

ТЭХНІЧНАЯ ХІМІЯ І ХІМІЧНАЯ ТЭХНАЛОГІЯ
TECHNICAL CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING

УДК: 544.02+665.7
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-2-154-164>

Поступила в редакцию 06.09.2024
Received 06.09.2024

С. В. Василевич, Е. А. Шапорова, С. О. Стойко

Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь

**ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АВИАЦИОННЫХ МАСЕЛ
ПРИ ИХ ТЕРМОКОНВЕРСИИ**

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований изменения химического состава авиационных масел при их термоконверсии. В качестве объектов исследований выступают авиационные масла, широко применяемые в авиационной отрасли Республики Беларусь: МС-8П, ТУРБОНИКОЙЛ 98 (ТН 98) и ТУРБОНИКОЙЛ 600 (ТН 600). Приведено описание условий эксплуатации масел, включая термические режимы. Отмечено, что хотя рассматриваемые масла обладают термической стабильностью в широком температурном интервале, на различных этапах эксплуатации они подвергаются перегревам, приводящим к количественному изменению углеводородного состава, что может способствовать значительному снижению смазывающих свойств, образованию и накоплению механических загрязнений в узлах трения, образованию дефектов и разрушению элементов узлов трения. В ходе исследования определялся химический состав исходных масел, после чего масла прогревались в течение определенного периода. Температурные режимы нагрева выбраны в диапазоне от максимальных рабочих температур, в которых используются эти масла, до минимальных температур вспышки. Для удобства компоненты масел были разделены на восемь групп компонентов. Представлен анализ изменения процентного содержания групп компонентов исследованных масел при их прогреве. Показано влияние времени нагрева на компонентный состав указанных образцов. Полученные результаты могут быть полезны при моделировании работы узлов трения авиационных двигателей и прогнозировании изменений показателей качества масел в условиях их эксплуатации.

Ключевые слова: авиационные масла, химический состав, газовая хромато-масс-спектрометрия, термоконверсия

Для цитирования. Василевич, С. В. Изменение химического состава авиационных масел при их термоконверсии / С. В. Василевич, Е. А. Шапорова, С. О. Стойко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2025. – Т. 61, № 2. – С. 154–164. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-2-154-164>

S. V. Vasilevich, E. A. Shapорова, S. O. Stoiko

Belarusian State Aviation Academy, Minsk, Republic of Belarus

**CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF AVIATION OILS DURING
THEIR THERMAL CONVERSION**

Abstract. The paper describes experimental studies of changes in the chemical composition of aviation oils during their thermal conversion. Aviation oils widely used in the aviation industry of the Republic of Belarus were taken as research objects: MS-8P, TURBONIKOIL 98 (TN 98) and TURBONIKOIL 600 (TN 600). A description of the operating conditions of oils, including thermal conditions, is provided. It is noted that, although the oils in question are thermally stable over a wide temperature range, at various stages of operation they might be overheated, leading to a quantitative change in the hydrocarbon composition. This can lead to a significant decrease in lubricating properties, the formation and accumulation of mechanical impurities in the friction unit, the formation of defects, and destruction of friction unit elements. A description of the methodology for determining the quantitative and qualitative analysis is presented. During the study, the chemical composition of the starting oils was determined, after which the oils were heated for a certain period of time. Warm-up temperatures were selected from the maximum operating temperatures at which these oils are used to the minimum flash points. For convenience, the oil components were divided into eight groups of components. An analysis of changes in the percentage of groups of components of the studied oils during their heating is presented. The effect of heating time on the component composition of these samples is shown, esters, additives and other organic compounds are determined. The results obtained can be useful in modeling the operation of friction units of aircraft engines and predicting changes in oil quality indicators under operating conditions.

Keywords: aviation oils, chemical composition, gas chromatography-mass spectrometry, thermal conversion

For citation. Vasilevich S. V., Shaporova E. A., Stoyko S. O. Changes in the chemical composition of aviation oils during their thermal conversion. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2025, vol. 61, no. 2, pp. 154–164 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-2-154-164>

Введение. Авиационные масла применяются для смазки двигателей и редукторов силовых установок летательных аппаратов. Они работают при разных режимах трения, высоких температурах, нагрузках, скоростях, в контакте с различными конструкционными материалами, в условиях высокой аэрации [1–6]. Так, современные газотурбинные двигатели характеризуются жесткими условиями работы: высокие температуры – до 300 °С и выше, большие частоты вращения турбин – 12 000–20 000 мин⁻¹. Напряженность работы масла в таких условиях эксплуатации газотурбинных двигателей определяется количеством тепла, которое необходимо отвести от поверхностей трения деталей, и при прочих равных условиях характеризуется скоростью прокачивания масла через двигатель [6–9]. Термическая стабильность масел определяется в значительной степени химическим составом и его изменением с течением времени при нагреве. В связи с этим влияние состава масел на их физико-химические свойства интересуют многих исследователей [10–18]. Кроме того, об изменении состава масел в процессе эксплуатации важно знать с точки зрения регенерации моторных масел для авиационных поршневых, карбюраторных и дизельных двигателей [19, 20].

В ходе технической эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей применяют различные минеральные и синтетические масла, характеризующиеся пологими вязкостно-температурными свойствами, сравнительно высокой термостабильностью, низкой окисляемостью при взаимодействии с кислородом воздуха. Настоящая работа посвящена анализу термостабильности авиационных масел нефтяного (МС-8П) и синтетического (ТН 98, ТН 600) происхождения, широко использующихся при эксплуатации авиационной техники в Республике Беларусь.

Описание исследуемых масел. Авиационное масло МС-8П – наиболее широко применяемое масло на нефтяной основе, содержащее комплекс высокоэффективных присадок. Оно разработано для замены масел МК-8 и МК-8П [21]. Авиационное масло МС-8П применяется для турбореактивных двигателей дозвуковых и сверхзвуковых самолетов (Ил-62, Ил-76, Ил-86, Ту-134, Ту-154, Як-40, Су-25), а также в составе маслосмесей в турбовинтовых двигателях самолетов (Ан-12, Ан-22, Ан-24, Ан-30, Ан-32, Ил-22), широко применяемых в гражданской и государственной авиации СНГ [22].

Авиационное масло ТН 98 – синтетическое масло на основе загустевшего синтетического сложноэфирного масла с набором присадок для повышения антикоррозионных и антиокислительных качеств. ТН 98 применяется в газотурбинных силовых установках и трансмиссиях вертолетов [23], для турбовальных двигателей вертолетов Ми-2, Ми-8, Ми-24, а также главных редукторов вертолетов Ми-8.

Авиационное масло ТН 600 – синтетическое смазочное масло, которое представляет из себя комбинацию из сложных эфиров, используемых в качестве основы, и пакета присадок, включающего антиокислительные, противоизносные, антипенные и антикоррозионные присадки [24]. ТН 600 разработано для газотурбинных двигателей и вспомогательного оборудования, используемых в самолетах и вертолетах в военной и гражданской авиации [24]. В авиации стран СНГ авиационное масло ТН 600 применяется для двигателей самолетов Бе-200, Ан-148, Ан-158, Ан-178, а также Ту-204, Ил-76МФ, Ил-76-ТФ, Ил-76-МД-90А, Ил-78МК-90, Ил-96 как заменитель масла ИПМ-10 [24]. Масло ТН 600 используется для двигателей CFM56 различных модификаций [24], устанавливаемых на транспортные самолеты типа Boeing 737, широко применяемых в гражданской авиации Республики Беларусь.

Методика и результаты исследований. Поскольку точный состав масел, применяемых в авиационной технике, в открытом доступе не представлен, для анализа влияния эксплуатационных режимов на свойства масел были проведены соответствующие исследования.

Так, в ходе работы определялся химический состав авиационных масел МС-8П, ТН 600 и ТН 98, а также изменение состава масел при их нагреве.

Максимальные температуры испытаний образцов перечисленных типов масел были выбраны в диапазоне от максимальных рабочих температур, в которых используются эти масла, до минимальных температур вспышки [21, 23, 24]. Температуры испытаний следующие: для масла МС-8П – 135 °С, для масел ТН 98 и ТН 600 – 200 °С. Нагрев проводился при изотермических условиях с применением муфельной печи SNOL7,2/1300. После нагрева образцы масел вместе с контрольными (не подвергаемыми нагреву) образцами масел исследовались на предмет определения их химического состава.

Определение кислотности водных растворов проводили с использованием рН-метра HANNA HI 9321. Взвешивание навесок образцов проводили на весах Ohaus Pioneer (Ohaus Corporation, США) с точностью 0,0001 г. Класс точности: (I) специальный.

Для качественного и количественного анализа образцов авиационных масел использовали метод газовой хромато-масс-спектрометрии. Температурный градиент: 80 °С (выдержка 3 мин), с 80 до 300 °С со скоростью 10 °С/мин, 300 °С (выдержка 20 мин). Идентификацию соединений проводили с помощью библиотеки масс-спектров NIST17 в режиме полного сканирования масс-детектора (SCAN) по временам удерживания компонентов. Для анализа использовали газовый хроматограф Agilent 7890A с капиллярной колонкой Agilent J&W DB-5MS- UI(30 мм × 0,25 мм × 0,25 мкм) (Part No. 122-5522UI). Газ-носитель: гелий (скорость потока – 1 мл/мин). Объем вводимой пробы – 1 мкл. Для детектирования компонентов применялся масс-селективный спектрометр Agilent 5975C с ионизацией электронным ударом, энергия ионизации – 70 эВ, температура ионного источника – 230 °С, температура квадруполя – 150 °С. В случае качественного анализа экстрактов идентификацию соединений проводили по времени удерживания с помощью библиотеки масс-спектров NIST 98 в режиме полного набора ионов масс-детектора. С целью повышения избирательности и чувствительности метода количественный анализ экстрактов проводили при работе масс-селективного детектора в режиме мониторинга выбранных ионов. Основные параметры хроматографического метода идентичны при проведении качественного и количественного анализов.

В ходе измерения навеску авиационного масла массой 0,10 г помещали в стеклянную колбу и добавляли 10-кратный избыток дихлорметана, полученную смесь хроматографировали.

На рис. 1 представлены хроматограммы исходных масел ТН 600, ТН 98, МС-8П, а также после прогрева данных масел при указанных выше температурах в течение 100 ч масел ТН 600, ТН 98, МС-8П. Хроматограммы масел, прогретых в течение 5, 20, 30 и 50 ч не приведены в связи с ограниченным объемом статьи.

В табл. 1 представлены результаты хроматографического анализа масла ТН 600. Указанное авиационное масло содержит коррозионный ингибитор (N-фенил-1-Нафталинамин), сложные эфиры, антиоксиданты (*трет*-октилдифениламин и др.).

Процентное содержание компонентов масел было посчитано методом нормирования (метод внутренней нормализации), применение которого основано на предположении, что на хроматограмме зарегистрированы все вещества, входящие в состав анализируемой смеси и что доля площади (высоты) каждого пика от суммы площадей (высот) всех пиков соответствует содержанию вещества в массовых процентах. Процентное содержание вещества в анализируемой смеси рассчитывалось путем определения площади соответствующего пика как процентной части общей площади всех пиков, за исключением пиков, соответствующих растворителям или реактивам, подвижной фазе или матрице образца.

В связи с большим количеством определяемых компонентов для удобства анализа компоненты были разделены на 8 групп: 1 – алканы, гомологи бензола; 2 – кислородсодержащие соединения (кислоты, эфиры, спирты, кетоны); 3 – амины; 4 – соединения с гетероциклами (кроме кислородсодержащих); 5 – N-, S-, P-содержащие углеводороды (не входящие в группу 4); 6 – кислородсодержащие гетероциклы; 7 – полициклические углеводороды; 8 – N-, S-, P-, Me-, B-, Г-содержащие соединения, не вошедшие в другие группы.

К группе 1 отнесены алканы и ароматические соединения на основе бензола и его гомологов, не содержащие гетероатомов, как углеводороды, являющиеся основой нефтяных масел,

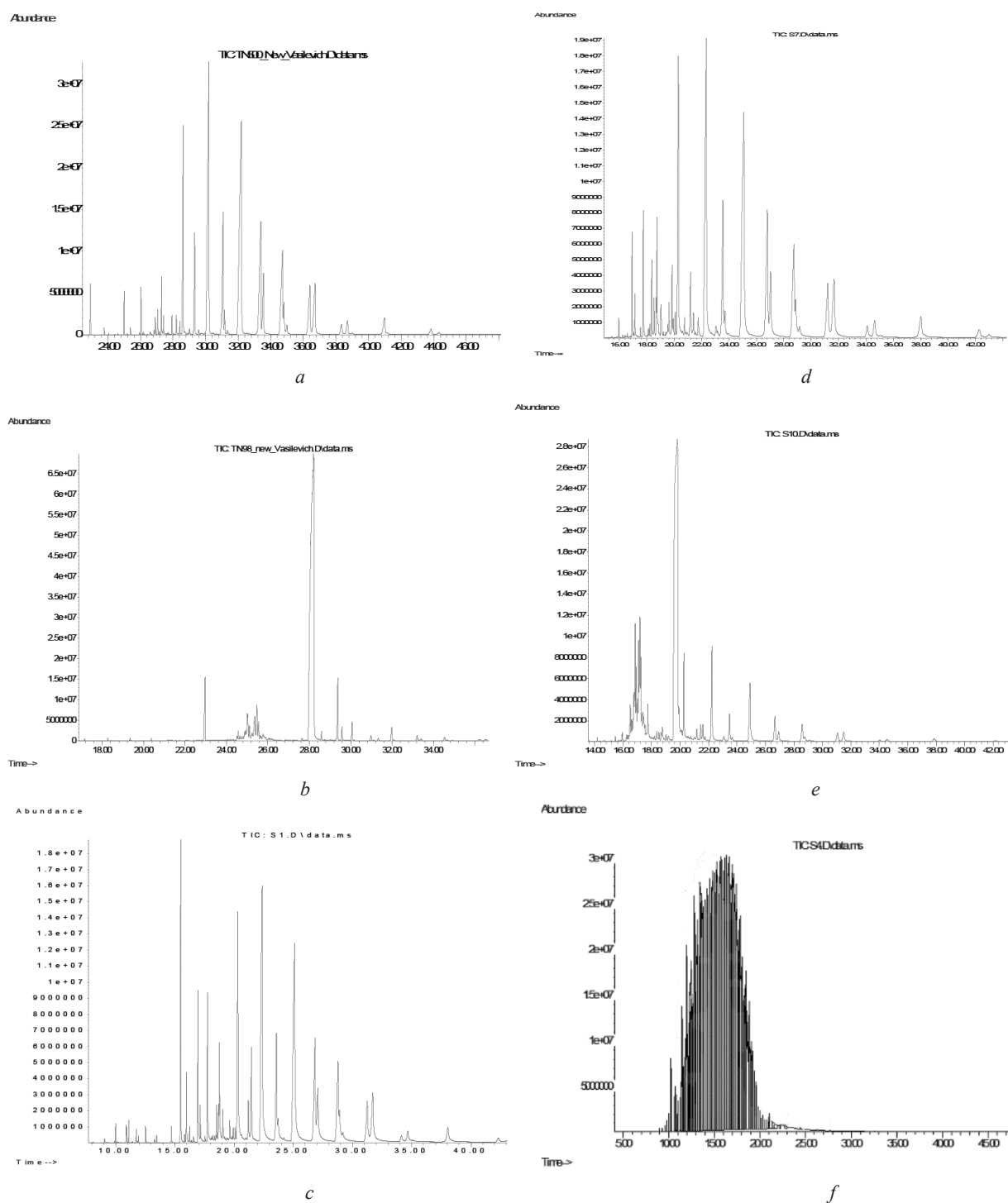


Рис. 1. Хроматограммы исходных авиационных масел ТН 600 (а), ТН 98 (б) и МС-8П (с), а также обработанных в течение 100 ч авиационных масел ТН 600 (д), ТН 98 (е) и МС-8П (ф)

Fig. 1. Chromatograms of the original aviation oils TN 600 (a), TN 98 (b) and MS-8P (c), as well as aviation oils TN 600 (d), TN 98 (e) and MS-8P (f) treated for 100 h

Т а б л и ц а 1. Компонентный состав авиационного масла ТН 600

Table 1. Component composition of aviation oil TN 600

Соединение	%
N-фенил-1-нафталинамин -	1,0953
S-трет-бутиловый эфир 5-оксогексантиоевой кислоты	0,2030
Трет-октилдифениламин	0,0324
Пропиональдегид пропилигидразон	0,0228
Трифенилфосфат	0,8606
Винилтриэтилсилан	0,0248
Ангидрид гептановой кислоты	27,8656
2,3,4-триметоксибензиламин	0,0442
(1-метилэтил)фенилдифениловый эфир фосфорной кислоты	1,3336
2,4,6-трихлорфениловый эфир валериановой кислоты	0,0232
Трис(3-метилфенил) эфир фосфорной кислоты	0,0599
Транс-2-гексенил валерат	0,1203
4-трифторметил-6-метил-1,3-дифенил-1Н-пиразоло[3,4-b]пиридин	0,4817
1-(1-метилэтиленил)-4-(1-метилэтил)-бензол	0,5481
Валериановый ангидрид	1,0578
Капролактам	0,061427
1-(1-метилэтиленил)-3-(1-метилэтил)-бензол	0,4377
4-деканон	0,0293
Три(2-изопропилфенил)эфир фосфорной кислоты	0,0402
N-[4-(4-метил-1-фталазинилокси)фенил]-ацетамид	0,4511
N-фенил-Р,Р-три-м-толил-фосфинимид	0,0215
Дибутилитаконат	0,2677
5-этил-2,4-гептандион	7,4142
8-этокси-4,5-дигидро-1-[(4-изопропилфенил)имино]-4,4-диметил-1Н-[1,2]дитиоло[3,4-с]хинолин	0,1664
4-октил-N-(4-октилфенил)-бензоламин	3,9127
4,4-диметилноксазолина (dmox) производное 10,12-трикозадиеновой кислоты	0,7434
1,5-дигидро-4-метокси-2Н-пиррол-2-он	0,0488
4-(1,1,3,3-тетраметилбутил)-N-[4-(1,1,3,3-тетраметилбутил)фенил]-бензоламин	0,0353
1-(3-этокси-2-метил-акрилоил)-3-(2-гидрокси-этил)-мочевина	27,8155
Фенилметил-3-ацетил-2,4-бис (ацетиламино) -2,4,6-тридеокси-β-L-идопиранозид	0,0614
3-(триметилсилил)-2-пропин-1-ол	6,3452
5-бутилдигидро-2(3Н)-фуранон	1,2601
5,6,12,13-тетрагидро-5,12-дифенил-добенз[а,һ]антрацен	0,1613
6-аза-6-гомо-5α-холестано[6,7-d]тетразол	0,0668
3,20-бис[(1-метилэтилен)амино]-(3β)-прегнан-18-ол	3,2026
2,8-диметил-4,6-нонандион	1,4214
Метиловый эфир 2-аллилпент-4-еновой кислоты	10,6584
2-циано-3-[4-(4-метил-3-фуроксанилметокси)фенил-этиловый эфир пропионовой кислоты	1,1137
цис-3,4-диметил-2-фенилтетрагидро-1,4-тиазин	0,1081
Циклобутанон оксим	0,1817
Диэтилбис(триметилсилиловый) эфир кремниевой кислоты	0,0544

характеризующиеся стабильностью против окисления, термической устойчивостью, вязкостно-температурными и противоизносными свойствами, восприимчивостью к присадкам.

Кислородсодержащие соединения выделены в отдельную группу 2, так как в синтетических маслах они (в виде эфиров) составляют основу; в минеральном масле – это в основном продукты окисления.

В группы 3, 4 и 5 входят N, S, Р-содержащие углеводороды, составляющие в основном антикоррозионные, антиокислительные (группа 3), моющее-диспергирующие (группа 4) и противоизносные, вязкостные (группа 5) присадки. Разделение, конечно, условное, но, тем не менее, позволяет говорить об изменениях и выработке присадок в процессе эксплуатации.

В группы 6, 7 и 8 вошли соединения, представляющие собой углеводороды присадок и фактические смолы, способствующие образованию смолистых веществ в процессе эксплуатации.

Было определено, что после прогрева масла ТН 600 в течение 5 ч при температуре 200 °С компонентный состав оставался идентичен исходному и содержал коррозионный ингибитор (N-фенил-1-нафталиламин), сложные эфиры и антиоксиданты (*трет*-октилдифениламин и др.). На рис. 2 приведены данные процентного содержания групп компонентов для исходного масла ТН 600 и для образцов масла, подвергнутых прогреву в течение 5, 20, 30, 50 и 100 ч. Видно, что при нагреве в течение 5 ч происходило снижение содержания компонентов группы 2 и значительное увеличение содержания компонентов группы 8. После прогрева в течение 20 ч при температуре 200 °С компонентный состав также не менялся, однако наблюдалось изменение относительного содержания соединений. Так, уменьшалось содержание алифатических, ароматических, алкилированных кислородсодержащих соединений, алифатических и ароматических аминов (группы 2 и 3). Содержание соединений с гетероциклами и алифатических и ароматических соединений, содержащих N, S, P (группы 4 и 5), увеличилось. Содержание остальных компонентов примерно осталось без изменений.

При прогреве авиационного масла ТН 600 в течение 30 ч при температуре 200 °С компонентный состав изменился, в его составе появились более высокомолекулярные соединения, такие как 3,7-диметил-4,6-нонандион; (RS)-4-амино-3-(4-хлорфенил)бутановая кислота, метиловый эфир N-диметиламинометиленакарбоновой кислоты; 6-метил-2-(4-метилфенил)-7-(2,4,5-триметилфенилметил)индолизин; S-*трет*-бутиловый эфир 5-оксогексантиоевой кислоты; 1-(1-оксо-5,8,11,14-эйкозатетраенил)-пирролидин; пирролидид 11-фенилундекановой кислоты; пиперидин-2,5-дион. Наблюдалось значительное снижение компонентов групп 1, 5 и 7 и увеличение содержания компонентов групп 2 и 4.

После прогрева масла ТН 600 в течение 50 ч компонентный состав не менялся относительно масла, прогретого в течение 30 ч. Было заметно незначительное изменение относительного содержания соединений (содержание компонентов групп 1, 5, 6 и 8 увеличивалось, групп 3, 4 и 7 – уменьшалось).

После прогрева масла ТН 600 в течение 100 ч при температуре 200 °С оно содержало коррозионный ингибитор (N-фенил-1-нафталиламин), сложные эфиры и антиоксиданты (*трет*-октилдифениламин и др.). Установлено, что происходило уменьшение относительного содержания низкомолекулярных соединений. Значительно увеличилось содержание компонентов группы 2 и снизилось содержание компонентов группы 4.

В результате хроматографического анализа исходного авиационного масла ТН 98 (табл. 2) установлено, что основными компонентами являлись сложные эфиры (2-этилгексильный эфир октановой кислоты; 2-этилгексильный эфир декановой кислоты; 2-этилгексилгептиловый эфир адипиновой кислоты; диоктиловый эфир гександиовой кислоты; бис(2-этилгексильный) эфир гександиовой кислоты и др.), коррозионный ингибитор (N-фенил-1-нафталиламин), пластификатор (диоктиладипинат), антиоксиданты (4-октил-N-(4-октилфенил)-бензоламин) и другие присадки.

Компоненты данного масла также были сгруппированы на 8 указанных выше групп. Прогрев масла ТН 98 проводился в течение 20, 50 и 100 ч.

На рис. 3 показана динамика изменения процентного состава содержания групп компонентов масла ТН 98 при его прогреве.

Было определено, что после прогрева масла в течение 20 ч при температуре 200 °С компонентный состав идентичен исходному, также содержит коррозионный ингибитор (N-фенил-1-нафталиламин), сложные эфиры и антиоксиданты (*трет*-октилдифениламин и др.). При этом

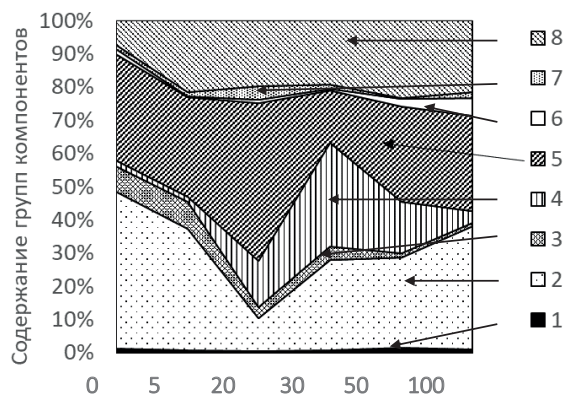


Рис. 2. Динамика изменения групп масла ТН-600

Fig. 2. Dynamics of changes of TN-600 oil groups

Таблица 2. Компонентный состав исходного авиационного масла ТН 98

Table 2. Component composition of the original aviation oil TN 98

Соединение	%
2-этилгексильный эфир октановой кислоты	0,0977
2-пентильный эфир 2,4-дифторбензойной кислоты	0,0934
2-этилгексильный эфир декановой кислоты	0,0807
N-фенил-1-нафтаминамин	3,3582
2-этилгексилгептиловый эфир адипиновой кислоты	0,0749
Диоктиловый эфир гександиовой кислоты	0,3873
бис(2-этилгексильный) эфир гександиовой кислоты	2,1256
Диоктиладипинат	1,7561
2-этилгексил октиловый эфир адипиновой кислоты	4,8215
Циклогептил октиловый эфир адипиновой кислоты	4,2045
2-этилгексил нониловый эфир адипиновой кислоты	0,1834
(1-метилэтил)фенилдифениловый эфир фосфорной кислоты	0,1227
2,4-диметилпент-3-ил октиловый эфир адипиновой кислоты	0,1331
Изогексильный эфир адипиновой кислоты	0,1082
бис(2-этилгексильный) эфир декандиовой кислоты	74,0091
Валериановый ангидрид	0,4393
4-октил-N-(4-октилфенил)-бензоламин	3,4379
бис(2-этилгексильный) эфир додекандиовой кислоты	0,681
1-(3-этокси-2-метил-акрилоил)-3-(2-гидрокси-этил)-мочевина	1,4319
3-(триметилсилил)-2-пропин-1-ол	0,3271
Пирролидид 11-фенилундекановой кислоты	1,0865
Пирролидид 13-фенилтридекановой кислоты	0,3167
Пирролидид 18-фтороктадекановой кислоты	0,1659
Капролактамы	0,1705

процентное содержание компонентов значительно изменилось (увеличилось содержание компонентов групп 1, 4–8 и снизилось – групп 2 и 3).

После прогрева масла ТН 98 в течение 50 ч при температуре 200 °С компонентный состав идентичен исходному, однако появились новые соединения, такие как 1,3,5-триметил-2-(1-метилэтил)бензол; 2,3,7-триметилотан; нонил-2-октиловый эфир адипиновой кислоты; 2-оксо-октановая кислота; 2-метил-3-нонанон; N-диметиламинометилеубутиловый эфир DL-3-аминоизо-масляной кислоты; метсуксимида; креатинин; 5-амино-2-метилтио-тиазоло[4,5-d]пиримидин-7(6H)-он; ди(2-метилпент-3-ил)эфир янтарной кислоты; 2-(4-нитрофенил)-4,6-дифенилпиримидин; 2-этилгексил изогексильный эфир сернистой кислоты; 5,6,12,13-тетрагидро-5,12-дифенил-дибенз[a,h]антрацен; триаллилэтоксисилан; 1-метокси-3-метил-2-гексен.

Содержание групп компонентов менялось относительно масла, прогретого в течение 30 ч. Наблюдалось снижение содержания компонентов групп 6 и 7 (при этом содержание группы 6 приблизилось к нулю).

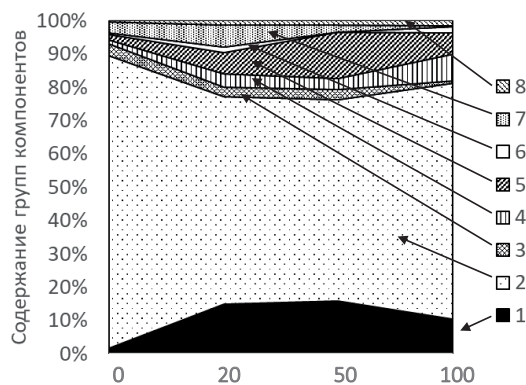


Рис. 3. Динамика изменения групп масла ТН-98

Fig. 3. Dynamics of changes of TN-98 oil groups

После прогрева масла ТН 98 в течение 100 ч при температуре 200 °С увеличилось содержание высокомолекулярных веществ и уменьшилось – низкомолекулярных. Снизилось содержание компонентов групп 1, 3, 5 и 7 и увеличилось – групп 2, 4, и 8.

В результате хроматографического анализа исходного авиационного масла МС-8П (табл. 3) установлено, что основными компонентами являлись продукты нефтепереработки (α-метилстирол циклогептан и др.), сложные эфиры (октиловый эфир гептановой кислоты, пропиловый эфир гептановой кислоты, гептиловый эфир гептановой кислоты, 2-этилгексильный эфир пентановой кислоты и др.), коррозион-

ный ингибитор (N-фенил-1-нафталинамин-), антиоксиданты (*трет*-октилдифениламин; 4-октил-N-(4-октилфенил)-бензоламин) и другие присадки.

Компоненты данного масла также были сгруппированы на 8 указанных выше групп.

Прогрев масла МС-8П проводился при температуре 135 °С в течение 10, 20, 50 и 100 ч. Было определено, что уже после прогрева масла в течение 10 ч при температуре 135 °С компонентный состав значительно изменился (рис. 4). Увеличилось содержание компонентов группы 1 и снизилось содержание групп 2–4, 6 и 7 (при этом компоненты групп 3 и 4 после 20 ч прогрева почти исчезли). Содержание групп 5 и 8 изменилось незначительно.

Установлено, что в результате термической конверсии в течение 10 ч при 135 °С в авиационном масле МС-8П образовались сложно разделяемые полимеры. Основными компонентами после прогрева являлись продукты нефтепереработки (тридекан; 1-метил-нафталин; (1-метилэтил)-циклогексан; 1,2,3,4-тетрагидро-1,1,6-триметил-нафталин; 2,6,10-триметилдодекан; циклогексакан; 3-метилгексадекан и др.), сложные эфиры (бутилгептадециловый эфир сернистой кислоты; 2-пропилтетрадециловый эфир сернистой кислоты; гексадециловый эфир трихлоруксусной кислоты и др.), коррозионный ингибитор (N-фенил-1-нафталинамин-), пластификатор (диоктиладипинат), антиоксиданты (4-октил-N-(4-октилфенил)-бензоламин) и другие присадки.

Т а б л и ц а 3. Компонентный состав исходного авиационного масла МС-8П

Table 3. Component composition of the original aviation oil MS-8P

Соединение	%
Пропиловый эфир гептановой кислоты	0,0259
Пропиловый эфир гептановой кислоты	0,0833
2-этилгексиловый эфир пентановой кислоты	0,0175
2-метил-5-ундеканон	0,0308
Октиловый эфир гептановой кислоты	0,2709
2-тридеканон	0,0246
Гексиловый эфир октановой кислоты	0,2133
Бутилкаприлат	0,1955
2-метилбутиловый эфир гептановой кислоты	0,2735
Пентиловый эфир декановой кислоты	0,2191
Изобутил-2-этилгексиловый эфир угольной кислоты	0,103
2-гексанолдеканоат	0,2228
Циклогептан	0,0543
2-этилгексиловый эфир декановой кислоты	0,0947
<i>Транс</i> -2-гексенилвалерат	3,6266
N-фенил-1-нафталинамин	7,8649
8-фенилхинолин-6-карбоксальдегид	0,1417
Гексилониловый эфир сернистой кислоты	1,0896
<i>Трет</i> -октилдифениламин	0,2249
3-С-[1-(карбоксиокси)этил]-4,6-дидезокси-3,3-метил внутримолекулярный эфир (S)-β-D-рибо-гексопиранозид	0,0428
Додецилгексиловый эфир сернистой кислоты	0,0852
Трифенилфосфат	3,1154
1,5-дигидро-4-метокси-2Н-пиррол-2-он	2,5888
(R)-2-(1,1-диметилэтил)-6-метил-4Н-1,3-диоксин-4-он	0,1066
(1-метилэтил)фенилдифениловый эфир фосфорной кислоты	3,391
1,2,3,4-тетрагидро-5,7-диметилнафталин	0,0284
Капролактам	6,221
Октиловый эфир 3-фенилпропилбутилфосфоновой кислоты	0,1099
Винилтриэтилсилан	0,0805
3-метил-2-(4-метил-3-нитрофенил)-индол	0,0837
Метсуксимид	0,6152
N-этил-сфинганин метанборонат	0,6431
Валериановый ангидрид	2,1701
1,2,3,4-тетрагидро-1,5-диметил-нафталин	0,6845

Окончание табл. 3

Соединение	%
1-(2,3-дигидро-1H-инден-5-ил)-этанон	0,0793
N-диметиламинометилметиловый эфир (RS)-4-амино-3-(4-хлорфенил)бутановой кислоты	0,0586
α -метилстирол	0,4407
1-(1-метилэтил)-3-(1-метилэтил)-бензол	0,2418
3-нитрофениловый эфир гептановой кислоты	0,2656
цис-1,1,2,6-тетраметилсилациклогексан	9,7239
(+)-транс-3,4-Диметил-2-фенилтетрагидро-1,4-тиазин	0,0559
4-октил-N-(4-октилфенил)-бензоламин	2,7147
1-(3-этокси-2-метил-акрилоил)-3-(2-гидрокси-этил)-мочевина	32,8539
N-диметиламинометилбутиловый эфир DL-3-аминоизомасляной кислоты	4,447
2,2-диметил-, 2,2-бис[(2,2-диметил-1-оксопропокси)метил]-1,3-пропандиоловый эфир пропановой кислоты	0,8333
5,6,12,13-тетрагидро-5,12-дифенил-дибенз[a,h]антрацен	0,1026
Метиловый эфир 2-аллилпент-4-еновой кислоты	8,9115
3,4-диметил-5-гидрокси-изоксазол	0,6167
Дихлордецилметилсилан	2,8797
1-метокси-3-метил-2-гексен	0,6798
Ангидрид гептановой кислоты	0,3514

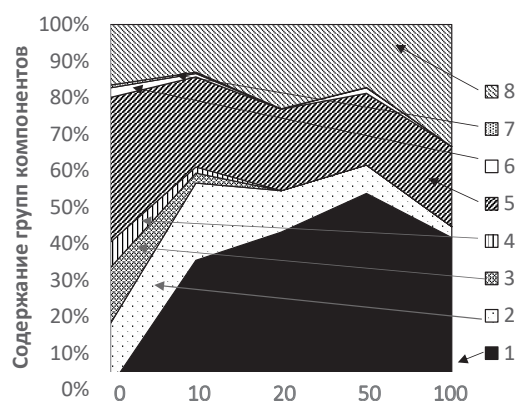


Рис. 4. Динамика изменения групп масла МС-8П

Fig. 4. Dynamics of changes of MS-8P oil groups

ческой конверсии минерального авиационного масла МС-8П наблюдалось выпадение нерастворимых высокомолекулярных соединений (полимеров), в результате чего хроматограммы образцов представляли собой неразделенные пики (см. рис. 1, f).

Проведенные исследования изменения химического состава авиационных масел показали, что термические нагрузки оказывают негативное влияние на их термостабильность.

Полученные результаты могут быть полезны при моделировании работы узлов трения авиационных двигателей и прогнозировании изменений показателей качества масел в условиях их эксплуатации.

Список использованных источников

1. Study on rheological properties of aviation lubricating oil under conditions of heavy load, high speed, and high temperature / Z. Li, X. Zhao, D. Zheng [et al.] // *Industrial Lubrication and Tribology*. – 2019. – Vol. 71, № 4. – P. 525–531. <https://doi.org/10.1108/ILT-09-2018-0345>
2. Study of thermal-oxidative stability of synthetic oils for aircraft gas turbine engines and helicopter gearboxes / L. S. Yanovskiy, V. M. Ezhov, M. A. Ilina, K. V. Sharanina // *Мир нефтепродуктов*. – 2021. – № 2. – С. 52–56. <https://doi.org/10.32758/2071-5951-2021-0-2-52-56>
3. Dellis, P. S. The automated spectrometric oil analysis decision taking procedure as a tool to prevent aircraft engine failures / P. S. Dellis // *Tribology in Industry*. – 2019. – Vol. 41, № 2. – P. 292–309. <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.02.15>
4. Trendak, M. Influence of oil service life on selected performance parameters of an aircraft piston engine / M. Trendak, J. Czarnigowski // *Combustion Engines*. – 2023. – Vol. 194, № 3. – P. 78–83. <https://doi.org/10.19206/CE-168334>

В результате хроматографического анализа авиационного масла МС-8П, выдержанного в течение 20 ч при 135 °С, установлено, что основными компонентами являлись продукты нефтепереработки (тетрадекан; ундекан, 17-пентатриаконтен и др.), сложные эфиры (*трис*(3-метилфенил) эфир) фосфорной кислоты, октакозилгептафторбутират, дотриаконтилтрифторацетат и др.), одноатомные спирты (*n*-тетракозанол-1 и др.) и другие добавки.

При нагреве масла МС-8П в течение 50 ч состав его почти не менялся относительно масла, прогретого в течение 20 ч.

Было определено, что повышение температуры применяемого масла привело к снижению содержания низкомолекулярных соединений, увеличению – веществ с большей молекулярной массой. При термической конверсии минерального авиационного масла МС-8П наблюдалось выпадение нерастворимых высокомолекулярных соединений (полимеров), в результате чего хроматограммы образцов представляли собой неразделенные пики (см. рис. 1, f).

5. Диагностика авиационных двигателей путем оценки металлической загрязненности масел / К. И. Грядун, А. Н. Козлов, М. Л. Немчиков, И. С. Мельникова // Высокие технологии гражданской авиации. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 35–44. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2019-22-3-35-44>.
6. Determination of service life of aviation oils / V. G. Kuznetsov, G. T. Novosartov, A. I. Echin [et al.] // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 1985. – Vol. 21. – P. 596–598. <https://doi.org/10.1007/BF00730134>
7. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть 1 / В. А. Алтунин, К. В. Алтунин, М. Р. Абдуллин [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2021. – Т. 13, № 12. – С. 530–542. <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-12-530-542>
8. Проблемы систем смазки авиационных двигателей / В. А. Алтунин, К. В. Алтунин, М. В. Львов [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2021. – Т. 13, № 8. – С. 357–384. <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-8-357-384>
9. Экспериментальная установка для исследования влияния электростатических полей на теплообмен и процесс осадкообразования в моторном авиационном масле при его вынужденной конвекции / В. А. Алтунин, М. В. Львов, А. А. Щиголов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 7. – С. 113–123. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-113-123>
10. Термоконтверсия авиационных масел / Е. А. Шапорова, С. В. Василевич, С. О. Стойко, В. В. Щур // Научный вестник МГТУ ГА. – 2023. – Т. 26, № 5. – С. 65–80. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2023-26-5-65-80>
11. Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторного авиационного масла марки MC-20 / В. А. Алтунин, М. В. Львов, А. А. Юсупов [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – № 6. – С. 1–20. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2285>
12. Johnson, D. W. Turbine engine lubricant and additive degradation mechanisms / D. W. Johnson // Aerospace Engineering / ed. G. Dekoulis. – IntechOpen, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82398>
13. Термическое разложение основы авиационного синтетического смазочного масла / Nan Wu, Zhimin Zong, Yiwei Fei, Jun Ma [et al.] // Нефтехимия. – 2018. – Т. 58, № 2. – С. 208–214. <https://doi.org/10.7868/S0028242118020132>
14. Johnson, D. W. Turbine engine lubricant and additive degradation mechanisms / D. W. Johnson // Recent Progress in Some Aircraft Technologies / ed. R. K. Agarwal. – IntechOpen, 2016. <https://doi.org/10.5772/62394>
15. Исследование влияния структуры сложнэфирных основ на термоокислительную стабильность масел / Б. П. Тонконогов, Л. Н. Багдасаров, К. А. Попова, С. С. Агабеков // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61, вып. 2. – С. 73–79. <https://doi.org/10.6060/tcct.20186102.5598>
16. Смазочные масла для турбовальных двигателей и редукторов вертолетов / Л. С. Яновский, В. М. Ежов, А. А. Молоканов, К. В. Шаранина [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – № 11. – С. 16–20.
17. Thermal Degradation of Aviation Synthetic Lubricating Base Oil / N. Wu, Z. Zong, Y. Fei [et al.] // Petroleum Chemistry. – 2018. – Vol. 58, № 3. – P. 250–257. <https://doi.org/10.1134/S0965544118030179>
18. Зиновьев, В. Е. Обоснование возможности и целесообразности применения мобильного оборудования для регенерации отработанных гидравлических масел наземных транспортно-технологических средств / В. Е. Зиновьев, Ю. С. Зиновьева // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 2. – С. 19–27.
19. A comparison of fresh and used aircraft oil for the identification of toxic substances linked to aerotoxic syndrome / D. Megson, X. Ortiz, K. J. Jobst [et al.] // Chemosphere. – 2016. – Vol. 158. – P. 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.062>
20. Коагуляция и ультрафильтрация: гибридный процесс очистки отработанных масел / С. В. Федосов, А. В. Маркелов, А. В. Соколов, Ю. П. Осадчий // Мембраны и мембранные технологии. – 2022. – Т. 12, № 5 – С. 341–350. <https://doi.org/10.31857/S2218117222050054>
21. Авиационное масло MC-8П // Масла и смазки для вашего бизнеса. – URL: <https://profi-oil.pro/ru/aviatsionnoe-maslo-ms-8p/> (дата обращения: 19.10.2023).
22. Авиамасла. – URL: <https://expresoil.ru/aviamasla> (дата обращения: 19.10.2023).
23. TurbonyOil 98. – URL: <https://trast-aero.com/ru/catalog/Masla-i-smazki/TURBONIKOL-98.html> (дата обращения: 19.10.2023).
24. NYCO TURBONYCOIL 600. – URL: <https://www.petromineral.ru/katalog/nyco/masla-dlya-gtd-dlya-aviatsionnoy-promyshlennosti/nyco-turbonycoil-600.html> (дата обращения: 19.10.2023).

References

1. Li Z., Zhao X., Zheng D., Wang T., Gu L., Wang L. Study on rheological properties of aviation lubricating oil under conditions of heavy load, high speed, and high temperature. *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 71, no. 4, pp. 525–531. <https://doi.org/10.1108/ILT-09-2018-0345>
2. Yanovskiy L. S., Ezhov V. M., Ilina M. A., Sharanina K. V. Study of thermal-oxidative stability of synthetic oils for aircraft gas turbine engines and helicopter gearboxes. *World of Oil Products the Oil Companies Bulletin*, 2021, no. 2, pp. 52–56. <https://doi.org/10.32758/2071-5951-2021-0-2-52-56>
3. Dellis P. S. The automated spectrometric oil analysis decision taking procedure as a tool to prevent aircraft engine failures. *Tribology in Industry*, 2019, vol. 41, no. 2, pp. 292–309. <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.02.15>
4. Trendak M., Czarnigowski J. Influence of oil service life on selected performance parameters of an aircraft piston engine. *Combustion Engines*, 2023, vol. 194, no. 3, pp. 78–83. <https://doi.org/10.19206/CE-168334>
5. Gryadunov K. I., Kozlov A. N., Nemchikov M. L., Mel'nikova I. S. Aviation engines diagnostics by estimating the metal contamination in oils. *Civil Aviation High Technologies*. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 35–44 (in Russian). <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2019-22-3-35-44>

6. Kuznetsov V. G., Novosartov G. T., Echin A. I., Bakunin V. N. Determination of service life of aviation oils. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 1985, vol. 21, pp. 596–598. <https://doi.org/10.1007/BF00730134>
7. Altunin V. A., Altunin K. V., Abdullin M. R., Lvov M., Shchigolev A., Platonov E., Yusupov A., Aliev I., Yanovsky L., Yanovskaya M. Some ways to improve engines and power plants of the “NK” brand. Part 1. *Thermal processes in technology*, 2021, vol. 13, no. 12, pp. 530–542 (in Russian). <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-12-530-542>
8. Altunin V., Altunin K., Lvov M., Shchigolev A., Aliyev I., Yanovskaya M. Problems of lubrication systems for aircraft engines. *Thermal processes in technology*, 2021, vol. 13, no. 8, pp. 357–384 (in Russian). <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-8-357-384>
9. Altunin V. A., Lvov M. V., Shchigolev A. A., Yusupov A. A., Yanovskaya M. L. Experimental installation for the study of the influence of electrostatic fields on heat exchange and the process of sedimentation in motor aviation oil with its forced convection. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 113–123 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-113-123>
10. Shaporova E. A., Vasilevich S. V., Stoiko S. O., Shchur V. V. Thermal conversion of aviation oils. *Civil Aviation High Technologies*, 2023, vol. 26, no. 5, pp. 65–80 (in Russian). <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2023-26-5-65-80>
11. Altunin V. A., Lvov M. V., Yusupov A. A., Shchigolev A. A., Pukachev I. R., Yanovskaya M. L. Results of experimental studies of thermal processes under conditions of forced convection of MS-20 aviation engine oil. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, no. 6, pp. 1–20 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2285>
12. Johnson D. W. Turbine engine lubricant and additive degradation mechanisms. Dekoulis G. (ed.). *Aerospace Engineering*. IntechOpen, 2018. <https://doi.org/10.5772/intech-open.82398>
13. Nan Wu, Zhimin Zong, Yiwei Fei, Jun Ma, Feng Guo. Thermal decomposition of aviation synthetic lubricating oil base. *Petrochemistry*, 2018, vol. 58, no. 2, pp. 208–214 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0028242118020132>
14. Johnson D. W. Turbine engine lubricant and additive degradation mechanisms. Agarwal R. K. (ed.) *Recent Progress in Some Aircraft Technologies*. IntechOpen, 2016. <https://doi.org/10.5772/62394>
15. Tonkonogov B. P., Bagdasarov L. N., Popova K. A., Agabekov S. S. Study of the influence of the structure of ester bases on the thermal-oxidative stability of oils. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = ChemChemTech*, 2018, vol. 61, iss. 2, pp. 73–79 (in Russian). <https://doi.org/10.6060/tcct.20186102.5598>
16. Yanovsky L. S., Ezhov V. M., Molokanov A. A., Sharanina K. V., Kirsanov A. V. Lubricating oils for turboshaft engines and helicopter gearboxes. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmkh = Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2012, no. 11, 16–20 (in Russian).
17. Wu N., Zong Z., Fei Y., Ma J., Guo F. Thermal Degradation of Aviation Synthetic Lubricating Base Oil. *Petroleum Chemistry*, 2018, vol. 58, no. 3, pp. 250–257. <https://doi.org/10.1134/S0965544118030179>
18. Zinovev V. E., Zinovieva J. S. Substantiation of the possibility and expediency of using mobile equipment for the regeneration of spent hydraulic oils of ground transportation and technological vehicles. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2022, no. 2, pp. 19–27 (in Russian).
19. Megson D., Ortiz X., Jobst K. J., Reiner E. J., Mulder M. F. A., Balouet J.-C. A comparison of fresh and used aircraft oil for the identification of toxic substances linked to aerotoxic syndrome. *Chemosphere*, 2016, vol. 158, pp. 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.062>
20. Fedosov S. V., Markelov A. V., Sokolov A. V., Osadchy Yu. P. Coagulation and ultrafiltration: a hybrid process for waste oil purification. *Membranes and membrane technologies*, 2022, vol. 12, no. 5, pp. 341–350 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2218117222050054>
21. *Aviation oil MS-8P. Oils and lubricants for your business*. Available at: <https://profi-oil.pro/ru/aviatsionnoe-maslo-ms-8p/> (accessed 19 October 2023) (in Russian).
22. *Aviation oils*. Available at: <https://expresoil.ru/aviamasla> (accessed 19 October 2023) (in Russian).
23. *Turbonycoil 98*. Available at: <https://trast-aero.com/ru/catalog/Masla-i-smazki/TURBONIKOL-98.html> (accessed: 19 October 2023) (in Russian).
24. *NYCO TURBONYCOIL 600*. Available at: <https://www.petromineral.ru/katalog/nyco/masla-dlya-gtd-dlya-aviatsionnoy-promyshlennosti/nyco-turbonycoil-600.html> (accessed 19 October 2023) (in Russian).

Информация об авторах

Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Шапорова Елена Анатольевна – кандидат химических наук, доцент кафедры. Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: elena.telushenko@gmail.com

Стойко Сергей Олегович – начальник центра. Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sergey_14_95@mail.ru

Information about the authors

Vasilevich Siarhei V. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. Belarusian State Aviation Academy (77, Uborevich Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Shaporova Elena A. – Ph. D. (Chemical), Associate Professor of the Department. Belarusian State Aviation Academy (77, Uborevich Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: elena.telushenko@gmail.com

Stoiko Sergey O. – Head of the Center. Belarusian State Aviation Academy (77, Uborevich Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey_14_95@mail.ru