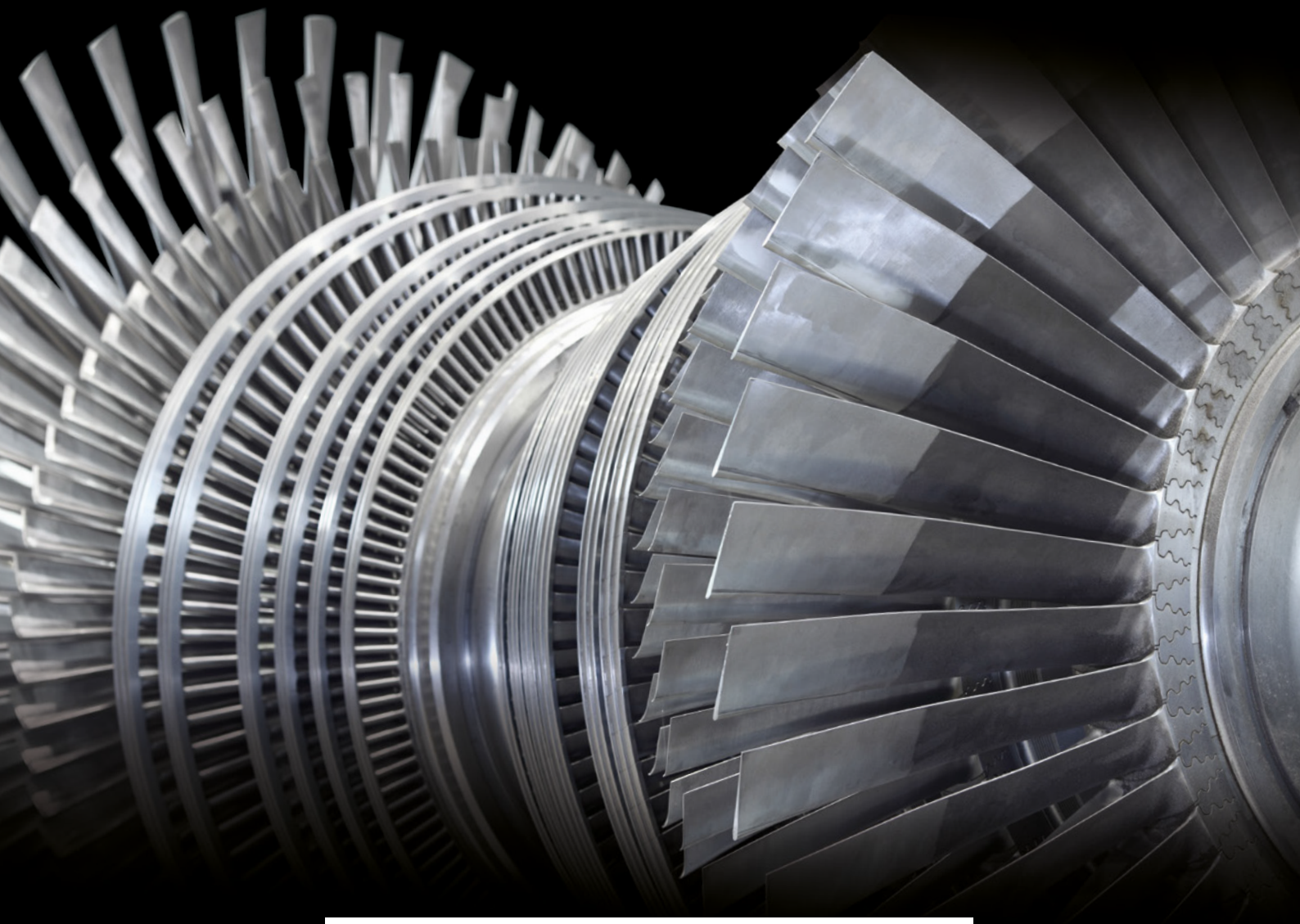
QUALITY PERFORMS.



Reolube® Turbofluids

Свойства гидравлических жидкостей

Технические и расчетные данные

Reolube®

QUALITY WORKS.

LANXESS
Energizing Chemistry

ВВЕДЕНИЕ

Reolube®

Минеральные масла традиционно применяются в качестве гидравлических жидкостей и смазки в паровых и газовых турбинах. Однако, увеличение рабочей температуры и давления гидравлического масла в стремлении повысить к.п.д. турбин, привело также и к росту риска возгорания, который связан с применением минеральных масел. Кроме того, поскольку при эксплуатации турбин большой мощности требуется больше смазки, а уровень безопасности на атомных электростанциях должен быть очень высок, мерам предупреждения и контролю возгораний на электростанциях стали уделять самое пристальное внимание.

Ассортимент продукции Reolube® Turbofluid

Жидкости на основе эфиров фосфорной кислоты, применяющиеся в настоящее время в турбинах, перечислены в Таблице 1. К ним относятся пропиловая (Reolube® Turbofluid 46), бутилированная (Reolube® Turbofluid 32B GT и Reolube® Turbofluid 46B), а также ксиленольная (Reolube® Turbofluid 46XC и Reolube® 46RS). По возможности в настоящей брошюре приведены данные по конкретной жидкости. Однако, в некоторых случаях данные по конкретной продукции либо отсутствуют, либо считаются с учетом погрешности эксперимента аналогичными данным по другому продукту. Например, у жидкостей Reolube® Turbofluid 46XC и Reolube® 46RS на основе ксиленола характеристики во многом схожи. При отсутствии данных по Reolube® Turbofluid 46 или Reolube® Turbofluid 46B следует пользоваться значениями параметров других (пропиловых или бутилированных) жидкостей, а не данными по продуктам на основе ксиленола.

Примечание: Продукт Reolube® Turbofluid 46 больше не продается, однако его данные включены в настоящую брошюру, так как эта жидкость все еще применяется в системах электрогидравлического управления на старых электростанциях.

Таблица 1. Ассортимент продукции Reolube® Turbofluid

Жидкость	Тип	Класс вязкости (ISO 3448)
Turbofluid 32B GT	т-бутилфенилфосфат	32
Turbofluid 46	изопропилфенилфосфат	46
Turbofluid 46B	т-бутилфенилфосфат	46
Turbofluid 46 XC	ксилилфосфат	46
46RS	ксилилфосфат	46

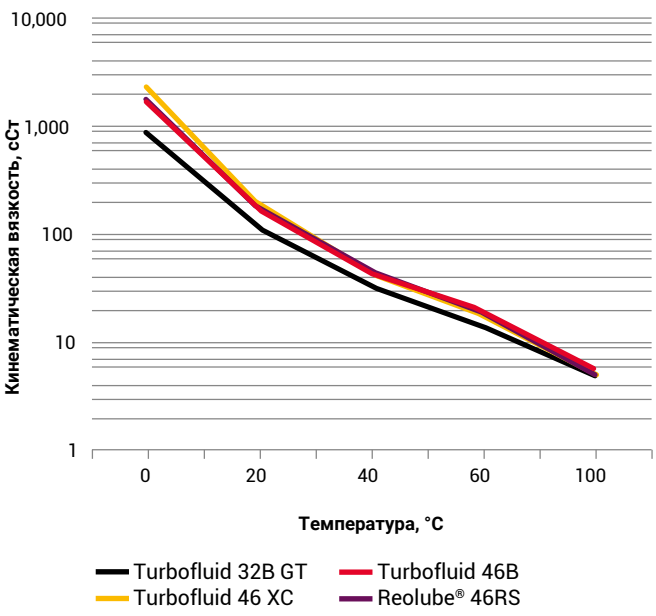
Жидкости Reolube® предлагаются в двух классах вязкости, ISO VG 32, например Reolube® Turbofluid 32B GT, или ISO VG 46, например, Reolube® Turbofluids 46 и 46 XC. Типовые данные по вязкости/температуре приводятся в Таблице 2 и представлены в виде графика для выбранных жидкостей на Рисунке 1.

Вязкость/температура

Таблица 2. Свойства вязкость/температура Reolube® Turbofluid

Температура, (°C)	Вязкость жидкости (ISO 3104), сСт			
	Turbofluid 32B GT	Turbofluid 46B	Turbofluid 46 XC	Reolube® 46RS
0	845	1676	2136	2287
20	112	173	183	156
40	33	44,5	45,2	48,4
60	14	18	17	20
100	4.8	5,4	5,2	5,5

Рисунок 1. Свойства вязкость/температура серии Reolube® Turbofluid



Жидкость Reolube® Turbofluid 46 больше не продается, однако она все еще применяется в системах электрогидравлического регулирования на старых электростанциях.

Имеет место некоторый разброс (<+10%) по этим значениям, так как пределы класса вязкости по ISO составляют +10% от средних значений диапазона, т. е. 28,8-35,2 сСт при 40°C для жидкостей ISO VG 32 и 41,4-50,6 сСт при 40°C для ISO VG 46.

Влияние температуры на вязкость можно рассчитать по следующей формуле

log log (v + 0,7) = 11,2164 - 4,4055 logT
где v = кинематическая вязкость в сантистоксах.
T = абсолютная температура в °K

Поскольку при низкой температуре эфиры триарилфосфата не являются ньютоновскими жидкостями, значения, рассчитанные при <10°, скорее всего, будут существенно отличаться от измеренных значений.

Другие данные по вязкости/температуре, которые могли бы представлять интерес для конструктора, это так называемые «критические температуры перекачки». Это температура, при которой вязкость достигает 850 сСт. Эти значения, вместе с температурой застывания жидкости, приведены в Таблице 3.

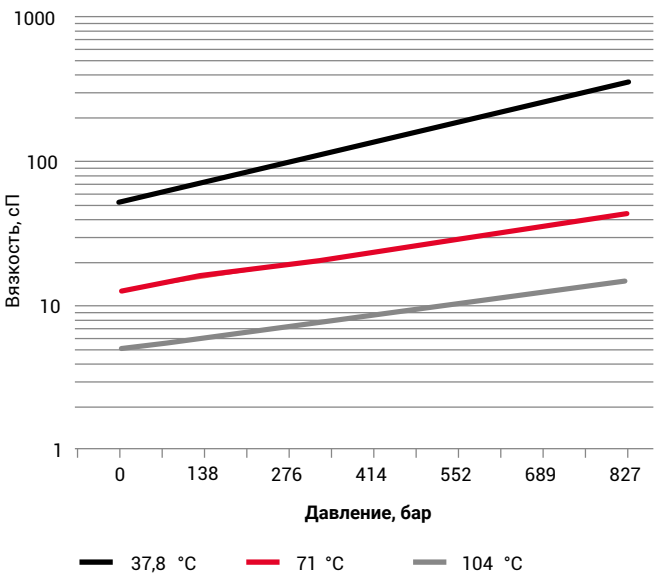
Таблица 3. Низкотемпературные свойства

Жидкость	Критическая температура перекачки (°C)	Температура застывания (ISO 3016), (°C)
Turbofluid 32B GT	+1	-23
Turbofluid 46/46B	+6	-18
Turbofluid 46 XC	+5	-21
46RS	+8	-23
Минеральное масло (ISO VG 46)	-5	-9

Данные по вязкости/температуре

Влияние давления на жидкость выражается в увеличении ее вязкости. Это может иметь положительный эффект в виде повышенной несущей способности, но может иметь и отрицательные последствия - потери мощности и т. п. На Рисунке 2 представлена зависимость вязкости от давления для жидкости Reolube® Turbofluid 46 и ее изменение с изменением температуры. Поскольку этот параметр зависит в основном от формы и размера молекул, можно предположить, что и для других турбинных жидкостей значения будут сходными. Эти данные позволяют предположить, что в этом отношении фосфаты сходны с минеральным маслом.

Рисунок 2. Зависимость вязкости от давления для Reolube® Turbofluid 46



Характеристики плотность/ температура

В Таблице 4 и на Рисунке 3 представлено типичное изменение плотности в зависимости от температуры при давлении окружающей среды для жидкости Reolube® Turbofluids. Эти данные были получены для диапазона температур 10...50°C, но можно допустить линейную зависимость для диапазона от 0°C до 100°C.

Как вариант, значения можно рассчитать по формуле

где D_{10} _D_T(1 + a T)
D_{10} = плотность при 10°C
(или наименьшая из двух выбранных температур)
D_T = наибольшая температура
a = 0,00072
T = разность температур в °C

Это свойство важно при подборе насосов и расчете, например, теплообменных свойств жидкости и т. п.

Рисунок 3. Изменение плотности в зависимости от температуры для продукции серии Reolube® Turbofluid

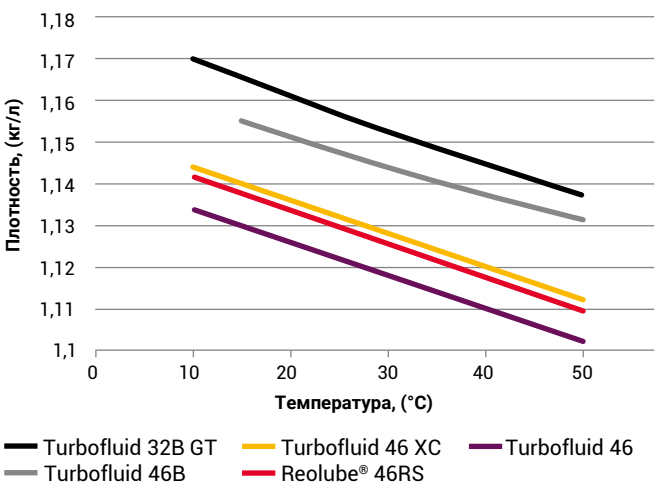


Таблица 4. Изменение плотности (кг/л) в зависимости от температуры для продукции серии Reolube® Turbofluid

Температура, °C	Turbofluid 32B GT	Turbofluid 46	Turbofluid 46 XC	46RS	Минеральное масло (ISO VG 46)
10	1,170	1,134	1,14	1,142	–
20	1,161	1,125	1,136	1,133	0,870
30	1,152	1,118	1,128	1,125	–
40	1,145	1,110	1,120	1,118	–
50	1,137	1,102	1,112	1,109	

Сжимаемость и модуль объёмной упругости

Модуль объёмной упругости – это отношение давления на масло к результирующему уменьшению объема и является величиной, обратной сжимаемости. Поэтому гидравлическая жидкость должна иметь высокий модуль объемной упругости. Изотермический секанс-модуль объемной упругости Reolube® Turbofluid 46 измерялся при температуре 37,8°C и при различных значениях давления при помощи измерителя модуля объемной упругости Национальной инженерно-технической лаборатории, а сжимаемость рассчитывается на основании этих результатов (Таблица 5).

Таблица 5. Модуль объёмной упругости и сжимаемость Reolube® Turbofluid 46 при 37,8°C

Давление, бар	Модуль объёмной упругости при 37,8°C, бар x 104	Сжимаемость при 37,8°C, бар-1 x 10-5
1034	2,53	3,95
689	2,34	4,27
344	2,12	4,71
138	1,99	5,02

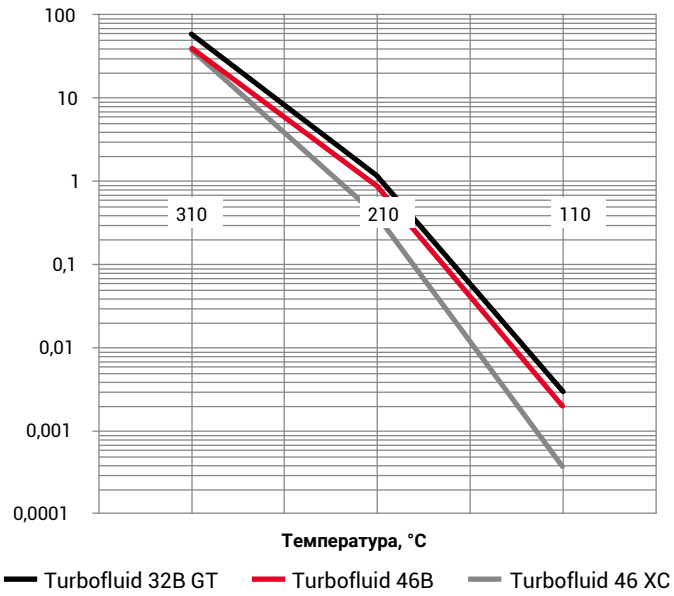
Давление паров/летучесть

Результаты измерения давления паров показывают, что летучесть эфиров триарилфосфата очень низкая и значительно ниже при рабочих температурах, чем у минерального масла аналогичной вязкости. Имеющиеся данные приведены в Таблице 6 и показаны на Рисунке 4.

Таблица 6. Давление паров Reolube® Turbofluids

Температура °C	Давление паров, мм рт. ст.				
	Turbofluid 32B GT	Turbofluid 46	Turbofluid 46B	Turbofluid 46XC	Минеральное масло (ISO VG 46)
10	$1{,}1 \times 10^{-7}$	$2{,}6 \times 10^{-9}$	$8{,}6 \times 10^{-8}$	$2{,}4 \times 10^{-9}$	
25					3×10^{-6}
50					6×10^{-5}
70	$1{,}0 \times 10^{-4}$	$7{,}77 \times 10^{-6}$	$7{,}69 \times 10^{-5}$	$7{,}05 \times 10^{-6}$	
100					$5{,}7 \times 10^{-3}$
110	$3{,}0 \times 10^{-3}$	$4{,}0 \times 10^{-4}$	$2{,}0 \times 10^{-3}$	$3{,}6 \times 10^{-4}$	
210	1,12	0,44	0,83	0,38	
310	56,15	43,84	41,25	37,40	

Рисунок 4. Давление паров Reolube® Turbofluids



Данные по температуре кипения при нормальном и пониженном давлении согласно Таблице 7.

Таблица 7. Температура кипения Reolube® Turbofluids

Жидкость	Температура кипения, (°C), 13,3 мбар (10 мм рт. ст.)	1 бар (760 мм рт. ст.)
Turbofluid 32B GT	260	402
Turbofluid 46B	262	396
Turbofluid 46B	269	416
Turbofluid 46 XC	276	402

Термодинамические свойства

Для расчета таких характеристик жидкости, как теплообмен и т. п., необходимо знать определенные термодинамические свойства. Значения удельной теплоемкости, теплопроводности и коэффициентов термического расширения приводятся в Таблицах 8-10, соответственно.

Таблица 8. Значения удельной теплоёмкости (ASTM D 3947-80) продукции серии Reolube® Turbofluid

Жидкость	Удельная теплоемкость, Дж/г°С, при 25 °С	при 60 °С	при 150 °С
Turbofluid 32B GT	1,50	1,78	1,85
Turbofluid 46	1,60	1,70	1,97
Turbofluid 46B	1,60	1,87	2,11
Turbofluid 46 XC	1,50	1,66	1,88
46RS	1,70	1,76	–

Таблица 9. Показатели теплопроводности серии Reolube® Turbofluid

Жидкость	Теплопроводность, Вт/м•К		
	при 25°С	при 40°С	при 60°С
Turbofluid 32B GT	0,122	–	0,119
Turbofluid 46	0,1322	0,1338	0,1356
46RS	0,1340	0,132	0,131
Минеральное масло (ISO VG 46)	1,89	–	–

Таблица 10. Коэффициент термического расширения серии Reolube® Turbofluid

Жидкость	Коэффициент термического расширения (25 - 50°С) x 10-4/°С
Turbofluid 32B GT	7,0
Turbofluid 46/46B	7,0
Turbofluid 46 XC	6,3
Минеральное масло (ISO VG 32)	7,5

Растворимость газов в Turbofluids

Растворимость воздуха

Растворимость воздуха в жидкости выражается коэффициентом распределения Бунзена и означает объем воздуха, растворенного в стандартных условиях анализа (температура 0°С, давление 1 атмосфера). Растворимость воздуха – это единственный фактор, определяющий такие свойства, деаэрация, и, следовательно, влияющий на размеры и форму резервуара.

Таблица 11. Растворимость воздуха в Reolube® Turbofluids

Жидкость	Температура, (°С)	Коэффициент распределения Бунзена
Turbofluid 46	60	0,0197
	70	0,0244
	80	0,0282
Turbofluid 46 XC	40	0,0144
	60	0,0159
	70	0,0177
Минеральное масло (ISO VG 46)	40	0,085

Растворимость водорода

Низкая растворимость водорода в эфирах фосфорной кислоты (~20% растворимости минерального масла) – еще один фактор повышения безопасности; это также относится и к метану или природному газу. Как следствие, любое оборудование для дегазации будет иметь относительно простую конструкцию.

Таблица 12. Растворимость водорода в Reolube® 46RS[1]

Температура, °С	Растворимость, % об.
28	3,6
50	4,4
73	4,9
120	5,9

Растворимость масла и воды в Turbofluids и Turbofluids в воде и масле

Растворимость масла в фосфате сильно зависит от типа масла, например, является ли оно парафиновым (как турбинное масло), нафтеновым или даже ароматическим. Представляется, что увеличение совместимости сопряжено с повышением содержания в масле нафтеновых или ненасыщенных кольцевых структур. Приведенные в Таблице 13 данные относятся к турбинному минеральному маслу парафинового типа ISO VG 46.

Таблица 13. Данные о растворимости Reolube® Turbofluids

Эфир фосфорной кислоты	Растворимость			
	Фосфата в воде при 25°C, ppm	Фосфата в масле при 25°C (% вес/вес)	Воды в фосфате при 25°C (% вес/вес)	Масла в фосфате при 25°C (% вес/вес)
Turbofluid 46 XC	0,11	1-2	0,2-0,3	2-4
Turbofluid 46	0,70	1-2	0,2-0,3	2-4
Turbofluid 46B	2,10	1-2	0,2-0,3	2-4

Трение и смазочные свойства

Средний коэффициент трения для жидкостей Turbofluids в условиях пограничного смазывания поверхностей контакта «сталь-сталь» составляет ~0,05[2]. Поэтому потери мощности в зубчатых передачах и подшипниках при применении эфиров триарилфосфата несколько выше из-за свойств внутреннего трения и меньшей толщины смазывающей пленки. В зубчатых передачах потери в зацеплении, определяемые величиной нагрузки, приблизительно на 20% выше, чем для минерального масла аналогичной вязкости. Поскольку ~80 % потерь в зубчатых передачах с высоким передаточным отношением составляют потери на холостом ходу (потери на перемешивание), то на потери в зацеплении приходится лишь остаток. Поэтому предполагается, что общие потери в зубчатых передачах при применении эфира фосфорной кислоты приблизительно в 1,04 раза (или на 4%) больше потерь при применении минерального масла[3]. Типичные результаты противоизносных характеристик теста на четырехшариковой машине трения и результаты FZG теста приведены в Таблице 14. При определении несущей способности в Аахенском университете, Reolube® Turbofluid 46 XC продемонстрировал великолепные результаты на баббите (Tego V738) при температуре 110°C.

Reolube® Turbofluid 46 был также испытан компанией Renk AG с целью определения совместимости с баббитом типа Renktherm 89. После 2200 часов эксплуатации при разных скоростях вала и температурах подшипника до 100°C, подшипник находился в превосходном состоянии.

Reolube® Turbofluid 46B также показал превосходные результаты при испытаниях в аксиально-поршневых насосах EA4 VSO 250 HS30, EA4 VSO 250 DR30 и A10 VSO 71 DR производства Bröninghaus после 1050 часов работы под давлением до 350 бар.

Таблица 14. Противоизносные и противозадирные свойства серии Reolube® Turbofluid

Эфир фосфорной кислоты	FZG тест (DIN 51354) Разрушение на этапе нагрузки	4-х шариковый тест (ASTM D 4172) Диаметр пятна износа (мм)
Turbofluid 32B GT	7	0,60
Turbofluid 46	7	0,61
Turbofluid 46 XC	7	0,58
Reolube® 46RS	7	–

Подробные сведения об испытаниях подшипников и насосов предоставляются по требованию.

Ссылки

1. В.В. Лыско, Всероссийский теплотехнический институт, частная переписка
2. Michaelis, K., Reibungs-, Verschleiss und Fresshalten NatOrlicher Phosphatester in Zahnradgetrieben, Antriebstechnik 27, 8, стр. 43-46 (1988)
3. Михаэлис, К., Институт FZG, Технический университет, Мюнхен, частная переписка

Совместимость с конструкционными материалами

Эфиры фосфорной кислоты являются очень хорошими растворителями и поэтому требуют тщательного выбора с учетом их совместимости с красками, уплотнениями, прокладками и т. п. В Таблице 15 приведены различные классы материалов, с которыми может соприкасаться жидкость. Несмотря на наличие рекомендаций по определенным видам продукции, перечень не является исчерпывающим, и не включенную в него продукцию не следует обязательно считать непригодной. Среди материалов рекомендуемых классов имеется несколько предпочтительных типов. Например, в настоящее время существует несколько марок резины Viton* (фтороуглеродной), и совместимость с эфиром фосфорной кислоты повышается при переходе от Viton* A к Viton B к Viton* GF. Похожая ситуация существует и с эпоксидными смолами, в этом случае совместимость зависит от отвердителя и условий, при которых сшивается полимер. В любом случае, где возникают сомнения относительно совместимости, следует проконсультироваться с производителем материалов.

*Торговая марка DuPont

Таблица 15. Совместимость эфиров фосфорной кислоты со стандартными конструкционными материалами

Материал	Триарил фосфат
Эластомер	
Сополимер бутадиена и акрилонитрила (Buna N или нитрил)	Неудовлетворительно[1]
Сульфохлорированный полиэтилен	Неудовлетворительно
Сополимер этилена и пропилена (этиленпропиленовый каучук, каучук на основе сополимера этилена, пропилена и диенового мономера)	Рекомендуется
Эпихлоридин	Неудовлетворительно
Фторированный углеводород	Рекомендуется
Сополимер изобутилена и изопрена (бутиловый каучук)	Рекомендуется
Изопрен	Неудовлетворительно
Натуральный каучук	Неудовлетворительно
Перфторуглерод	Рекомендуется
Полиакрилат	Неудовлетворительно
Полиамид (нейлон)	Рекомендуется
Полиуретан	Неудовлетворительно
Силиконовый каучук	Приемлемо[2]
Сополимер бутадиена и стирола (Buna S)	Неудовлетворительно
Пластики	
ABS	Неудовлетворительно
Акрил	Неудовлетворительно
Полиацетали	Приемлемо
Полиамид	Рекомендуется
Поликарбонат	Приемлемо[3]
Полиэфир	Приемлемо[3]
Полиэтилен	Приемлемо[3]
Полипропилен	Приемлемо[3]
Полистирол	Неудовлетворительно
Полисульфон	Неудовлетворительно
Поливинилхлорид (PVC)	Неудовлетворительно
Политетрафторэтилен (PTFE)	Рекомендуется

Совместимость с конструкционными материалами

Материал	Триарил фосфат
Лакокрасочные материалы	
Акрил	Неудовлетворительно
Алкидная смола (обработанная в печи)	Приемлемо
Эпоксидная смола	Приемлемо
Латекс	Неудовлетворительно
Фенольные смолы	Неудовлетворительно
Полиуретановая краска	Приемлемо
Виниловый эфир	Приемлемо
Металлы	
Алюминий	Приемлемо[4]
Латунь	Приемлемо
Бронза	Приемлемо
Кадмий	Приемлемо
Чугун	Рекомендуется
Медь	Приемлемо
Магний	Приемлемо
Никель	Рекомендуется
Сталь (все марки)	Рекомендуется
Серебро	Рекомендуется
Титан	Рекомендуется
Цинк	Приемлемо
Вкладыши подшипников	
Баббит	Рекомендуется
Медь/свинец	Приемлемо
Алюминиевые сплавы	Неудовлетворительно
Герметик для резьбовых соединений	
Герметик для гидравлических соединений Loctite[5]	Рекомендуется
Прокладочные материалы – жесткие	
Графитовые ламинаты марки Klinger[6]	Рекомендуется

Материал	Триарил фосфат
Прокладочные материалы – эластичные	
Curil T [6]	Рекомендуется
Продукт Loctite 5735	Приемлемо
Графитовая фольга Sigraflex[7]	Рекомендуется
Продукт Loctite 5745	Рекомендуется
Novapress [8] 300	Рекомендуется
Фильтрующие среды	
Активные глины, например, фуллерова земля	Приемлемо
Активный глинозем	Приемлемо
Активированный уголь	Приемлемо
Целлюлоза	Приемлемо
Ионообменные смолы	Рекомендуется

Совместимость с растворителями для очистки / средства защиты поверхности

Ниже приведена совместимость Reolube® Turbofluids с различными растворителями и средствами защиты поверхности.

Материал	Триарил фосфат
Хлорсодержащие растворители	**Не следует использовать**
например, перхлорэтилен, трихлорэтан.	
Углеводородные растворители	
например, уайт-спирит или нефтяной эфир, ксилол	Приемлемо
Lotoxane [9]	Приемлемо
Растворители на водной основе	Неудовлетворительно
Средства защиты поверхности	
Антикоррозийные средства на масляной основе	Приемлемо
Ингибированные эфиры фосфорной кислоты	Рекомендуется