

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭФИРНОГО МАСЛА ВНИИ НП 50-1-4У ТУРБО СХТ-32 В МАСЛОСИСТЕМАХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ПАО «ГАЗПРОМ»

УДК 621.89:621.51

А.А. Мухин, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва, РФ), a_mukhin@vniigaz.gazprom.ru

С.Ю. Поляков, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», s_polyakov@vniigaz.gazprom.ru

А.Е. Скрыбина, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

В.К. Фадеев, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

В статье рассмотрены особенности эксплуатации масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 на основе термостабильного диоктилового эфира себаценовой кислоты в маслосистемах газоперекачивающих агрегатов в сравнении с традиционно применяемыми углеводородными маслами. В ходе эксплуатации технологического оборудования на компрессорных станциях работа газоперекачивающих агрегатов чередуется с нахождением их в резерве. В это время находящееся в негерметичном маслобаке масло контактирует с внешней средой, подвергаясь негативному воздействию внешних факторов.

Необходимость данных исследований связана с поступлением жалоб от эксплуатантов газоперекачивающего оборудования на резкий рост кислотного числа эфирного масла при нахождении газоперекачивающего агрегата в резерве. В лабораторных условиях смоделированы процессы, возникающие при эксплуатации газоперекачивающего агрегата в реальных условиях компрессорной станции. Приведены результаты лабораторного эксперимента по моделированию воздействия воды в виде жидкой фазы при повышенной температуре в течение различных промежутков времени на эфирное масло. Представлены результаты, полученные в ходе лабораторного моделирования эксплуатации масел (эфирного и углеводородного) с учетом нахождения оборудования в резерве. Полученные в лабораторных условиях экспериментальные данные качественно совпадают с результатами эксплуатации, которые наблюдались в условиях компрессорных станций. Установлено, что частично окисленное масло подвергалось ускоренному гидролизу, чем объясняется рост кислотного числа масла при нахождении агрегата в резерве. Рассмотрены токсикологические аспекты применения масел на эфирной и углеводородной основах. Сделаны выводы о нецелесообразности использования масел на эфирной основе для эксплуатации технологического оборудования ПАО «Газпром».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЭФИРНОЕ МАСЛО, ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫЙ ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИЙ АГРЕГАТ, ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

В системах смазки газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с повышенным уровнем теплонапряженности, к которым относятся в первую очередь конвертированные авиационные двигатели четвертого поколения, применяют масло «Петрим» по ТУ 38.401-58-245-99 [1].

Первоначально для данного типа ГПА предусматривалось применение авиационного масла ИПМ-10 по ТУ 38.1011299-2006 [2], но в период с 1993 по 1998 г. в России производство авиационного

масла ИПМ-10 было прекращено по ряду технических и экономических причин. Именно тогда проводились работы по разработке масла «Петрим» с целью замены дорогого и дефицитного масла ИПМ-10 в приводах авиационного типа, используемых в ГПА.

В требованиях по разработке масла «Петрим» были заложены следующие положения:

- масло должно превосходить по уровню термоокислительной стабильности (ТОС) минеральное авиационное масло МС-8П (максимальная рабочая температура до 150 °С), но может уступать авиационному маслу ИПМ-10 (максимальная рабочая температура до 200 °С);

симальная рабочая температура до 150 °С), но может уступать авиационному маслу ИПМ-10 (максимальная рабочая температура до 200 °С);

- низкотемпературные реологические свойства нового масла могут уступать данным свойствам авиационного масла ИПМ-10;
- достигнутый компромисс по предыдущим пунктам должен обеспечить снижение себестоимости масла.

Опыт эксплуатации выявил недостатки данного масла. Уста-

Mukhin A.A., Gazprom VNIIGAZ LLC (Moscow, Russian Federation), a_mukhin@vniigaz.gazprom.ru

Polyakov S.Yu., Gazprom VNIIGAZ LLC, s_polyakov@vniigaz.gazprom.ru

Scryabina A.E., Gazprom VNIIGAZ LLC

Fadeev V.K., Gazprom VNIIGAZ LLC

Special aspects of use of the VNII NP 50-1-4U TURBO SHT-32 essential oil in the oil systems of gas compressor units of Gazprom PJSC

The special aspects of use of the VNII NP 50-1-4U TURBO SHT-32 essential oil based on the thermally stable dioctyl sebacate in the oil systems of gas compressor units are considered in comparison with traditionally used hydrocarbon oils. During operation of processing equipment at compressor stations, the operation of gas compressor units alternates with their inactivity. At this time, the oil in the untight oil tank is in contact with the external environment, it is exposed to the negative effects of external factors.

This research was conducted due to the complaints from operators of gas compressor equipment for the sharp increase in the acid number of essential oil when gas compressor unit is inactive. The processes arising during the gas compressor unit operation under real conditions of the compressor station are modeled in the laboratory conditions. The results of a laboratory experiment of the modeling of the water exposure (in the form of a liquid phase) on essential oil at high temperature are presented for various time periods. The results obtained during laboratory modeling of use of essential and hydrocarbon oils, taking into account the inactivity of equipment, are presented. The experimental data obtained in the laboratory conditions qualitatively coincide with the results of use, which were observed in the conditions of compressor stations. It is determined, that the increase in acid number of the oil, when the unit is inactive, is explained by the fact that partially oxidized oil underwent accelerated hydrolysis. The toxicological aspects of the use of essential and hydrocarbon oils are considered. The conclusion about the inexpediency of the essential oils using for operation of the technological equipment of Gazprom PJSC is made.

KEYWORDS: ESSENTIAL OIL, HEAT-STRESSED GAS TURBINE ENGINE, GAS COMPRESSOR UNIT, OPERATING FEATURES.

новлено, что уровень ТОС масла «Петрим», обеспечивающий эксплуатацию при 175 °С, находится на пределе возможностей. Отмечены случаи увеличенного нагарообразования на горячих деталях маслосистемы [3, 4].

В качестве выхода было предложено использовать синтетическое масло на основе сложных эфиров ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32, выпускаемое по ТУ 38.401-58-12-91 [5], которое является улучшенной маркой масла ВНИИ НП 50-1-4у. Основные физико-химические и эксплуатационные показатели этого масла приведены в табл. 1 в сравнении с маслами ИПМ-10 и «Петрим».

Масло «Петрим» значительно уступает маслу ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 и маслу ИПМ-10 по уровню ТОС, что проявляется в интенсивном образовании осадка после окисления при температуре 200 °С. Это закономерно, так как рабочая температура масла «Петрим» составляет 175 °С.

По многим физико-химическим показателям масло ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 существенно



превосходит масло ИПМ-10. Тем не менее на авиационной технике масло ИПМ-10 используется как основная марка, а масло ВНИИ НП 50-1-4ф (у) – как дублирующая, что объясняется определенными недостатками масел на основе сложных эфиров карбоновых кислот, связанными с их химическим строением.

Основой масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 является ди-2-этилгексилловый эфир себаценовой кислоты – диоктилсебацат термостабильный (ДОСт), имеющий повышенную гигроскопичность (способность увлажняться при контакте с атмосферой). Срав-

нительные данные по оценке гигроскопичности масел (по алгебраической сумме изменения массы насыщенного и осушенного образца масла) в соответствии с квалификационным методом следующие:

- масло «Петрим» – 0,0077 %;
- масло ИПМ-10 – 0,0297 %;
- масло ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 – 0,1704 %.

Гигроскопичность масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 больше, чем у других масел, на 1-2 порядка.

Другим существенным недостатком масел на основе ДОСт является склонность к гидроли-

Таблица 1. Физико-химические и эксплуатационные показатели эфирного масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 в сравнении с маслами ИПМ-10 и «Петрим»

Table 1. Physicochemical and operational parameters of essential oil VNII NP 50-1-4U TURBO SHT-32 in comparison with the IPM-10 and Petrim oils

Показатель Parameter	Наименование масла Oil brand		
	ИПМ-10 по [2] IPM-10 by [2]	«Петрим» по [1] Petrim by [1]	ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 по [5] VNII NP 50-1-4U TURBO SHT-32 by [5]
Вязкость кинематическая, мм ² /с Kinematic viscosity, mm ² /s • при 100 °С (at 100 °С) • при -40 °С (at -40 °С)	3,50 2441	3,65 3203	3,27 1813
Температура застывания, °С Chilling temperature, °С	-60	-64	-60
Температура вспышки в открытом тигле, °С Open flash-point, °С	208	198	235
Кислотное число, мг КОН/г Acid number, mgKOH/g	0,07	0,02	0,05
Плотность при 20 °С, кг/м ³ Density at 20 °С, kg/m ³	829	830	924
Трибологические характеристики на четырехшариковой машине трения при температуре окружающей среды: Tribological characteristics on a four-ball friction machine at environmental temperature: • критическая нагрузка, P _к , Н (failure load, P _к , N) • диаметр пятна износа при осевой нагрузке 196 Н, D _и , мм (wear scar diameter at axial load 196 N, D _и , mm)	696 0,35	617 0,30	735 0,30
Испаряемость в чашечках при 175 °С в течение 3 ч: Evaporation in bowls at 175 °С during 3 h: • потери от испарения, % (evaporation losses, %)	1,4	3,71	0,55
Показатели ТОС при 200 °С в течение 50 ч (расход воздуха 10 л/ч): Indicators of thermal oxidation stability at 200 °С during 50 h (airflow 10 l/h): • вязкость кинематическая при 100 °С, мм ² /с (kinematic viscosity at 100 °С, mm ² /s) • прирост кинематической вязкости после окисления, % (growth of kinematic viscosity after oxidation, %) • кислотное число, мг КОН/г (acid number, mgKOH/g) • массовая доля осадка, % (mass fraction of sediments, %)	5,781 65,18 5,56 0,017	4,56 18,00 2,91 1,12	3,38 3,10 1,72 0,012
Склонность масел к образованию высокотемпературных отложений на установке «наклонная плита», мг Propensity of oils to formation of high-temperature sediments on the sloping plate stand, mg	48,8	75,6	12,9

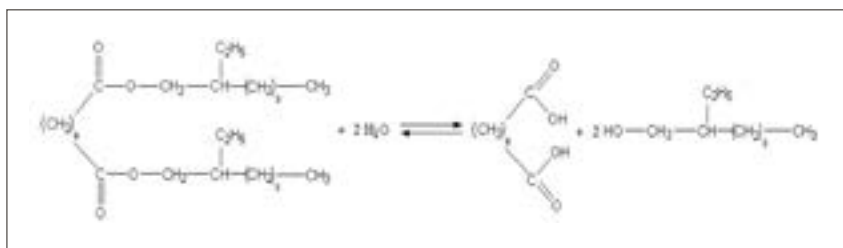


Рис. 1. Реакция гидролиза эфира ДОСт с образованием себациновой кислоты и 2-этилгексанола

Fig. 1. Reaction of hydrolysis of dioctyl sebacate with formation of sebacic acid and 2-ethylhexanol

зу (разложение эфира на спирт и кислоту при контакте с водой). На рис. 1 показана реакция гидролиза эфира ДОСт с образованием себациновой кислоты и спирта – 2-этилгексанола.

Степень гидролиза большей части эфиров двухосновных кислот в течение 24 ч составляет до 0,02–0,03 %. Гидролиз эфирной основы приводит к ухудшению многих эксплуатационных показателей:

повышенному осадкообразованию при термоокислительной деградации, возможности возникновения коррозионного воздействия масла на детали маслосистемы ГПА, изменению реологических характеристик и другим негативным проявлениям. Характерным признаком процессов гидролиза эфирной основы масла является увеличение кислотного числа масла. Следует отметить, что именно непредсказуемый рост кислотного числа данного эфирного масла в реальной эксплуатации на компрессорных станциях (КС) вызвал серьезные нарекания со стороны обслуживающего персонала, так как именно кислотное число эксплуатационного масла является одним из браковочных показателей, которые постоянно контролируются при эксплуатации агрегата.

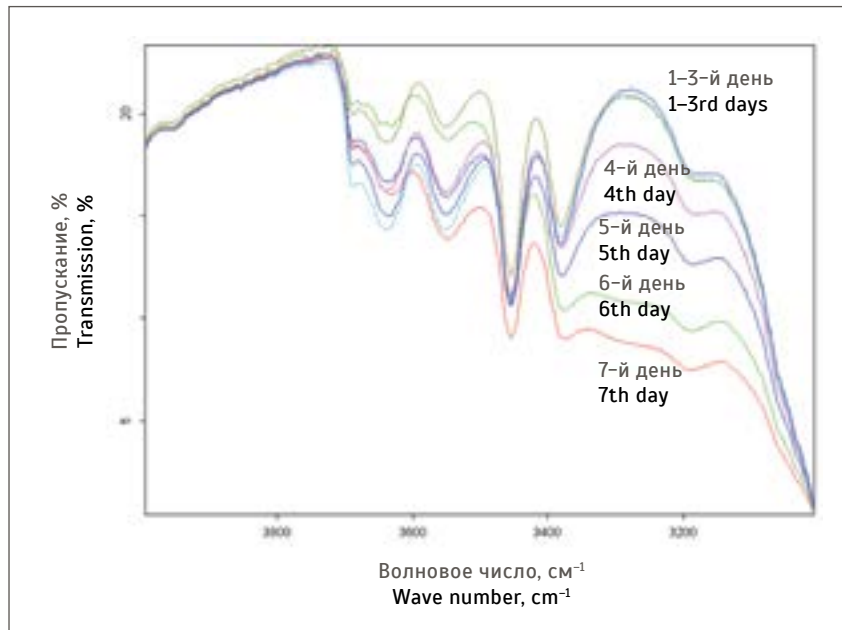


Рис. 2. ИК-спектры масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 при контакте с водой (при температуре 95 °С, в течение 7 дней)
Fig. 2. IR spectra of oil VNII NP 50-1-4U TURBO SHT-32 in contact with water (at 95 °C, during 7 days)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для количественной оценки влияния повышенной гигроскопичности эфирного масла на его эксплуатационные свойства поставлен ряд лабораторных экспериментов, где в качестве объектов сравнения применялись традиционные углеводородные масла.

В ООО «Газпром ВНИИГАЗ» проведен эксперимент, создающий условия для гидролиза эфирного масла. В течение семи дней масло ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 выдерживалось при температуре 95 °С в контакте с водой. Контрольный образец масла выдерживался в аналогичных условиях, но в отсутствие влаги.

Получены данные по изменению инфракрасных (ИК) спектров масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32, контактирующего с водой (рис. 2). В ИК-спектрах масла отмечается существенное увеличение поглощения в области частот 3000–3400 см⁻¹, связанное с наличием абсорбированной воды. При этом на седьмой день кислотное число для масла, имевшего контакт с водой, составляло 13,6 мг КОН/г, а для масла, не контактировавшего с водой, – 0,37 мг КОН/г.

Гидролиз эфирных масел осложняет их эксплуатацию в условиях негерметичности маслосистем оборудования, а также при хранении, особенно при резком изменении погодных условий (температуры, влажности и т. д.).

Особенность эксплуатации масел на объектах ПАО «Газпром» заключается в том, что работа ГПА чередуется с периодами относительно длительного нахождения оборудования в резерве. При этом значительные объемы маслостанов ГПА и их негерметичность дополнительно создают благоприятные условия для гидролиза эфирного масла. Из-за указанных особенностей применение масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 и других аналогичных продуктов в ПАО «Газпром» технологически неудобно. Для подтверждения этого в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» проведен эксперимент, имитирующий реальные условия работы масла в ГПА.

В качестве объекта исследований были выбраны три масла: масло на основе эфиров (ДОСт) – ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32, масло на основе полиальфаоле-

финов – Газпромнефть ИПМ-12ГП и масло на смесевой основе (90 % полиальфаолефинов, 10 % ДОСт) – ИПМ-10.

По условиям эксперимента, длившегося 454 дня, сочетались периоды хранения масел в течение 90 дней в открытой таре (имитация нахождения агрегата в резерве) и окисления масла в течение 5 ч (имитация работы агрегата). Окисление масел проводили в соответствии с ГОСТ 23797 [6] при температуре 200 °С и расходе воздуха 10 л/ч. Результаты эксперимента представлены на рис. 3. Масло «Петрим» в данном эксперименте не участвовало ввиду недостаточной ТОС (не выдерживает окисление при 200 °С).

Все масла имеют разные исходные значения кислотного числа, поэтому на графике (рис. 3) представлены данные по приросту кислотного числа относительно исходного значения для каждого масла. Из приведенных данных видно:

- скорость изменения кислотного числа для масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 существенно выше, чем для ма-

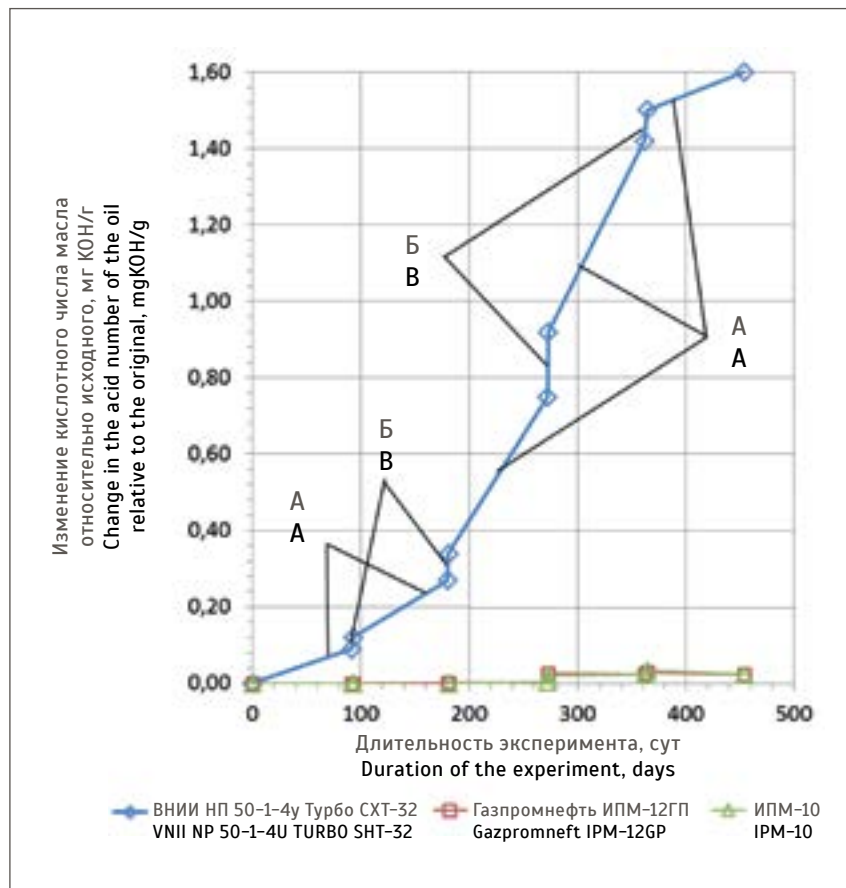


Рис. 3. Результаты эксперимента по имитации условий периодической работы масел в газоперекачивающем агрегате:

А – в процессе хранения; Б – при окислении масла

Fig. 3. Results of the experiment on simulating the conditions of periodic operation of oils in the gas compressor unit:

А – on standby; B – at oil aging

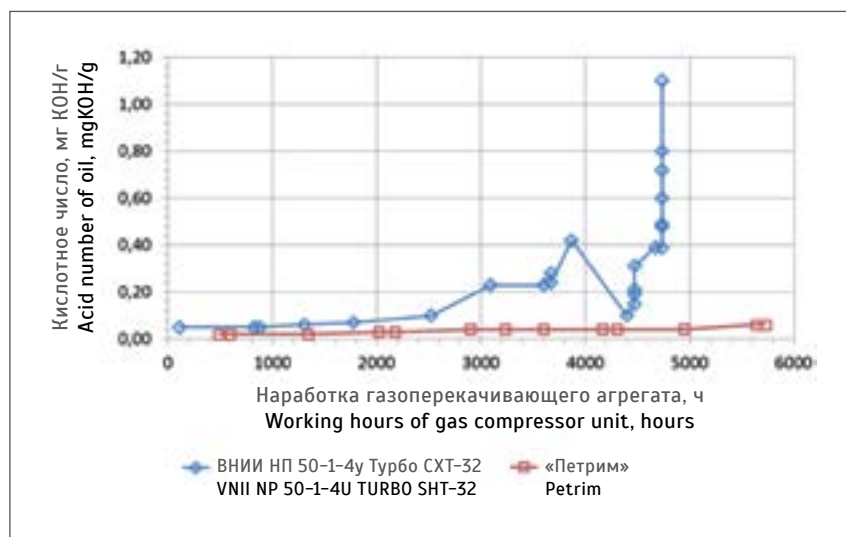


Рис. 4. Изменение кислотного числа в процессе мониторинга эксплуатации масел «Петрим» и ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 в маслосистеме двигателя АЛ-31СТ на КС-18А 000 «Газпром трансгаз Уфа»

Fig. 4. Change in acid number in the process of monitoring the use of the Petrim and VНИИ НП 50-1-4U TURBO SHT-32 oils in the oil system of the AL-31ST engine at KS-18A of Gazprom transgaz Ufa LLC

сел Газпромнефть ИПМ-12ГП и ИПМ-10;

- для масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 в отличие от масел Газпромнефть ИПМ-12ГП и ИПМ-10 наблюдается увеличение кислотного числа как в процессе хранения (участки А на графике), так и при окислении масла (вертикальные участки Б).

Суммарное время окисления масел составило 20 ч (менее половины от полного цикла окисления по [6] – 50 ч), но при этом абсолютное значение кислотного числа для масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 составило 1,6 мг КОН/г, что сопоставимо со значением для полного цикла окисления – 1,72 мг КОН/г (табл. 1). Это позволяет утверждать, что процесс гидролиза масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32, протекающий при его хранении (участок А), сокращает запас ТОС масла более чем в два раза. У масел ИПМ-12ГП и ИПМ-10 такое явление не наблюдается, и в процессе хранения между окислениями кислотное число не увеличивается.

Аналогичная картина отслеживается при мониторинге данных в процессе эксплуатации масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 в двигателях АЛ-31СТ на компрессорных станциях (КС) ПАО «Газпром».

Данные по изменению кислотного числа в процессе мониторинга эксплуатации масел «Петрим» (июнь 2011 г. – сентябрь 2012 г.) и ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 (октябрь 2012 г. – сентябрь 2014 г.) в маслосистеме двигателя АЛ-31СТ в составе ГПА ст. № 32 на КС-18А 000 «Газпром трансгаз Уфа» представлены на рис. 4.

Более интенсивное изменение кислотного числа для масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 по сравнению с маслом «Петрим» при одинаковой наработке не является очевидным свидетельством того, что процессы окисления масла в этом случае протекают более интенсивно, поскольку разные основы масла имеют различный механизм термоокислитель-

Таблица 2. Содержание компонентов в маслах и максимальная разовая ПДК согласно ГН 2.2.5.1313-03 [10]
Table 2. Content of components in oils and single maximum permissible concentration (MPC) according to GN 2.2.5.1313-03 [10]

Вещество Substance	ИПМ-10 IPM-10		«Петрим» Petrim		ИПМ-12ГП IPM-12GP		ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 VNII NP 50-1-4U TURBO SHT-32	
	Содержание, % Content, %	ПДК, мг/м ³ MPC, mg/m ³	Содержание, % Content, %	ПДК, мг/м ³ MPC, mg/m ³	Содержание, % Content, %	ПДК, мг/м ³ MPC, mg/m ³	Содержание, % Content, %	ПДК, мг/м ³ MPC, mg/m ³
ПАОМ (4-й класс – малоопасные) Polyalphaolefin oils (4th class – low-risk)	90	900	70	900	100	900	–	–
ДОСт (3-й класс – опасные) Heat-stable dioctyl sebacate (3rd class – hazardous)	10	10	–	–	–	–	100	10
Трикрезилфосфат (2-й класс – высокоопасные) Tricresyl phosphate (2nd class – highly hazardous)	1,2-1,4	0,5	1,2-1,4	0,5	1,2	0,5	4	0,5

ных процессов. Но при этом явно просматривается вертикальная часть графика для масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32. С марта по сентябрь 2014 г. ГПА простаивал, и наработка в этот период отсутствовала. В то же время резко возросло кислотное число масла с 0,39 до 1,10 мг КОН/г, что свидетельствует о процессе гидролиза базового компонента.

На рис. 5 представлены данные по изменению кислотного числа в процессе мониторинга эксплуатации масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 (июнь 2011 г. – сентябрь 2014 г.) в маслосистеме двигателя АЛ-31СТ в составе ГПА ст. № 11 на КС-5 000 «Газпром трансгаз Уфа». На графике (рис. 5) отмечены нормы предельных значений по кислотному числу, определяемому в процессе эксплуатации масла: 1 – нормы предельных значений в соответствии с [7]; 2 – нормы предельных значений в соответствии с Решением об изменении физико-химических показателей качества масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 ОАО «УМПО»

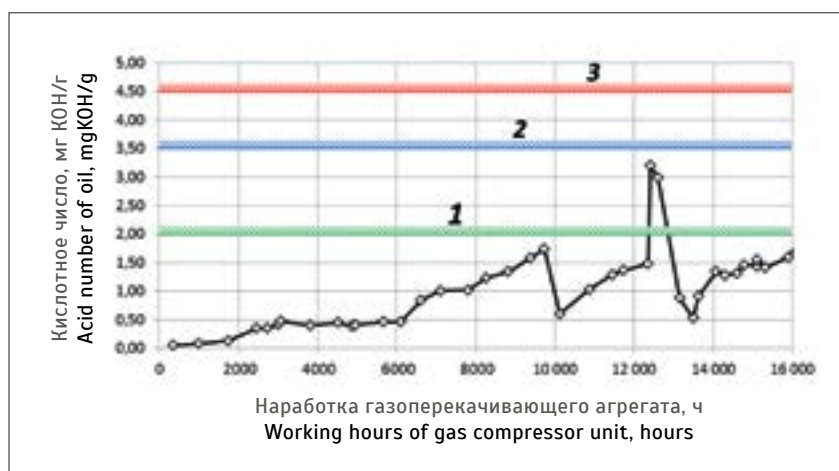


Рис. 5. Изменение кислотного числа в процессе мониторинга эксплуатации масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 в маслосистеме двигателя АЛ-31СТ в составе ГПА на КС-5 000 «Газпром трансгаз Уфа»
Fig. 5. Change in acid number in the process of monitoring the use of VNII NP 50-1-4U TURBO SHT-32 in the oil system of the AL-31ST engine as part of the gas compressor unit at KS-5 of Gazprom transgaz Ufa LLC

от 23 апреля 2015 г. (далее – Решение); 3 – нормы предельных значений в соответствии с [8].

При наработке двигателя около 60 ч за один календарный месяц кислотное число резко возросло с 1,48 до 3,20 мг КОН/г (рис. 5). Последующее за этим резкое

уменьшение кислотного числа, как и в предыдущем случае (наработка ГПА около 10 тыс. ч), обусловлено доливом свежего смазочного масла при восполнении безвозвратных потерь. Увеличенная в соответствии с Решением эксплуатационная норма по кислот-

ному числу формально позволяет эксплуатировать двигатель дальше без замены масла. Основная проблема заключается не в оптимальном установлении предельного значения контролируемого показателя качества масла, что, безусловно, должно опираться на взаимосвязь свойств масла и технического состояния двигателя, а в непредсказуемом и резком изменении кислотного числа. В этом случае на эксплуатанта ложатся дополнительная нагрузка и риски, связанные с неопределенностью поведения масла.

В целом все рассматриваемые масла относятся к 4-му классу опасности (малоопасные вещества) по ГОСТ 12.1.007-76 [9]. Но по сравнению с маслами на основе углеводов состав и концентрация компонентов эфирного масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 делают его более токсичным по предельно допустимым концентрациям (ПДК) вредных веществ (паров и аэрозолей) в воздухе рабочей зоны (табл. 2).

ПДК паров и аэрозолей в рабочей зоне базового компонента масла ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 – ДОСт на два порядка меньше, чем у полиальфаолефиновых масел (ПАОМ). Существенный вклад в повышенную токсичность масел ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32 также вносит повышенное содержание противоизносной присадки – трикрезилфосфата, имеющей наибольший класс опасности. Технический трикрезилфосфат представлен смесью орто-, мета- и параизомеров, наиболее токсичным из которых является ортоизомер.

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в ходе лабораторных экспериментов по моделированию реальных условий эксплуатации масел в ГПА, качественно совпадают с данными мониторинга их поведения в реальной эксплуатации на КС и позволяют ставить вопрос о нецелесообразности применения

масел на основе эфиров себаценовой кислоты (ДОСт), в частности ВНИИ НП 50-1-4у Турбо СХТ-32, при эксплуатации технологического оборудования КС ПАО «Газпром».

Это обусловлено высокой стоимостью эфирных масел, непредсказуемым изменением физико-химических свойств, таких как кислотное число, в процессе нахождения оборудования в резерве, что снижает эксплуатационный ресурс, повышенной токсичностью (ПДК – 10 мг/м³) по сравнению с углеводородными маслами (ПДК – 900 мг/м³). Все это в совокупности ухудшает технико-экономическую эффективность применения данных масел на объектах ПАО «Газпром».

Вместе с тем следует отметить, что применяемое в настоящий момент масло «Петрим» используется на пределе своих возможностей вследствие недостаточной ТОС (175 °С). Целесообразно рассмотреть вопрос его замены на углеводородное масло с повышенной ТОС (200 °С). ■

ЛИТЕРАТУРА

1. ТУ 38.401-58-245-99. Масло Петрим. М.: ОАО «ВНИИ НП», 1999. 13 с.
2. ТУ 38.1011299-2006. Масло ИПМ-10 авиационное. М.: ОАО «ВНИИ НП», 2006. 15 с.
3. Мухин А.А., Поляков С.Ю., Скрябина А.Е., Фадеев В.К. Склонность смазочных масел к образованию высокотемпературных отложений в теплонапряженных газотурбинных двигателях // Газовая промышленность. 2014. № 3. С. 46-49.
4. Мухин А.А., Поляков С.Ю., Скрябина А.Е. и др. Новое поколение смазочных масел для теплонапряженных газотурбинных двигателей, используемых в качестве приводов ГПА // Газовая промышленность. 2015. № 6. С. 42-47.
5. ТУ 38.401-58-12-91 (с изм. 1-4). Масло синтетическое ВНИИ НП 50-1-4у. М.: ОАО «ВНИИ НП», 1991. 20 с.
6. ГОСТ 23797-79. Масла для авиационных газотурбинных двигателей. Метод определения термоокислительной стабильности в объеме масла (с изм. № 1, 2) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200008570> (дата обращения: 25.12.2017).
7. Руководство по эксплуатации двигателя АЛ-31СТН – 60.РЭ-1. В 4-х кн. Кн. 2. Инструкция по техническому обслуживанию двигателя АЛ-31СТН. М.: ОАО «НПО» Сатурн» НТЦ им. А. Льюки, 2005. 184 с.
8. СТО Газпром 061-2009. Смазочные масла для газоперекачивающих агрегатов. Нормы отбраковки. М.: ОАО «Газпром», 2009. 7 с.
9. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 1977. 7 с.
10. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. М.: Минздрав России, 2003. 201 с.

REFERENCES

1. Specification TU 38.401-58-245-99. Petrim Oil. Moscow, VNIINP OJSC, 1999, 13 p. (In Russian)
2. Specification TU 38.1011299-2006. IPM-10 Aviation Oil. Moscow, VNIINP OJSC, 2006, 15 p. (In Russian)
3. Mukhin A.A., Polyakov S.Yu., Skryabina A.E., Fadeev V.K. Propensity of Lubricating Oils to the Formation of High-Temperature Sediments in Heat-Stressed Gas Turbine Engines. *Gazovaya promyshlennost' = Oil Industry*, 2014, No. 3, P. 46-49. (In Russian)
4. Mukhin A.A., Polyakov S.Yu., Skryabina A.E., et al. A New Generation of Lubricating Oils for Heat-Stressed Gas Turbine Engines Used as Drives for Gas Compressor Unit. *Gazovaya promyshlennost' = Oil Industry*, 2015, No. 6, P. 42-47. (In Russian)
5. Specification TU 38.401-58-12-91 with Amendments 1-4. Synthetic Oil VNIINP 50-1-4u. Moscow, VNIINP OJSC, 1991, 20 p. (In Russian)
6. State Standard GOST 23797-79. Oils for Aviation Gas Turbine Engines. Method for Determination of Thermal Oxidation Stability in the Volume of Oil (with Amendments No. 1, 2) [Electronic source]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200008570> (access date: December 25, 2017). (In Russian)
7. Manual for Operation of the Engine AL-31STN – 60.RE-1. In 4 books. B. 2. Instructions for Maintenance of the Engine AL-31STN. Moscow, "NPO" Saturn" OJSC the A. Lul'ka Scientific and Technical Center, 2005, 184 p. (In Russian)
8. Company Standard STO Gazprom 061-2009. Lubricating Oils for Gas Compressor Units. Rejection Criteria. Moscow, Gazprom OJSC, 2009, 7 p. (In Russian)
9. State Standard GOST 12.1.007-76. Occupational Safety Standards System. Harmful Substances. Classification and General Safety Requirements. Moscow, Standartinform, 1977, 7 p. (In Russian)
10. Hygienic Standards GN 2.2.5.1313-03. Maximum Permissible Concentrations of Harmful Substances in the Air of the Working Area. Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation, 2003, 201 p. (In Russian)