Иванов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры ракетных двигателей Воронежского государственного технического университета. Воронеж, 394026, Московский проспект, 14. Тел. (4732) 34-61-08. e-mail: iav308@inbox.ru. Область научных интересов: турбонасосные агрегаты, динамика роторов, уплотнения проточной части.

Ivanov Anderei Vladimirovich, candidate of Technical Science, associate professor of Voronezh State Technical University Rocket Engines Department. Voronezh, 394026, Moskovskiy Prospekt 14. Tel/ (4732) 34-61-08. E-mail: iav308@inbox.ru. Area of research: turbopumps, rotor dynamics, flow path seals.