

УДК 621.89

## СМАЗКА ШАРИКОПОДШИПНИКОВ МИКРОЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е. М. Михайлов

*Рассматриваются вопросы влияния смазки шарикоподшипников на долговечность бесконтактных микроэлектродвигателей постоянного тока, применяемых в космических аппаратах. Приводится обоснование выбора типа и конкретных марок смазок для шарикоподшипников бесконтактного электродвигателя постоянного тока серии БК. По результатам испытаний электродвигателей подтверждается метод расчета реальной долговечности смазки и шарикоподшипников с учетом теплового состояния смазки. Анализируется уровень корреляции фактических результатов испытаний с расчетной долговечностью с помощью температурных коэффициентов. Оцениваются результаты испытаний электродвигателей, шарикоподшипники которых работают в условиях «масляного голодания».*

**Ключевые слова:** пластичная смазка, вязкость, моменты трения, температура, шарикоподшипники.

Разработанные во ВНИИЭМ к концу 1950-х годов микроэлектродвигатели постоянного тока (ДПТ) типа ДПМ были лучшими в стране в своем роде, но обеспечивали ресурс 200 – 1000 ч (в зависимости от скорости вращения) из-за наличия, как и во всех ДПТ, быстро изнашивающегося щеточно-коллекторного узла. Они применялись в бурно развивающейся в те годы космической технике, начиная с полета Гагарина на корабле «Восток», и далее в малоресурсных космических аппаратах (КА). Но уже тогда осознавалась острая необходимость увеличения долговечности подобной техники для КА.

В 1960 г. во ВНИИЭМ впервые в стране был разработан бесконтактный электродвигатель постоянного тока (БДПТ) без щеток и коллектора, что решило эту проблему в принципе. Первые БДПТ типа БП и БПС были применены в 1961 г. на КА «Молния», обеспечивающем телевизионную связь Владивостока с Москвой, и имели гарантированный ресурс 7500 ч. Теперь основным ограничителем долговечности таких электродвигателей (ЭД) стали шарикоподшипники (ШП), которыми ранее, по большому счету, не было нужды заниматься.

Не рассматривая эту очередную проблему в целом, следует сразу же отметить, что уже к концу 1960-х годов в зарубежных публикациях указывалось на некорректность расчетов долговечности малонагруженных ШП с пластичной (консистентной) смазкой по существующей методике, основанной на процессах износа ШП под действием нагрузки, так как ошибки при этом могут достигать 500 раз. В отличие от устройств, позволяющих применять оптимальную масляную смаз-

ку, в рассматриваемых БДПТ, как, впрочем, и в других микроэлектродвигателях, применяются приборные ( $d_{\text{внутр}} \leq 10$  мм) ШП с пластичной смазкой, имеющие, как правило, аномально малые нагрузки. В тех же публикациях предлагалась следующая градация нагруженности ШП с точки зрения обеспечения их долговечности:

$$\begin{aligned} Q &= 0,05C - \text{легкая нагрузка;} \\ Q &= 0,1C - \text{средняя нагрузка;} \\ Q &= 0,15C - \text{тяжелая нагрузка,} \end{aligned}$$

где  $Q$  – эквивалентная нагрузка на ШП;  $C$  – его каталожная динамическая грузоподъемность.

При том, что отношение  $(C/Q)^3$  является определяющим в формуле долговечности, а также учитывая тот факт, что в приборной технике отношение  $Q$  и  $C$  достигает значений  $Q = 0,0025C$ , становится ясно, что расчетная долговечность достигнет фантастических значений в миллионы часов, и что реальная долговечность ШП определяется второй, непременно его составляющей – смазкой. Именно от свойств пластичной смазки (ПС), не позволяющих вытекать ее масляной основе, зависит успешное восприятие подшипником контактных напряжений, температуры, влаги, собственных вибраций, моментов трения и влияния окружающей среды.

Если учесть, что применительно к космической технике речь идет об одноразовой закладке смазки на весь срок службы изделия, в котором она используется, то становится понятна ее роль в обеспечении истинной долговечности ШП и изделия в целом. В то же время разработчики изделий уделяют недостаточно внимания вопросам выбора и применения смазок.

Возможно, это объясняется скудостью информации по смазкам, а также неосознанным отчуждением ее в сознании инженеров-электромехаников (ведь смазка – это «химия»), что заставляет их целиком полагаться на рекомендации разработчиков смазок, или что еще хуже, их поставщиков.

Разработчик смазок – Всесоюзный научно-исследовательский институт по переработке нефти (ВНИИ НП) выпустил в 1984 г. единственный на сегодняшний день краткий справочник по ним. Не говоря уже об отсутствии ответов на многие специфические вопросы потребителей, в нем указываются, как высшие достижения, наработки смазок 10 – 15 тыс. ч при средних скоростях вращения ШП. И это при существовавшей во ВНИИ НП многолетней практике согласования применения смазок потребителями и встречном предоставлении потребителями результатов испытаний. В связи с изложенным, не претендуя на полноту информации по затронутой теме, представляется полезным поделиться накопленным опытом и сведениями, почерпнутыми из различных публикаций.

Вкратце о природе пластичных смазок. Они представляют собой особый класс смазочных материалов, приготовляемых введением в дисперсионную среду (смазочное «масло») специальных загустителей (так называемых «мыл»), являющихся как бы сотовым каркасом, содержащим масло и ограничивающим его текучесть. Большинство ПС в широком диапазоне температур ведут себя как твердые упругие тела, испытывая под влиянием нагрузок обратимые деформации. В условиях, когда ПС могут течь, их текучесть отличается от текучести масел, так как внутреннее трение ПС и их вязкость не являются их физической константой в отличие от кинематической вязкости масел и вообще ньютоновских жидкостей.

Таким образом, основным отличием ПС от масел является:

– способность течь только под действием сил, превышающих их предел текучести, или при высоких температурах;

– аномальное внутреннее трение и ограниченная текучесть, связанные с их коллоидной природой и структурой.

Поэтому показатели эффективной динамической вязкости ПС измеряются в пуазах (пз) или в Па·с при обязательном указании так называемого «градиента скорости» сдвига слоев смазки. Принятые значения градиентов ( $D$ ) для плюсовых и отрицательных температур соответственно 1000 и 100 1/с. По существу, динамическая вязкость ПС – это коэф-

фициент пропорциональности между напряжением сдвига  $\tau$  и «градиентом скорости»  $D$ :  $\eta_{эф} = \tau/D$  [1].

По принятой во ВНИИ НП классификации ПС делятся по назначению и химическому составу на 17 классов, из которых для приборостроения представляют интерес приборные (П), вакуумные (В) и, отчасти, многоцелевые (М). При выборе разработчиком изделия смазок преимущественно по признаку малой вязкости, с целью достижения минимально возможных моментов трения в ШП следует внимательно знакомиться с ее прочими свойствами и областью применения, так как имеющаяся поверхностная информация не всегда полна или даже достоверна.

Весьма характерен в этом смысле пример с гироскопической смазкой ВНИИ НП-260 (В-260), которую некоторые «горячие головы» во ВНИИЭМ рекомендовали как наилучшую для БДПТ. Ее температурный диапазон обозначен как  $-50 \dots +180$  °С [2], что, естественно, вполне устраивает большинство разработчиков изделий, учитывая ее малую вязкость при плюсовых температурах. Однако, при внимательном рассмотрении оказывается, что ее вязкость при  $t = 0$  °С составляет 1000 пз ( $D = 100$  1/с), в то время как вязкость других, также приборных смазок, не более 450 пз при  $t = -40$  °С ( $D = 100$  1/с). И только после тщательных «раскопок» удается обнаружить утверждение: «...ее высокая вязкость не позволяет рекомендовать смазку для использования при температуре ниже  $-20$  °С» [2, с. 87]. Еще бы ведь при необходимости запуска ЭД мощностью  $\leq 20$  Вт с этой смазкой, при  $t = -50 \dots -60$  °С они просто не запускаются.

При разработке первых двух поколений БДПТ во ВНИИЭМ в 1960 – 1971 гг. преимущественно для систем терморегулирования (ТР) и жизнеобеспечения (СОЖ) космических станций «Салют» и «Алмаз», основное внимание было уделено работе со смазками, имея ввиду достижение ресурсов 10 – 15 тыс. ч. Были опробованы известные на тот момент «авиационные» смазки ЦИАТИМ-201 и ЦИАТИМ-221, ОКБ-122-7, гироскопические смазки, приборные В-293 и В-214 (с дисульфидом молибдена). Некоторое время ЭД выпускались со смазками В-293 и В-214, но результаты испытаний были нестабильны.

В качестве загустителей перечисленных смазок использовались соединения – «мыла» – на основе кальция или натрия, в зависимости от требований к смазке. К началу 1970-х годов разработчики смазок установили, что оптимальными загустителями являются соединения на основе лития (Li), и появились первые многоцелевые «литиевые» смазки, в частности, ВНИИ НП-271 (В-271). ВНИИЭМ явился

одним из первых потребителей этой смазки, применив ее в разработанной в 1972 – 1975 гг. серии БДПТ типа БК-1 [3]. Серия охватывала диапазон мощностей от 1 до 100 Вт, при скоростях вращения от 3000 до 10 000 об/мин и при требованиях стойкости к температуре окружающей среды  $-60 \dots +70 \text{ }^\circ\text{C}$ , относительной влажности 98% при  $+35^\circ\text{C}$ , стойкости к инею, соляному туману, радиации и весьма жестким механическим воздействиям. В зависимости от скорости вращения предполагаемый, на момент разработки, ресурс составлял 15 – 25 тыс. ч. В серии используются нержавеющие приборные ( $d = 2 \dots 8 \text{ мм}$ ) ШП, 5-го класса точности и 2-й группы радиальных зазоров, имеющие «змейковые» сепараторы и защитные шайбы. По своим параметрам ШП соответствуют «легкой» серии отечественных ШП.

Не касаясь здесь конструкторских решений по серии [4, 5], направленных на достижение столь значительных по тому времени ресурсов, следует еще раз подчеркнуть роль смазки, которая должна была соответствовать перечисленным выше требованиям при одноразовой ее закладке в ШП.

Характеристики смазки В-271:

- температурный диапазон применения:  $-60 \dots +130 \text{ }^\circ\text{C}$
- «масло» – диоксилсебацинат;
- загуститель – литиевое «мыло» стеариновой кислоты и гидрированное касторовое масло (сохранение загустителя в смазке 10 ... 12 %);
- антизадирная и противоизносная присадка – трикрезилфосфат;
- вязкость динамическая  $\mu$  (пз):

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$+50^\circ\text{C}$ и $D = 1000 \text{ 1/с}$	$-40^\circ\text{C}$ и $D = 100 \text{ 1/с}$
$\mu$	$\geq 5,0 (0,5 \text{ Па}\cdot\text{с})$	$\leq 500 (50 \text{ Па}\cdot\text{с})$

- разброс значений вязкости от партии к партии 4,0 ... 8,0 пз при  $+50^\circ\text{C}$  и 300...420 пз при  $-40^\circ\text{C}$ ;
- кинематическая вязкость «масла»  $\gamma$  (сСт или  $\text{мм}^2/\text{с}$ ):

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$+20^\circ\text{C}$	$+40^\circ\text{C}$	$+50^\circ\text{C}$	$+100^\circ\text{C}$
$\gamma$	32,8	15,8	11,7	4,08

- цвет светлый, с активным фиолетовым оттенком;
- удельный вес: 1,0 ... 1,02  $\text{г}/\text{см}^3$ ;
- давление паров смазки (мм. рт. ст.):

$+20^\circ\text{C}$	$+50^\circ\text{C}$	$+100^\circ\text{C}$
$4,7 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-2}$

– предпочтительное контактное напряжение в ШП:  $\sigma_k \leq 15000 \text{ кг}/\text{см}^2$ ;

– по результатам испытаний во Всесоюзном научно-исследовательском институте подшипниковой промышленности (ВНИПП) смазка является самой «быстроходной», обеспечивая так называемый «скоростной параметр»  $[d_0 n] = 18 \cdot 10^5$ , что в 1,2 ... 1,4 раза выше, чем у гироскопических смазок ( $d_0$  – средний диаметр ШП, мм;  $n$  – скорость, 1/мин);

– гарантийный срок хранения в таре поставщика 2 года.

Ресурсные испытания электродвигателей БК-1 по программе периодических испытаний на соответствие ОСТу подтвердили намеченные при разработке ресурсы 15 – 25 тыс. ч, однако, не давали ответа на вопрос о реальных возможностях смазки, так как дальнейшие испытания ЭД, достигших заданного ресурса, в силу различных причин, не продолжались. Тем не менее, влияние собственных перегревов на смазку в ЭД старших габаритов серии (БК-16 и БК-18) было отмечено.

В связи с начавшими поступать от заказчиков заявками на ЭД с ресурсами 40 – 50 тыс. ч, в 1980 г., по специальному решению, необходимое продолжение ресурсных испытаний было начато. В программу испытаний, преследовавшей цель добиться отказов ЭД (их остановки), вошли маломощные (до 16 Вт) ЭД первых 3-х габаритов серии с малыми собственными потерями и, соответственно, перегревами, и скоростью вращения  $n \leq 6000 \text{ 1/мин}$ . Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таким же ресурсным испытаниям подверглись ЭД БК-16 и БК-18, их результаты приведены в табл. 2.

В табл. 3 вошли ЭД младших габаритов со скоростью 10000 1/мин, к сожалению, не доведенных до отказов (исключение БК-1518), а также данные по натурной эксплуатации.

По результатам испытаний в конце 1980-х годов уже оформлялись гарантии на ресурс отдельных ЭД с  $n \leq 6000 \text{ 1/мин}$  на 40 – 50 тыс. ч.

Прежде чем перейти к оценке результатов испытаний, полезно остановиться на критериях воздействия на смазку температуры. В начале 1970-х годов Загорский филиал ВНИПП предлагал следующие температурные коэффициенты  $K_T$  снижения расчетной долговечности ШП ( $T_{\text{расч}} \cdot K_T$ ), видимо ориентируясь на более крупные подшипники с «тяжелыми» смазками (табл. 4).

Таблица 1

Тип изделия	Номинальная мощность, Вт	Номинальная скорость вращения, 1/мин	Кол-во изделий, шт.	Средняя фактич. наработка на отказ, ч · 10 <sup>3</sup> (T <sub>ф.ср</sub> )	Примечание
БК-1323	1,0	3 000	3	100,0 (без отказа)	Разброс отказов ±10% от T <sub>ф.ср</sub>
БК-1316	1,6	6 000	6	125,0	
БК-1424	6,0	4 000	3	116,0	
БК-1526	16,0	6 000	3	120,0	

Таблица 2

Тип изделия	Номинальная мощность, Вт	Номинальная скорость вращения, 1/мин	Кол-во изделий, шт.	Средняя фактич. наработка на отказ, ч · 10 <sup>3</sup> (T <sub>ф.ср</sub> )	Наработка без отказа, ч · 10 <sup>3</sup>	Примечание
БК-1626	40,0	6 000	6	–	40,0	Разброс отказов ±7,5% от T <sub>ф.ср</sub>
БК-1618	40,0	10 000	13	30,5 (3 шт.)	30,0 – 36,0	
БК-1638	40,0	10 000	5	36,0	–	
БК-1826	90,0	6 000	13	–	37,0 – 42,0	
БК-1818	90,0	10 000	15	35,0 (3 шт.)	30,0 – 42,0	

Примечание: многочисленные наработки (25,0 – 30,0)10<sup>3</sup> ч без отказов не указаны.

Таблица 3

Тип изделия	Номинальная мощность, Вт	Номинальная скорость вращения, 1/мин	Кол-во изделий, шт.	Средняя фактич. наработка на отказ, ч · 10 <sup>3</sup> (T <sub>ф.ср</sub> )		Примечание
				без отказов	с отказами	
БК-1318	1,6	10 000	9	34,0	–	
БК-1418	6,0	10 000	13	24,0	–	
БК-1518	16,0	10 000	6	–	30,0	
БК-1509	16,0	15 000	9	3,5	–	
<b>Натурная эксплуатация</b>						
БК-1533	10,0	3 000	14	81,0	–	Прекращение работы с закрытием объектов
БК-1414	4,0	4 000	6	70,0	–	
БК-1323	1,0	3 000	3	70,0	–	
БК-1633	25,0	3 000	7	75,0	–	
ДМ		~500	6	100,0	–	Давление окружающей среды 30 ... 50 мм.рт.ст
			6	70,0	–	

Таблица 4

t, °C	100	110	120	130	140	150
K <sub>T</sub>	1,0	0,6	0,57	0,24	0,15	0,1

Тот же автор [6] через 15 лет, в результате исследования влияния температуры на смазку мало-нагруженных ШП, при необходимости их долговременной работы, указывал следующие значения K<sub>T</sub> (табл. 5):

Таблица 5

t, °C	50	60	70	80	90	100	110	120	130	150
K <sub>T</sub>	1,0	0,96	0,74	0,64	0,56	0,5	0,44	0,34	0,12	0,09

А известная немецкая подшипниковая фирма FAG высказывается (в подшипниковом каталоге) по этому вопросу следующим образом: «Если температура ШП длительное время превышает +70°C,

то срок службы смазки ощутимо уменьшается». Столь же авторитетная шведская фирма SKF утверждает, что: «Если температура ШП выше +70°C, то через каждые 15°C расчетную долговечность необходимо уменьшать вдвое».

Приведем пример с ЭД БК-1626, имевшего, при весьма посредственном теплоотводе, перегрев обмотки статора 55°C. При температуре окружающей среды +35°C и 5-градусной стандартной надбавке превышения температуры внутреннего кольца ШП над наружным – температура ШП 95°C. И, в свете рекомендаций SKF, от расчетной долговечности ШП 60 – 80 тыс. ч остается 20 – 25 тыс. ч. При мощном кольцевом алюминиевом теплоотводе толщиной 5 мм, охватывающем весь корпус ЭД, и укрепленном на массивной плите, перегрев обмотки статора ЭД не превышал 20°C. Да только ни один

разработчик КА не может себе позволить таких теплоотводов, тем более учитывая количество ЭД на борту.

Поэтому, при попытке оценить реальную долговечность такого ЭД, представляется целесообразным рассчитывать на усредненный вариант теплоотвода, обеспечивающего перегрев хотя бы  $+40^{\circ}\text{C}$ , и при температуре среды на борту КА  $\leq 25^{\circ}\text{C}$  ( $+5^{\circ}\text{C}$  упомянутая надбавка), суммарная температура ШП  $70^{\circ}\text{C}$ . При  $K_T = 0,74$  по табл. 5 долговечность  $T_{\text{расч}} \cdot K_T$  составит  $\sim 60$  тыс. ч, да и то в предположении повторно-кратковременного режима работы, учитывая мнение фирмы FAG.

Переходя к оценке результатов испытаний, в основном по отказавшим ЭД ( $T_{\text{ф.ср}}$ ), надо отметить, что несмотря на малые выборки по каждому из типовых размеров, они могут быть объединены в группы по признакам близкой мощности, скорости или потери. Это, в сочетании с приличной кучностью отказов, позволяет делать выводы о возможностях смазки и увеличивать нынешние гарантийные ресурсы ЭД.

ЭД по табл. 1, по существу, являются такой группой изделий с малой мощностью, скоростями вращения до 6000 1/мин и малыми перегревами. Замеры температуры корпусов ЭД БК-1316, БК-1418 и БК-1526 (без теплоотводов), составившие 35, 45 и 38  $^{\circ}\text{C}$  соответственно, в сочетании с наработками при натурной эксплуатации (табл. 3) подтверждают это.

Наработки ЭД по табл. 1, подтвердившие ресурсы 100 тыс. ч, получены (с вынужденными перерывами) за 30 лет, что весьма существенно, так как подтверждают 25-летние сроки службы не только смазки и ШП, но и изоляции, датчиков Холла, ЭРИ коммутатора. И, наконец, особенно впечатляющий факт – при разборке ЭД БК-1323, сразу после достижения заветных 100 тыс. ч ресурса, было обнаружено почти полное засорение передних ШП пылью и сохранение смазки в задних ШП в работоспособном состоянии после стольких лет эксплуатации.

Таким образом, расчетная долговечность ШП этой группы изделий со смазкой ВНИИ НП-271 может уверенно определяться по предложенной ранее [5] формуле:

$$T_{\text{расч}} = \frac{40 \cdot 10^{12} \sqrt[6]{d_{\text{ш}}}}{[d_0 n] \sigma_{\text{к}}}, \text{ ч},$$

без дополнительного учета перегревов ЭД, так как температура их ШП не превышает 50 ... 60  $^{\circ}\text{C}$ . В формуле:  $d_0$  – средний диаметр ШП, мм;  $n$  – скорость вращения, 1/мин;  $\sigma_{\text{к}}$  – контактное напря-

жение в ШП ( $\text{кг}/\text{см}^2$ ), принятое по расчетам как 8000  $\text{кг}/\text{см}^2$ ;  $\sqrt[6]{d_{\text{ш}}}$  – коэффициент, корректирующий разницу между габаритами серии;  $d_{\text{ш}}$  – диаметр шара ШП, мм.

Некоторое превышение долговечности  $T_{\text{расч}}$  над фактическими наработками  $T_{\text{ф.ср}}$  (приведены в табл. 6) будет с лихвой перекрыто при соблюдении чистоты окружающей среды.

Что касается ЭД БК-16 и БК-18 (табл. 2) мощностью 40 и 90 Вт и скоростью преимущественно 10 000 1/мин, то влияние температуры на их смазку явно ощущается по разнице  $T_{\text{расч}}$  и  $T_{\text{ф.ср}}$ . В связи с этим сделана попытка оценить корреляцию между этими величинами с помощью теплового коэффициента  $K_T$  (табл. 5), то есть сопоставлять  $T_{\text{ф.ср}}$  с  $T_{\text{расч}} \cdot K_T$ .

Определение температуры шарикоподшипника и соответствующего  $K_T$  проведено следующим образом:

– в предположении равноценных условий охлаждения рассматриваемых ЭД с ЭД БК-1626, принятого за базовый (по причине наиболее четких замеров его перегревов, и учитывая рассмотренный выше вариант его перегрева до  $40^{\circ}\text{C}$  при температуре среды  $\leq 25^{\circ}\text{C}$ ), сравниваются их тепловые нагрузки;

– удельные тепловые нагрузки:

$$\Theta_i = \frac{\Delta P_i P_i}{G_i S_i P},$$

где  $\Delta P_i$  – потери ЭД, Вт;  $G_i$  – масса ЭД, кг, без учета коммутатора;  $S_i$  – площадь теплоотводящей поверхности корпуса,  $\text{см}^2$ , без учета коммутатора;  $P_i/P$  – коэффициент коррекции разницы мощностей;  $P_i$  – мощность оцениваемого ЭД;  $P$  – мощность ЭД БК-1626 равная 40 Вт;

– по отношению тепловых нагрузок  $\Theta_i$  и  $\Theta_{\text{БК-1626}}$  и принятым для него перегревом  $t = 40^{\circ}\text{C}$  определена температура перегрева  $t_i$  оцениваемого ЭД:

$$t_i = \frac{t \Theta_i}{\Theta}, \text{ } ^{\circ}\text{C};$$

– далее – температура ШП:

$$t_{\text{шп}} = t_i + 25 + 5, \text{ } ^{\circ}\text{C},$$

и, в соответствии с полученной  $t_{\text{шп}}$ , по табл. 5 выбирается  $K_T$ .

Результаты расчетов и конечные значения расчетной долговечности  $T_{\text{расч}} \cdot K_T$  приведены в табл. 6. Сопоставляя эти значения с фактическими нара-

ботками  $T_{ф.ср}$ , видно, что отличия между ними не более 30%, что уже само по себе приемлемо. В тоже время, без засорения ШП пылью, а также с приемлемыми теплоотводами, наработки на отказ ЭД этой группы были бы безусловно выше, что подтверждается также имеющимися наработками без отказа. Соответственно разница  $T_{ф.ср}$  с  $T_{расч} \cdot K_T$  снизится до 15 ... 20 %.

В результате можно утверждать, что:

– предложенный подход к оценке реальной долговечности смазки (ШП) для ЭД с ощутимыми перегревами работоспособен при фактически установленном перегреве ЭД или его аналогов;

– смазка при перегревах статора ЭД  $\leq 40^\circ\text{C}$  ( $t_{шп} \leq 70^\circ\text{C}$ ) обеспечивает удовлетворительные, для  $n = 6000 \dots 10000$  1/мин, ресурсы 40 – 50 тыс. ч.

В табл. 3 включены ЭД младших габаритов серии с максимальной скоростью  $n = 10\ 000$  1/мин, но без наработок до отказа, а также ЭД с натурной эксплуатацией. Исключение ЭД БК-1518. При максимальной скорости и наибольшей среди рассмотренных ЭД удельной тепловой нагрузке  $\Delta P/GS$ , он ближе к ЭД БК-16 и БК-18.

С повышением скорости вращения до 10 000 1/мин и выше рост момента трения в ШП, за счет его гидродинамической составляющей [7], приводит к сопоставимости потерь от этого момента трения с общими потерями  $\Delta P$  в ЭД. В ЭД БК-1518, БК-1618 и БК-1818 потери эквивалентные росту момента трения в ШП, достигают 32 ... 36 % от  $\Delta P$ , в то время как в ЭД с  $n = 6000$  1/мин только 12 ... 14 %. Причем эта надбавка потерь, а следовательно, и тепла, непосредственно в ШП, что, в первую очередь, сказывается на смазке и объясняет относительно ранние отказы ЭД БК-1518.

Приведенные в табл. 3 результаты наработок в натурной эксплуатации подтверждают выводы о работоспособности смазки, сделанные по отношению к ЭД табл. 1.

С точки зрения оценки сроков службы смазки ВНИИ НП-271, целесообразно, в дополнение к данным по ЭД табл. 1, упомянуть результаты натурной эксплуатации двигателей-маховиков ДМ, которые при  $n \approx 500$  1/мин и давлении окружающей среды 30 ... 50 мм. рт. ст. наработали без отказов:

6 шт. – 12 лет;

6 шт. – 8 лет;

30 шт. – 4 ... 6 лет.

Отказов ДМ на многочисленных КА не было.

Завершая рассмотрение результатов испытаний БДПТ серии БК-1, со смазкой ВНИИ НП-271, предназначенных для долговременной работы в газовой среде в составе космических аппаратов, можно утверждать, что по совокупности качеств, отвечающих требованиям, предъявляемым к ЭД, смазка и на сегодняшний день оптимальна.

В 1980-х годах начались разработки изделий, которые должны были эксплуатироваться в космическом вакууме. Общими для них являются малые мощности, соизмеримые с ЭД по табл. 1, отсутствие ощутимых перегревов, низкие скорости вращения и еще более высокие требования к долговечности изделий, в связи с чем еще более возрастает роль смазки. Результаты проводившихся к тому времени экспериментальных работ по определению стойкости смазочных материалов для ШП, работающих в вакууме, не позволяли принять оптимальное решение ни по виду смазки (сухая или пластичная), ни по конкретным смазочным материалам.

Таблица 6

№ п/п	Тип изделия	$P_2$ , Вт	$\Delta P$ , Вт	$\frac{\Delta P}{GS}$	$\frac{P_i}{P}$	$\Theta$	$t_b, ^\circ\text{C}$	$t_{шп}, ^\circ\text{C}$	$K_T$	$T_{расч}, \text{ч} \cdot 10^3$	$T_{расч} \cdot K_T, \text{ч} \cdot 10^3$	$T_{ф.ср}, \text{ч} \cdot 10^3$	$\frac{T_{ф.ср}}{T_{расч} \cdot K_T}$
1	БК-1323	1,0	1,5	0,3	0,025	0,008	2,7	33	1,0	277	277	100 (б/о)	–
2	БК-1316	1,6	2,1	0,67	0,04	0,027	9,0	40	1,0	137	137	125	0,91
3	БК-1424	6,0	4,0	0,2	0,15	0,03	10,0	40	1,0	170	170	116	0,68
4	БК-1526	16,0	7,5	0,2	0,4	0,08	27	57	0,99	97,5	97,5	120	1,23
5	БК-1518	16,0	7,5	0,3	0,4	0,12	40	70	0,74	58	43	30	0,7
6	БК-1626	40,0	15	0,12	1,0	0,12	40	70	0,74	85	63	40 (б/о)	0,64
7	БК-1618	40,0	16	0,19	1,0	0,19	63	93	0,55	50	28	30,5	1,1
8	БК-1638	40,0	16	0,07	1,0	0,07	23	53	0,99	50	50	36	0,72
9	БК-1826	90,0	27	0,06	2,25	0,135	45	75	0,7	62	44	40 (б/о)	0,9
10	БК-1818	90,0	28	0,1	2,25	0,22	75	105	0,48	40	20	35	1,75

б/о – без отказа.

Появившиеся ШП с твердыми смазками в ЭД малой мощности могли иметь лишь ограниченное применение из-за существенного повышения момента трения с течением времени. Кроме того, устойчивое изготовление таких ШП не было освоено, а перспективы его освоения не просматривались.

Поэтому к дальнейшему рассмотрению были приняты пластичные смазки, обеспечивающие стабильность моментов трения при длительной работе. К ним относились условно «вакуумные» смазки В-258, В-293, В-270, В-274 и В-284 с различными по химическому составу «маслами» и загустителями, кратковременно апробированные в вакууме при наземных испытаниях.

Интенсивность испарения смазок в ШП при работе в вакууме, в основном, определяется разностью между давлением насыщенных паров смазки в подшипниковом узле и внешним давлением. Достоверные данные о давлениях на поверхности КА, также, как и о давлении насыщенных паров смазки, практически отсутствовали.

В 1980 г. на поверхности КА «Интеркосмос-Болгария-1300», с орбитой ~700 км, был установлен блок с 16 ЭД БК-1416 и ДСГ-1 со смазками В-274 (8 шт.), В-284 (6 шт.) и В-271 (2 шт. ДСГ-1) для испытания смазок в условиях открытого космоса. ЭД были прикрыты защитным кожухом от прямого воздействия солнечных лучей и микрочастиц. К сожалению, давление в зоне установки блока не контролировалось. За исключением одного ЭД ДСГ-1 со смазкой ВНИИ НП-271 (наработавшего >6000 ч) все остальные наработали без отказа, при периодических включениях, 10 000 ч в течение трех лет. По результатам этих испытаний, а также параллельных им наземных испытаний изделий со смазкой ВНИИ НП-274 в вакуумной камере, было принято решение об использовании в ШП изделий, работающих в условиях открытого космоса, «литиевой» смазки ВНИИ НП-274Н (нефильтрованная).

Уместно заметить, что комковатость частиц смазки «Н» может достигать 75 мкм, а смазки «Ф» (фильтрованная) – 30 мкм. Однако это преимущество смазки «Ф» кажущееся, так как, во-первых, комковатость смазки преодолевается телами качения и через незначительное время устраняется, а во-вторых при фильтрации происходит измельчение «волокон» загустителя, смазка уплотняется, и ее вязкость при температуре  $t = -40^{\circ}\text{C}$  составляет 800 пз, при вязкости смазки «Н»  $\leq 550$  пз. Это же подтверждали испытания Всероссийского научно-исследовательского института малых электрических машин (ВНИИЭМ) (Ленинград).

Характеристика смазки ВНИИ НП-274Н:  
 – рабочий температурный диапазон:  $-60 \dots +150^{\circ}\text{C}$ ;  
 – «масло»: полихлорсилоксановая жидкость ХС-2-1ВВ;  
 – загуститель: гидроокись лития и стеарат лития LiSt и 12-LioSt;  
 – динамическая вязкость  $\mu$  (пз):

$t, ^{\circ}\text{C}$	+50	-40
$\mu$	$\geq 5$ (D = 1000)	$\leq 550$ (D = 100)

Разброс параметров (по данным паспортов 15 партий смазки) 6 ... 14 пз при  $+50^{\circ}\text{C}$  и 310 ... 440 пз при  $-40^{\circ}\text{C}$ ;

– кинематическая вязкость «масла»  $\gamma$  (сСт или  $\text{мм}^2/\text{с}$ ):

$t, ^{\circ}\text{C}$	+20	+40
$\gamma$	70 ... 85	50

– в связи с отсутствием в паспортах на смазку главного параметра ее стойкости к вакууму – давления насыщенных паров, он приводится по данным ВНИИ НП, предоставленным в свое время на наш запрос:

$t, ^{\circ}\text{C}$	+20	+50	+150
$P, \text{мм. рт. ст.}$	$1,05 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-3}$

Фирма-разработчик «масла» ХС-2-1ВВ представляла следующие данные:

$t, ^{\circ}\text{C}$	+20	+50	+80	+100
$P, \text{мм. рт. ст.}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$

– предпочтительное контактное напряжение в ШП:  $\leq 12\ 000 \text{ кг}/\text{см}^2$ ;

– гарантийный срок хранения в таре поставщика 3 года.

Для ориентировки разработчиков изделий, использующих смазку, приводятся данные по значениям вакуума в зависимости от высоты орбиты:

157 км – $3 \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст.	} КА Рейнджерс, США
170 км – $2,1 \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст.	
296 км – $4,7 \cdot 10^{-7}$ мм. рт. ст.	
500 км – $7,8 \cdot 10^{-9}$ мм. рт. ст.	
850 км – $1 \cdot 10^{-10}$ мм. рт. ст.	} Япония

По данным отечественных фирм, потребителей изделий ВНИИЭМ, со временем поступила следующая информация:

– при вакууме  $10^{-8}$  мм. рт. ст. на расстоянии 15 м от корпуса КА, вакуум на расстоянии 5 и 0,5 м составляет, соответственно,  $10^{-7}$  и  $10^{-6}$  мм. рт. ст.;

– при вакууме  $5 \cdot 10^{-7}$  мм. рт. ст. на орбите 300 ... 350 км, вакуум на расстоянии 0 ... 5 м составляет  $10^{-2} - 10^{-3}$  мм. рт. ст.;

Столь значительная разница позволяет предположить, что рассматриваются весьма значительные объекты типа «Мир», со значительными объемами гажения материалов.

За время натурной эксплуатации изделий, разработанных ВНИИЭМ, на КА с орбитой 800 км получены следующие результаты (без отказов):

– ЭД типа ДВ (рад. упорные ШП с  $d_0 = 55$  мм, осевой преднатяг  $A_0 = 6 \dots 7$  кг, скорость вращения  $n = 1200$  1/мин) при непрерывной эксплуатации отработал:

12 лет – 4 шт.;

10 лет – 1 шт.;

8 лет – 4 шт.;

3 ... 5 лет – 10 шт.;

(отказов ДВ на многочисленных КА не было);

– электродвигатель-маховик (ЭДМ) типа ДМ 20-250/Т (рад. упорные ШП с  $d_0 = 25$  мм, осевой преднатяг  $A_0 = 8$  кг, скорость вращения  $n = 300 \dots 400$  1/мин) при непрерывной эксплуатации отработал:

10 лет – 3 шт. (эксплуатируются);

5 лет – 3 шт. (эксплуатируются).

При наземных испытаниях, в камере с  $P = 1 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст. ЭДМ ДМ 20-250/Т, ДМ 5-50 и ДМ 1-20 наработали 25, 54 и 38 тыс. ч соответственно; испытания продолжаются.

Приведенный объем положительных результатов испытаний изделий со смазкой ВНИИ НП-274Н подтверждает ее работоспособность в условиях открытого космоса с требуемой долговечностью 10 ... 12 лет.

Электродвигатели БК-2 – модификация серии БК, в отличие от ЭД БК-1, работающих в газовой среде, предназначены для работы в электронасосных агрегатах (ЭНА) [8]. Наличие в них тонко-

стенной герметичной гильзы, разделяющей полости статора и ротора, позволяет стыковать ЭД непосредственно с насосом, без применения уплотнений или разделительной магнитной муфты, при эксплуатации ротора с ШП в рабочей жидкости насоса, со скоростью вращения 4000 1/мин.

В качестве рабочих жидкостей разработчики соответствующих систем КА используют теплоносители с минимально возможной вязкостью, что позволяет снижать трение в трубопроводах систем и, как следствие, уменьшать их диаметр и вес. Однако, на ШП ЭД это снижение вязкости влияет отрицательно.

Приведенные ниже вязкости наиболее употребительных теплоносителей в десятки раз меньше, чем у приборных масел или «масел», являющихся основой рассмотренных смазок ВНИИ НП-271 и ВНИИ НП-274Н. В результате, теплоноситель, являющийся смазкой для ШП, не «держит» нагрузку, приходящуюся на него, т. е. ШП работает в условиях «масляного голодания», что приводит к исчезновению разделительного слоя смазки между телами качения и кольцами ШП, и, соответственно, к износам деталей ШП.

Результаты испытаний и натурных наработок у ЭД, работавших с антифризами (ЛЗТК-5; ТЕМП):  $\leq 20$  тыс. ч, несмотря на то, что их вязкости несколько больше, чем у других теплоносителей, но смазывающие свойства антифриза (30 – 40 % водного раствора этиленгликоля) явно ниже. Полиметилсилоксановая жидкость ПМС-1,5р и изоктан (ЛЗТК-2) обеспечивали ресурсы 30 ... 40 тыс. ч, что объясняется их большей «маслянистостью» (по терминологии ВНИИ НП), т. е. лучшими смазывающими свойствами. Наилучшие ресурсы (без отказа) достигнуты ЭНА фирмы «Прогресс» с ЭД БК-2424 на теплоносителе ЛЗТК-2:

83 000 ч – 7 изделий;

62 000 ч – 5 изделий.

Таблица 7

Кинематическая вязкость теплоносителей и некоторых приборных масел  $\gamma$  (сСт или  $\text{мм}^2/\text{с}$ )

Теплоноситель \ $t, ^\circ\text{C}$	-50	-30	-20	-10	0	20	40	50
ЛЗТК-5	–	–	14,5	8,5	4,7	2,4	1,4	–
ТЕМП	–	–	26,0	17,0	11,0	4,4	2,3	–
ПМС-1,5р	6,0	3,0	–	–	1,7	1,56	–	1,1
ЛЗТК-2	3,5	1,9	1,6	–	1,0	0,8	–	0,4
Аммиак (жидкий)	0,45	0,36	0,32	0,3	0,23	0,24	0,26	0,2
Масло МП-601	3000	–	–	–	–	40	–	15
Масло МП-605	800	–	–	–	–	70	–	35
Авиационное масло М-20	–	–	–	–	–	20	–	–
Масло ВНИИ НП6	–	1200	–	–	–	–	–	8,7

Вода:  $\gamma = 1,0$  сСт при  $t = +20^\circ\text{C}$ .



К концу 1980-х годов ЭНА другой фирмы, на том же теплоносителе, с ЭД ДБ-9 Воронежской фирмы достигли устойчивых наработок 100 тыс. ч. Это обеспечивалось, при прочих равных условиях, достижением посадочного зазора ШП в «гнезда» гильзы (2 ... 4 мкм), за счет применения организационно-технологических мер экстраординарного характера. С исчезновением в 1990-х годах такой возможности выпуск этого ЭД прекратился. Этот пример только подтверждает, что для долговременной работы ШП в условиях «масляного голодания», прочие условия его работы должны быть максимально комфортными. Это и указанный малый посадочный зазор ШП, и устранение или снижение собственных вибраций ЭД (чему способствует повышение полюсности ЭД, и связанное с этим снижение влияния магнитных захватов), максимально возможное снижение магнитных и механических дебалансов и, наконец, анализ насосов, с точки зрения типа их рабочего колеса, и возникающих в насосе осевых и радиальных сил. Причем, как показывает опыт, в интересах разработчика ЭД не полагаться только на мнение разработчика насоса.

В целом, рассматривая ситуацию с долговечностью таких ЭД, необходимость в которых будет постоянна, а значимость при развитии космических программ даже возрастет, необходимо признать, что перспектив устойчивого повышения их долговечности нет. Альтернативой им являются ЭД на гидростатических опорах [9], которые разрабатываются ВНИИЭМ, и образцы которых ныне установлены на МКС.

Возвращаясь к пластичным смазкам, полезно еще раз вернуться к мнению фирм FAG и SKF, которые (в своих каталогах) при оценке долговечности ШП и смазки настоятельно советуют как можно

больше опираться на имеющийся опыт, на результаты испытаний аналогов, и не полагаться только на расчетные данные.

### Литература

1. Консистентные смазки / Д. С. Великовский, В. Н. Поддубный, В. В. Вайнштока, Б. Д. Готовкин ; под ред. В. В. Вайнштока. – Москва : Химия, 1966. – 256 с.
2. Сеницын В. В. Пластичные смазки в СССР : справочник / В. В. Сеницын. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Химия, 1984. – 192 с.
3. Серия бесконтактных двигателей постоянного тока малой мощности / И. А. Вевюрко, И. И. Горжевский, В. Н. Кузьмин, Е. М. Михайлов, С. А. Стома // Труды ВНИИЭМ. Электрические машины автоматических устройств. – М. : ВНИИЭМ, 1976. – Т. 44. – С. 5 – 13.
4. Некоторые особенности проектирования подшипниковых узлов с приборными ШП / Е. М. Михайлов // Электромеханические устройства космических аппаратов. Труды ВНИИЭМ. – 1997. – Т. 97. – С. 47 – 61.
5. Опыт проектирования и эксплуатации опор качения электродвигателей научной и служебной аппаратуры в космических аппаратах / Е. М. Михайлов // Геоостационарный метеорологический космический аппарат «Электро». Труды ВНИИЭМ. – 1998. – Т. 98. – С. 141 – 149.
6. Влияние температуры на работоспособность малонагруженных шарикоподшипников / В. З. Ружальский // Труды ВНИИЭМ. – 1987. – № 3.
7. Момент трения в шарикоподшипниках изделий для космических аппаратов / Е. М. Михайлов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – Т. 140. – № 3. – С. 3 – 6.
8. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока в электронасосных агрегатах космических аппаратов / С. А. Стома, В. В. Кудрявцев, В. Н. Кузьмин, Е. М. Михайлов // Электротехника. – 1999. – № 6. – С. 11 – 14.
9. Электронасосные агрегаты космических аппаратов с гидроопорами ротора / В. Н. Кузьмин, Е. М. Михайлов, С. А. Стома // Электротехника. – 1996. – № 5.

Поступила в редакцию 21.05.2019

*Евгений Михайлович Михайлов, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор, т. (495) 365-30-41, 8 (903) 226-34-89. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## LUBRICATION FOR BALL-BEARINGS OF MICROELECTROMOTORS FOR SPACECRAFT

**E. M. Mikhailov**

*The article deals with the problems related to the influence of ball-bearing lubrication on lifetime of contactless DC microelectromotors used in spacecraft. The justification of choice of the type and specific brands of lubrication for ball-bearings of a contactless DC electromotor of BK series is presented. The method of calculation of an actual lifetime of lubrication and ball-bearings with consideration of thermal state of lubrication has been proven based on the electromotor test results. The level of correlation of the actual test results with the calculated*

*lifetime with the use of temperature coefficients has been analyzed. The results of tests of electromotors with the ball-bearings operating in oil starvation conditions have been evaluated.*

**Key words:** *grease lubricant, viscosity, moment of friction, temperature, ball-bearings.*

### References

1. Consistent lubricants / D. S. Velikovskii, V. N. Poddubnyi, V. V. Vainshtok, B. D. Gotovkin; edited by V. V. Vainshtok. – Moscow : Chemistry, 1966. – 256 p.
2. Sinitsyn V. V. Grease lubricants in the USSR : handbook / V. V. Sinitsyn. – 2<sup>nd</sup> edition, revised and enlarged. – Moscow : Chemistry, 1984. – 192 p.
3. A series of contactless low-power DC motors / I. A. Vevirko, I. I. Gorzhevskii, V. N. Kuzmin, E. M. Mikhailov, S. A. Stoma // VNIEM Proceedings. Electrical machines of automated devices. – M. : VNIEM, 1976. – Vol. 44. – P. 5 – 13.
4. Some features of design of bearing units with instrumental ball-bearings / E. M. Mikhailov // Electromechanical devices of spacecraft. VNIEM Proceedings. – 1997. – Vol. 97. – P. 47 – 61.
5. Experience in design and operation of rolling-contact bearings of electric motors for scientific and service equipment of spacecraft / E. M. Mikhailov // Geostationary meteorological satellite Electro. VNIEM Proceedings. – 1998. – Vol. 98. – P. 141 – 149.
6. Temperature effect on operability of low-loaded ball-bearings / V. Z. Ruzhalskii // VNIPP Proceedings. – 1987. – №. 3.
7. Moment of friction in ball-bearings of products for spacecraft / E. M. Mikhailov // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – 2014. – Vol. 140. – №. 3. – P. 3 – 6.
8. Contactless DC electromotors in electric driven pumps of spacecraft / S. A. Stoma, V. V. Kudriavtsev, V. N. Kuzmin, E. M. Mikhailov // Electrical engineering. – 1999. – №. 6. – P. 11 – 14.
9. Electric driven pumps of spacecraft with rotor hydromounts / V. N. Kuzmin, E. M. Mikhailov, S. A. Stoma // Electrical engineering. – 1996. – №. 5.

*Evgenii Mikhailovich Mikhailov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Leading Design Engineer,  
tel.: +7 (495) 365-30-41, +7 (903) 226-34-89.  
(JC «VNIEM Corporation»).*