

УДК 621.455

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СНИЖЕНИЯ МОМЕНТА ТРЕНИЯ В УЗЛЕ ПОДВОДА ОКИСЛИТЕЛЯ РУЛЕВОГО АГРЕГАТА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2015 В.Б. Балякин, А.В. Лаврин

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва,
(национально исследовательский университет)

Поступила в редакцию 06.04.2015

В данной работе предлагаются методы и средства снижения момента трения узла качания подвода окислителя ракетного двигателя ракеты-носителя «Союз». Выявлены основные трибосопряжения в узле подвода и оценено их влияние на общий момент трения. Намечены основные пути снижения трения во вращающихся элементах.

Ключевые слова: момент трения, узел подвода, рулевой агрегат, трибосопряжения.

В связи с организацией стартовых площадок ракетносителей «Союз» на космодромах «Куру», а также «Восточный», возникает ситуация, когда отработанные узлы, работая в новых климатических условиях, с реализацией наиболее жёсткого (по количеству попыток запуска) эксплуатационного цикла, могут не обеспечивать характеристик, гарантируемых эксплуатационной документацией и требующихся заказчику. В частности, по предварительным оценкам, имеется тенденция к повышению момента трения в узлах качания (узлах подвода окислителя) рулевого агрегата, что в предельном случае может привести к возрастанию момента трения рулевого агрегата в целом.

Превышение заданных моментных характеристик, согласно действующей документации абсолютно недопустимо, так как в этом случае возможно уменьшение скорости перекладки рулевого агрегата рулевой машиной ракетносителя. Также следует отметить, что в процессе проведения контрольных испытаний серийных рулевых агрегатов на этапе до передачи их заказчику отмечаются отдельные случаи выхода моментных характеристик рулевых агрегатов за верхний установленный предел на величину до 10%. В настоящий момент это устраняется путём переборки рулевого агрегата с последующим повторением огневого испытания или возможным селективным подбором комплектующих узлов также с повторением огневого испытания, или выдачей ограничения на использование рулевого агрегата по назначению. Однако это достаточно дорогостоящие мероприятия. В данной работе ставится задача разработки методов и средств снижения момента трения в узле подвода рулевого двигателя (рис. 1).

Балякин Валерий Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Основы конструирования машин». E-mail: 029-029@mail.ru
Лаврин Андрей Владимирович, аспирант.

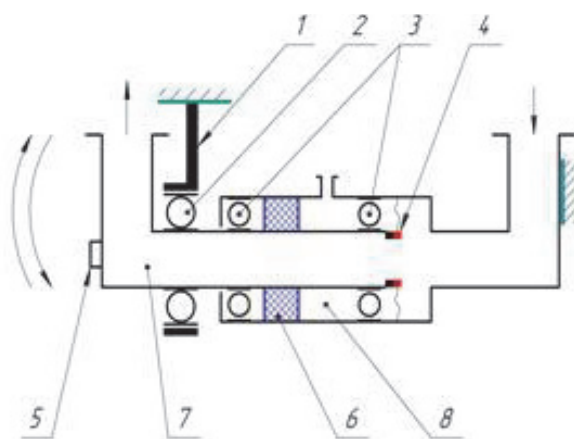


Рис. 1. Схема узла подвода окислителя рулевого агрегата:

- 1 – корпус;
- 2 – подшипник 6-208Ю2;
- 3 – подшипник 6-766907Ю;
- 4 – торцевое уплотнение основной полости;
- 5 – место присоединения камеры;
- 6 – манжетное уплотнение;
- 7 – основная полость узла;
- 8 – дренажная полость узла.

Для решения поставленной задачи была составлена функциональная схема узла подвеса и выявлены пять основных трибосопряжений, влияющих на суммарный момент трения, а именно радиально-упорный подшипник 2, два подшипниковых узла 3, торцевое уплотнение 4 и манжетное уплотнение 6.

Была проведена теоретическая оценка вклада выбранных трибосопряжений в суммарный момент трения и построена иерархическая структура влияния. Показано, что наибольший вклад в суммарный момент трения оказывает подпятник в торцевом уплотнении основной полости узла подвода, где осуществляется смазываемый трибоконтакт фторопласт - 4 и сталь 12Х18Н9Л и 12Х18Н10Т. В качестве штатной смазки использу-

ется ЦИАТИМ-205, которая согласно последним нормативным требованиям считается недостаточно взрывобезопасной в контакте с жидким кислородом, что требует отработки применения в составе узлов подвода окислителя консистентных смазок новых типов.

Основными методами снижения момента сопротивления в узлах трения являются:

трибологические; технологические; конструктивные и организационные.

Трибологические методы и средства это подбор новых типов смазочных материалов, выбор способа и оптимальных режимов смазки и т.д.

Технологические методы - применение новых материалов, наноструктурированных покрытий, снижение шероховатости поверхностей трения, уменьшение внешних нагрузок на узлы трения.

Конструктивные методы - разработка новых конструкций деталей узлов трения, а также применение перспективных подшипников.

К организационным методам можно отнести разработку, оптимизацию и соблюдение графиков монтажных, испытательных и пусковых работ.

Наибольший эффект при решении поставленной задачи может быть достигнут при комплексном подходе, когда будут использованы все или большинство методов и средств.

В качестве конструктивных методов снижения момента трения в торцовом уплотнении из фторопласта предлагается изменить площадь контактирующих поверхностей, так как момент трения в контакте кольцевых поверхностей зависит от площади поверхности и удельного давления в контакте $M_{тр} = \pi P f d (D^2 + d^2) / 8$ [1]. Важно отметить, что и коэффициент трения для фторопласта-4, зависит от удельного давления, поэтому данная задача не является однозначной [2]. Однако вследствие консерватизма заказчиков конструктивные изменения достаточно сложно внедрить в узлы и детали, поэтому необходимо определить наименее затратные методы и решать поставленную задачу поэтапно. Наиболее предпочтительными на наш взгляд являются трибологические и технологические методы и средства снижения трения. Первым этапом при решении поставленной задачи можно оптимизировать тип и режимы смазки. С этой целью была разработана программа исследования влияния типа и режима смазки на коэффициент трения в трибосопряжении фторопласт-4 и нержавеющая сталь. Испытания проводятся на трибометре швейцарской фирмы CSM (рис. 2). Для обеспечения идентичности условий испытаний различных типов смазок необходимо использовать испытательные образцы из фторопласта-4 изготовленные из одной партии материала с одинаковой шероховатостью. Для этого из партии образцов необходимо выбрать те, у которых ра-

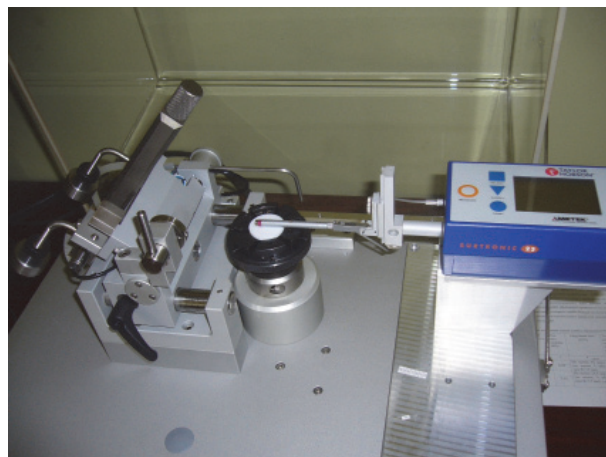


Рис. 2. Внешний вид трибометра с системой измерения шероховатости рабочей поверхности

бочие поверхности отличаются по шероховатости не более чем на 0,1 Ra. Очень важно в процессе эксперимента обеспечить режимы, соответствующие рабочим условиям по удельному давлению, скорости скольжения, влажности и температуре. В частности имитировать работу трибосопряжения в среде сжиженного газа и при очень низких температурах. Для этого используется жидкий азот и специальная чаша для испытаний (рис. 3).

Вторым этапом необходимо оценить влияние шероховатости и технологических методов обработки поверхностей трения на силу трения. Известно, коэффициент трения поверхностей зависит от их шероховатости. Причём зависимость коэффициента трения от шероховатости неоднозначна [1], для несмазанных материалов. Для смазанных контактов, эта зависимость ещё более сложная.

Третьим этапом можно исследовать влияние различных физических воздействий на фторопласт-4 с целью снижения трения. Известно, что радиоактивное облучение фторопласта-4 существенно уменьшает коэффициент трения и многократно снижает интенсивность износа рабочей поверхности [3]. В связи с этим предлага-



Рис. 3. Внешний вид установки для испытания в жидком азоте

ется заменить материал торцового уплотнения на радиационно – модифицированный фторопласт Ф4-PM20[4].

Однако необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования с целью определить трибологические свойства данного материала при условиях работы, соответствующих функционированию узла качания подвода окислителя.

Важным на наш взгляд условием работы трибосопряжений в ЖРД является их функционирование в вакууме, что необходимо исследовать. Для этого на кафедре ОКМ СГАУ смонтирован вакуумный трибометр швейцарской фирмы CSM (рис. 4).

Исследования на данном стенде позволяют оценить, как изменится коэффициент трения, а, следовательно, и момент трения во время работы двигателя с набором высоты ракеты. Это необходимо, чтобы оценить достоверность границы допускаемых значений момента трения в узле качания при наземных статических испытаниях.

Существенное влияние на момент трения в опоре узла подвески оказывает трение в радиально-упорных подшипниках. Потери на трение в смазочном слое определяются сопротивлением сдвигу смазки при скольжении и верчении в контактах. Силу и момент трения в эластогидродинамическом смазочном слое эллиптического контакта определим по формулам работы [5].

Силу трения скольжения в контакте шарика с внутренним кольцом определяют по формуле:

$$F_{fsc} = \pi \cdot a_H b_H \mu_0 n_f V_s / h_0, \quad (1)$$

здесь $a_H = f(\psi)$ и $b_H = f(\psi)$ – полуоси эллипса пятна контакта шарика, где ψ – угол перекоса колец подшипника; μ_0 – вязкость смазки; V_s – скорость скольжения в контакте шарика с дорожкой; h_0 – толщина слоя смазки; $n_f = ((\alpha p_m - 1) \exp(\alpha p_m) + 1) / (\alpha p_m)^2$ – пьезокоэффициент трения скольжения,

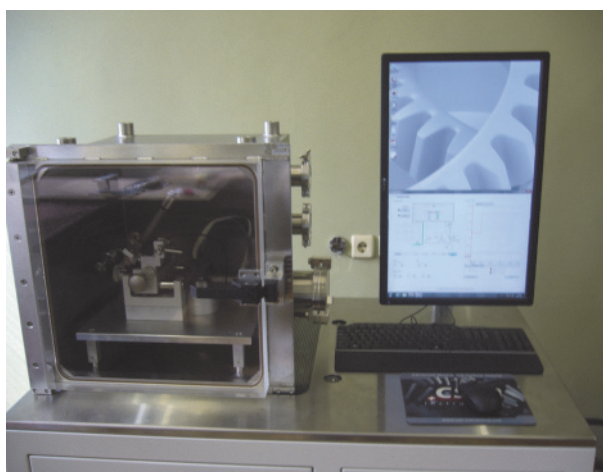


Рис. 4. Внешний вид вакуумного трибометра фирмы CSM

при этом: $p_m = \sigma_H$ при $\sigma_H \leq p_a$ и $p_m = p_a$ при $\sigma_H > p_a$, где $p_a = 7,914 \cdot t_m^{1,518}$ – давление «затвердевания» смазки, здесь t_m – температура смазки, $n_f = ((\alpha p_m - 1) \exp(\alpha p_m) + 1) / (\alpha p_m)^2$ – пьезокоэффициент смазки.

Момент трения верчения в эллиптическом контакте определяют по формуле:

$$T_{fcc} = \pi (a_H^3 b_H + a_H b_H^3) \mu_0 n_m \omega_s / h_0.$$

Здесь n_m – пьезокоэффициент трения верчения, определяемый по зависимости:

$$n_m = \frac{[2 \exp(\alpha p_m) + 1 - 6 \exp(\alpha p_m)] (\alpha p_m)^2}{(\alpha p_m) + 6(\exp(\alpha p_m) - 1) / (\alpha p_m)^2};$$

ω_s – угловая скорость вращения шарика относительно внутреннего кольца.

Согласно данным работы [5], полное значение момента трения верчения получим интегрированием по площадке контакта:

$$T_{fk} = 3\pi \cdot f F_n a_H (q_k / q) \cdot S / (16(1+m)), \quad (2)$$

где f – коэффициент трения в контакте, F_n – нормальное усилие в контакте; q и q_k – полная и единичная нагрузка в контакте; $m = (a_H - b_H) / (a_H + b_H)$; S – значение ряда, вычисляемого по формуле:

$$S = 1 + \frac{m^2}{2^2} + \frac{m^4 \cdot 1^2}{2^2 \cdot 4^2} + \frac{m^6 \cdot 1^2 \cdot 3^2}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} + \frac{m^8 \cdot 1^2 \cdot 3^2 \cdot 5^2}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2 \cdot 8^2} + \dots$$

Анализ уравнений (1) и (2) показывает, что для снижения момента трения в подшипнике качения необходимо уменьшать коэффициент трения в контакте и угол перекоса колец подшипника. В связи с этим необходимо провести исследования по влиянию несоосности подшипников в конструкции с целью оценки её влияния на момент трения в опоре.

Предложенные направления исследований не являются полными и всеобъемлющими, поэтому в дальнейшем могут быть рассмотрены и другие пути снижения момента трения в узлах качания подвода окислителя и горючего жидкостного ракетного двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жильников Е.П., Самсонов В.Н. Трение и изнашивание в узлах авиационной техники / Самара: Изд. Самарского аэрокосм. ун-та. 2007. 143 с.
2. Крагельский И.В. Основы расчётов на трение и износ / В.Крагельский, М.Н. Добычин, В.М. Камбалов. М.: Машиностроение, 1977. 487 с.
3. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов. М.: Эко-Пресс. 2010. 604с.
4. Новый класс износостойких материалов, полученных радиационной модификацией политетрафторэтилена в расплаве / С.А.Хатинов, С.А. Серов, Н.В. Садовская // Вопросы материаловедения. 2012. №4. С.191-201

5. Теория и проектирование опор роторов авиационных ГТД/ В.Б. Балякин, Е.П. Жильников, В.Н.

Самсонов, В.В. Макарчук. Самара: Изд. Самарского аэрокосм. ун-та. 2007. 253 с.

METHODS AND MEANS OF REDUCING THE FRICTION MOMENT IN THE ASSEMBLY FOR SUPPLYING OXIDIZING AGENT TO THE STEERING AGGREGATE OF A ROCKET ENGINE

© 2015 V.B. Balyakin, A.B. Lavrin

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Studied in this work are the methods and means of reducing the friction moment in the assembly for supporting the steering engine for the rocket booster "Souz". The main tribological assemblies in the support were revealed and their influence on the total frictional moment was assessed. The ways and phases of reducing friction in the rotating units were determined.

Keywords: friction moment, support, steering aggregate, tribological assemblies.

*Valery Balyakin, Doctor of Technics, Professor, Head at the
Fundamentals of Machine Design Department.*

E-mail: 029-029@mail.ru

Andrey Lavrin, Graduate Student.