

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-18-28

**Метод оценки антинагарных свойств масел для двигателей
беспилотных летательных аппаратов**

**С.А. Криушин¹, М.В. Селезнев², Д.А. Маньшев¹, А.Н. Зайцева¹,
А.В. Иванов¹**

¹ *ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», г. Москва, Россия*

² *Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: На сегодняшний день в России активно развивается разработка и производство беспилотных летательных аппаратов, что обусловлено сравнительно меньшей стоимостью, малыми размерами, отсутствием угрозы жизни пилота, скрытностью, автономностью, мобильностью по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами. При этом в указанных летательных аппаратах наибольшее распространение получили двухтактные бензиновые двигатели, обладающие более высокой литровой мощностью, простотой конструкции и меньшими затратами в производстве при их сравнении с четырехтактными бензиновыми двигателями. В указанных двигателях отсутствует классическая система смазки, поэтому масло подается для смазывания цилиндропоршневой группы в виде топливомасляной смеси, которая сгорает в ходе рабочего процесса вместе с топливом. При этом на деталях цилиндропоршневой группы откладываются высокотемпературные отложения – нагары и лаки. Образование нагара снижает мощность двигателя, срок его службы и экономичность, вызывает увеличение эксплуатационных расходов. Одним из вариантов решения указанной проблемы является применение моторных масел с высоким уровнем антинагарных свойств. Однако в настоящее время отсутствует метод оценки антинагарных свойств масел для двигателей беспилотных летательных аппаратов. На основании описанного химмотологического процесса разработан указанный метод, выбрано испытательное оборудование (установка Panel Coking Test Apparatus) и установлены режимы испытаний (температура пластины – 290 °С, температура масла в картере – 100 °С, скорость разбрызгивания – 800 об/мин, время испытания – 4 ч), позволяющие оценивать и ранжировать моторные масла для двигателей беспилотных летательных аппаратов по антинагарным свойствам в лабораторных условиях. По результатам испытаний установлено, что масло Motul Kart Grand Prix 2T обладает наименьшей склонностью к нагарообразованию среди испытанных образцов моторных масел. Результаты сравнения лабораторных и стендовых испытаний масел Новойл-ДД и Motul Kart Grand Prix 2T показывают высокую степень сходимости.

Ключевые слова: антинагарные свойства, беспилотные летательные аппараты, двухтактные бензиновые двигатели, метод оценки, моторные масла, химмотологический процесс.

Для цитирования: Криушин С.А. Метод оценки антинагарных свойств масел для двигателей беспилотных летательных аппаратов / С.А. Криушин, М.В. Селезнев, Д.А. Маньшев, А.Н. Зайцева, А.В. Иванов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 2. С. 18–28. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-18-28

Method for assessing the anti-carbon properties of unmanned aerial vehicle engines

S.A. Kriushin¹, M.V. Seleznev², D.A. Manshev¹, A.N. Zaitseva¹,
A.V. Ivanov¹

¹FAO "25 State Research Institute of Chemmotology of the Ministry of Defense of the
Russian Federation", Moscow, Russia

²Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: At present, the process of design and production of unmanned aerial vehicles has been making progress in Russia, which is caused by the relatively low cost, small size, absence of life hazard to a pilot, stealth, self-sustainability, mobility compared to manned aircraft. At the same time, two-stroke gasoline engines, possessing a higher power-to-volume ratio, unsophisticated design, and lower production costs in comparison with four-stroke gasoline engines, have become widely used in these aircraft. These engines lack a conventional lubrication system, so the oil is supplied to lubricate the cylinder-piston group in the form of a fuel-oil mixture, which burns during the operating procedure together with the fuel. In this case, high-temperature deposits such as carbon and lacquer are accumulated on the parts of the cylinder-piston group. The formation of carbon reduces the engine power, its service life and efficiency, causes an increase in operating costs. One of the solutions to this problem is the use of motor oils with a high level of anti-carbon properties. However, currently a method for assessing the anti-carbon oil properties for unmanned aerial vehicle engines is not available. In accordance with the described chemmotological process, the method was developed, the test equipment (Panel Coking Test Apparatus) was selected and the test modes were established (plate temperature – 290°C, oil temperature in the crankcase – 100°C, spray speed – 800 rev/min, test time – 4 h), allowing you to evaluate and rank motor oils for unmanned aircraft engines based on the anti-carbon properties in the laboratory. As tested, Motul Kart Grand Prix 2T oil has the least tendency for carbonization among tested motor oil samples. Laboratory and bench tests of Novoyl-DD and Motul Kart Grand Prix 2T oils show a high degree of convergence.

Key words: anti-carbon properties, unmanned aerial vehicles, two-stroke gasoline engines, evaluation method, motor oils, chemmotological process.

For citation: Kriushin, S.A., Seleznev, M.V., Manshev, D.A., Zaitseva, A.N., Ivanov, A.V. (2023). Method for assessing the anti-carbon properties of unmanned aerial vehicle engines. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 2, pp. 18–28. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-18-28

Введение

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений развития авиации признано создание беспилотных авиационных комплексов различного назначения, основными преимуществами которых, по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами, являются относительно небольшие массогабаритные характеристики; высокая мобильность и более низкая стоимость. Указанные преимущества обуславливают применение в последнее десятилетие беспилотных летательных аппаратов (далее – БЛА) для решения широкого спектра выполняемых задач [1–4].

Авторами [5–8] отмечается, что наиболее массовыми типами двигателей в Российской Федерации, устанавливаемых на БЛА, явля-

ются зарубежные поршневые двухтактные бензиновые двигатели мощностью до 8 л. с. и четырехтактные двигатели мощностью 1,5 л. с. В указанных двигателях отсутствует классическая система смазки, поэтому масло подается для смазывания цилиндропоршневой группы в виде топливомасляной смеси, которая сгорает в ходе рабочего процесса вместе с топливом. При этом на деталях цилиндропоршневой группы откладываются высокотемпературные отложения – нагары и лаки (рис. 1). Образование нагара снижает мощность двигателя, срок его службы и экономичность, вызывает увеличение эксплуатационных расходов. Отложения могут являться причиной перегрева головок поршней и цилиндров, ухудшения процесса сгорания топлива, повышения требований к антидетонационным свойствам топлива. Также образование нагара нарушает работу электродов



Рис. 1. Вид поршня бензинового двигателя Saito GI-36¹ после эксплуатации на масле с низким уровнем антинагарных свойств

Fig. 1. Type of Saito GI-36¹ gasoline engine piston after the operation using oil with a low level of low anticarbon properties

свечей зажигания, оказывает абразивное действие на трущиеся детали двигателя, являясь причиной задира [9, 10].

Надежная эксплуатация указанных двигателей в условиях воздействия различных факторов (температур, давлений, скоростей скольжения поверхностей трения) обеспечивается в том числе применением моторных масел для двухтактных бензиновых двигателей (далее – ДТБД) с высоким уровнем антинагарных свойств.

Для оценки антинагарных свойств моторных масел для ДТБД используют различные экспериментальные методы, в том числе косвенные. Согласно ГОСТ 4.24 показателями склонности моторного масла к высокотемпературным отложениям и образованию нагара являются: количество отложений на установке НАМИ-1, мг (ГОСТ 20994), коксусность, % (ГОСТ 19932) и зольность, % (ГОСТ 1461). Также в России известны методы, реализованные на одноцилиндровой установке ИТ9-3, ИМЗ-2ТД-10. За рубежом наибольшее распространение получили методы JASO M343-92, JASO M341-92 и CEC L-79-T97 [11–13]. Однако недостатками косвенных методов является их низкая информативность и сходимость результатов испытаний масел с результатами, полученными в условиях реальной эксплуатации двухтактных двигателей, а стендовые методы требуют высокой продолжительности испытаний, большего объема образца масла и материальных затрат. Это вызывает большие сложно-

сти при необходимости оперативной оценки уровня антинагарных свойств масел для ДТБД. Поэтому актуальным является разработка высокоинформативного метода оценки антинагарных свойств моторных масел для ДТБД, учитывающего конструктивные особенности двухтактного бензинового двигателя и основные физико-химические свойства масел.

Методы и методология исследований

Для достижения указанной цели необходимо обосновать условия подобию процесса образования нагара в ДТБД с применением физического и математического моделирования химмотологической системы «моторное масло – двигатель – условия эксплуатации».

С целью оценки склонности моторных масел к нагарообразованию методом подобию выбран четырехтактный бензиновый двигатель для беспилотных летательных аппаратов с воздушным охлаждением Saito FG-36 [14, 15], работающий на топливомасляной смеси, образование нагара в котором в ходе эксплуатации является наиболее критичным фактором выхода его из строя. Выбор именно этого двигателя также обусловлен его комплектацией БПЛА «Орлан-10» и большим соотношением масло : бензин (1 : 25). При этом температура поверхности головки поршня составляет около 300 °С, а площадь поверхности головки поршня – 0,01256 м² [16].

Для физического моделирования использовано приближенное подобие, заключающееся в обосновании условий подобия процесса и воспроизведении постоянства определяющих критериев подобия в модели и объекте [17, 18]. Были применены теория подобия и анализ размерностей, чтобы определить функциональную зависимость и рассчитать необходимые режимы разрабатываемого лабораторного метода. С помощью критических параметров процесс образования нагара в химмотологической системе «дно поршня двухтактного двигателя – моторное масло» в материальной точке 1 (рис. 2) можно описать следующим уравнением:

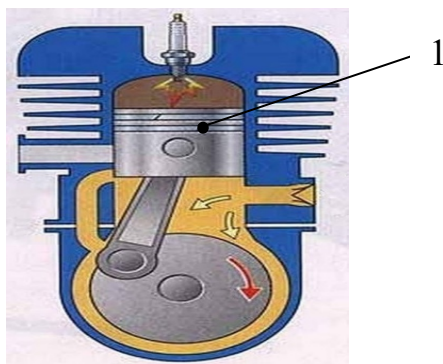


Рис. 2. Расположение материальной точки 1 в химмотологической системе «дно поршня двухтактного двигателя – моторное масло»

Fig. 2. Location of a material point 1 in the chemmotological system “piston bottom of the two-stroke engine – motor oil”

$$m_{\text{нагар}} = F(\Phi_k, \Phi_y, \Phi_{\text{сост. масла}}), \quad (1)$$

где $m_{\text{нагар}}$ – масса образующегося нагара на 1 м^3 масла, г/м^3 ; Φ_k – фактор конструкции, учитывающий влияние конструкции камеры сгорания и двигателя; Φ_y – фактор условий эксплуатации, учитывающий влияние условий в камере сгорания; $\Phi_{\text{сост. масла}}$ – фактор, учитывающий влияние состава и совокупности физико-химических свойств масла.

Влияние каждого фактора может быть описано следующими параметрами [19]:

$$m_{\text{нагар}} = \varphi(S, w, \theta, \tau, \nu, A) = 0, \quad (2)$$

где S – площадь головки поршня, м^2 ; w – линейная скорость движения материальной точ-

ки, м/с ; θ – температура нагретой поверхности головки поршня, К ; τ – время, с ; ν – кинематическая вязкость масла, $\text{м}^2/\text{с}$; A – зольность масла, г/м^3 .

Процесс описывают $n = 6$ физических размерных величин. В качестве переменных с независимыми размерностями выберем S , θ , ν , A , которые включают в себя четыре первичные единицы (температуры – θ [K], длины – L [м], массы – M [кг] и времени – T [с]). Размерности независимых переменных:

$$[S] = [\theta]^0 \times [L]^2 \times [M]^0 \times [T]^0, \quad (3)$$

$$[\theta] = [\theta]^1 \times [L]^0 \times [M]^0 \times [T]^0, \quad (4)$$

$$[\nu] = [\theta]^0 \times [L]^2 \times [M]^0 \times [T]^{-1}, \quad (5)$$

$$[A] = [\theta]^0 \times [L]^{-3} \times [M]^1 \times [T]^0. \quad (6)$$

Зависимыми переменными будут w и τ , а их размерности будут иметь вид

$$[w] = [\theta]^0 \times [L]^1 \times [M]^0 \times [T]^{-1}, \quad (7)$$

$$[\tau] = [\theta]^0 \times [L]^0 \times [M]^0 \times [T]^1. \quad (8)$$

Матрица коэффициентов степеней размерностей независимых величин:

$$\begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 \\ 0 & -3 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Поскольку определитель матрицы $\Delta = -2$ отличен от нуля, количество независимых величин и сами величины выбраны правильно.

Выразим безразмерные комбинации исходных физических величин π_1 и π_2 делением зависимых переменных w , θ_1 и τ на независимые переменные в некоторых степенях a , b , c , d (с соответствующими индексами):

$$\pi_1 = \frac{w}{\theta^a S^b \nu^c A^d} \quad (10)$$

$$\pi_2 = \frac{\tau}{\theta^a S^b \nu^c A^d} \quad (11)$$

Найдем показатели степеней сравнением размерностей при всех первичных единицах из условия безразмерности.

При θ :

$$0 = a_1; 0 = a_2. \quad (12)$$

При L :

$$1 = 2b_1 + c_1 - 3d_1; 0 = 2b_2 + 2c_2 - 3d_2. \quad (13)$$

При M :

$$0 = d_1; 0 = d_2. \quad (14)$$

При T :

$$-1 = -c_1; 1 = -c_2. \quad (15)$$

Совместно решаем полученные уравнения:

$$\begin{aligned} a_1 = 0; b_1 = -0,5; c_1 = 1; d_1 = 0, \\ a_2 = 0; b_2 = 1; c_2 = -1; d_2 = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляем полученные показатели степеней в выражения для безразмерных комбинаций исходных физических величин:

$$\pi_1 = \frac{w\sqrt{S}}{v}, \quad (17)$$

$$\pi_2 = \frac{\tau v}{S}. \quad (18)$$

Разделим π_1 и π_2 чтобы получить критерий подобия K для упрощения дальнейших расчетов:

$$K = \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{wS^{1.5}}{v^2\tau}. \quad (19)$$

Таким образом, исследуемый процесс образования нагара характеризуется безразмерным критерием:

$$m_{\text{нагар}} = F(K) = 0. \quad (20)$$

Исследуемый химмотологический процесс характеризуется критерием K , который представляет собой обобщенную характеристику, связывающую параметр конструкции – площадь головки поршня S [м²], на которой

образуются отложения, параметр условий эксплуатации – скорость движения рассматриваемой материальной точки на поршне w [м/с] и время работы двигателя τ [с], параметр влияния физико-химических свойств масла – кинематическая вязкость ν [м²/с].

Для обеспечения подобия химмотологического процесса необходимо соблюдение условий однозначности: в натурном двигателе и модели используется одно и то же масло и равенство температур поверхности головки поршня и модельной установки:

$$\frac{\theta_{\text{модель}}}{\theta_{\text{двигатель}}} = 1; \theta_{\text{модель}} = \theta_{\text{двигатель}} = idem, \quad (21)$$

где $\theta_{\text{модель}}$ – температура поверхности модельной установки, °С; $\theta_{\text{двигатель}}$ – температура поверхности головки поршня двигателя, °С.

Реализуется подобие по функциональному признаку: приведенный критерий и его численное значение обеспечивает протекание химмотологического процесса в физической модели в том же направлении, что и в реальной системе, при этом физическая модель выполняет преобразующую функцию, аналогичную функции двигателя.

Выбор лабораторного оборудования осуществлялся исходя из критерия, что оно должно максимально приближено соответствовать процессам физической модели, которые происходят с маслом в реальном двигателе, включая механизм протекания химмотологического процесса.

Поэтому для разработки метода оценки антинагарных свойств масел была использована специальная малогабаритная установка для определения склонности масел к коксованию Panel Coking Test Apparatus производителя Koehler (рис. 3). Указанное испытательное оборудование используется в стандартной методике оценки склонности авиационных масел к высокотемпературным отложениям по СТО 08151164-0222-2017.

Установка состоит из распылительной камеры (картера), изготовленной из нержавеющей стали, смонтированной на опорной плите. Внутри камеры установлен патронный нагре-

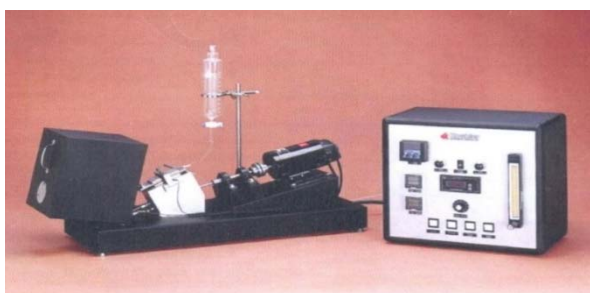


Рис. 3. Общий вид установки Panel Coking Test Apparatus

Fig. 3. General view of Panel Coking Test Apparatus

ватель для нагрева испытуемого масла и термомпара для измерения температуры. Также внутри камеры установлен вал, на котором закреплены ряды проволок для разбрызгивания масла. Вал приводится в движение электродвигателем, частота и скорость вращения устанавливаются и поддерживаются электронным блоком управления. Распылительная камера закрыта крышкой. Через крышку вводится трубка, соединяющая распылительную камеру с резервуаром испытуемого масла. Также в крышке предусмотрено окно, в которое устанавливается рабочая алюминиевая пластина с несквозным отверстием для термомпары чтобы измерять температуру в течение испытания. Пластина прижимается к краям окна электрическим нагревателем, обеспечивающим нагрев пластины до заданной температуры. Положение пластины и нагревателя закрепляется посредством струбцины [20].

Для проведения эксперимента подготовленную алюминиевую пластину устанавливают рабочей поверхностью к разбрызгивателю и вставляют в нее термомпару. Температуру пластины доводят до заданной. Параллельно испытуемое масло нагревают до рабочей температуры и заливают в картер.

После установления заданных температур пластины и масла, включают электродвигатель, приводящий в движение вал с проволоками. По истечении времени испытания электродвигатель выключают и пластину снимают пинцетом, не прикасаясь к отложениям. Пластину охлаждают до комнатной температуры и промывают окунанием в фарфоровую чашу с нефрасом для удаления следов масла

с поверхности. Далее пластину сушат на воздухе до постоянной массы и взвешивают. Массу отложений на пластине рассчитывают по разности масс до и после испытания. Результат эксперимента вычисляют как среднее арифметическое значение двух параллельных испытаний [21].

Исходя из зависимости массы образовавшихся высокотемпературных отложений от температур пластины, масла в картере и продолжительности испытания на установке Koehler Panel Coking Test Apparatus были установлены режимы испытания масел, представленные в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Параметры работы установки Koehler Panel Coking Test Apparatus
Operating parameters of Koehler Panel Coking Test Apparatus

Наименование показателя	Значение
Температура пластины, °C	290
Температура масла в картере, °C	100
Скорость разбрызгивания, об/мин	800
Время испытания, ч	4

Для проведения испытаний использовали моторные масла для малоразмерных двухтактных двигателей Новойл-ДД, Rolf Garden 2T, Лукойл мото 2T, Motul Kart Grand Prix 2T.

Результаты исследования

Результаты проведенного исследования по оценке антинагарных свойств различных масел представлены в табл. 2 и на рис. 4.

С целью определения соответствия результатов испытаний масел разработанным методом оценки антинагарных свойств с реальными условиями эксплуатации проведено сравнение результатов исследования моторных масел Новойл-ДД и Motul Kart Grand Prix 2T на специальном оборудованном стенде с ис-

Таблица 2
Table 2

Результаты испытаний моторных масел
по оценке антинагарных свойств
Test results of the motor oils based
on the anticarbon properties assessment

Наименование образца масла	Масса отложений, мг
Новойл-ДД	40,4
Rolf Garden 2T	31,7
Лукойл мото 2Т	17,4
Motul Kart Grand Prix 2T	10,4

пользованием малоразмерного авиационного поршневого бензинового двигателя Saito GI-36 в течение 50 часов при различных режимах работы и результатами, полученными в лабораторных условиях (рис. 5). Однако

вследствие неустойчивой работы двигателя на масле Новойл-ДД после 20 часов эксплуатации его испытания были завершены. Испытания на стенде проводились в составе топливомасляной смеси, изготовленной из автомобильного бензина АИ-92-К5 по ГОСТ 32513 и исследуемого образца масла в соотношении 1 : 30, в умеренной климатической зоне в условиях реального атмосферного давления, влажности и температуры окружающего воздуха. По окончании испытаний двигатель разбирался, а его детали цилиндро-поршневой группы визуально оценивались на наличие лака и нагара [9].

Обсуждение полученных результатов

По результатам исследования выявлено, что описанный химмотологический процесс, выбранное испытательное оборудование

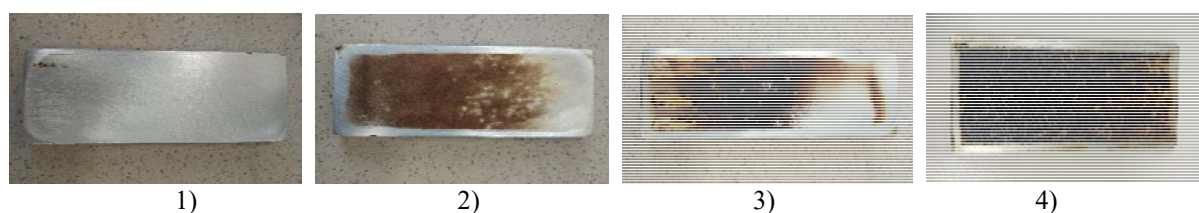


Рис. 4. Внешний вид пластин после испытаний разработанным методом:
1 – на масле Новойл-ДД; 2 – на масле Rolf Garden 2T; 3 – на масле Лукойл мото 2Т;
4 – на масле Motul Kart Grand Prix 2T

Fig. 4. Appearance of the plates after the tests by the developed method:
1 – on Novoyl-DD oil; 2 – on Rolf Garden 2T oil; 3 – on Lukoil motor 2T oil; 4 – on Motul Kart Grand Prix 2T oil



Рис. 5. Вид поршня бензинового двигателя Saito GI-36 после эксплуатации на масле:
1 – Новойл-ДД (20 часов); 2 – Motul Kart Grand Prix 2T (50 часов)

Fig. 5. Appearance of gasoline engine piston Saito GI-36 after oil operation:
1 – Novoyl-DD (20 hours); 2 – Motul Kart Grand Prix 2T (50 hours)

и установленные режимы испытаний позволяют оценивать и ранжировать моторные масла для двигателей беспилотных летательных аппаратов по антинагарным свойствам в лабораторных условиях.

Масло Motul Kart Grand Prix 2T обладает наименьшей склонностью к нагарообразованию среди испытанных образцов масел для двигателей беспилотных летательных аппаратов, что, по-видимому, связано с применением в компонентном составе указанного масла синтетической основы.

Результаты сравнения лабораторных и стендовых испытаний масел Новойл-ДД и Motul Kart Grand Prix 2T показывают высокую степень сходимости.

Заключение

Таким образом, для оценки антинагарных свойств моторных масел с целью их выбора для надежной эксплуатации двухтактных двигателей беспилотных летательных аппаратов предлагается использовать разработанный метод при следующих режимах испытаний: температура пластины – 290 °С, температура масла в картере – 100 °С, скорость разбрызгивания – 800 об/мин, время испытания – 4 часа. В качестве испытательного оборудования рекомендуется использовать установку Koehler Panel Coking Test Apparatus, параметры которой максимально соответствуют процессам физической модели, происходящим с маслом в реальном двигателе, включая механизм протекания химмотологического процесса. Однако в целях увеличения достоверности результатов испытаний, получаемых при использовании разработанного метода, следует осуществить накопление статистических данных по испытаниям моторных масел различного компонентного состава и определить корреляцию с другими методами оценки антинагарных свойств масел.

С целью снижения нагарообразования при эксплуатации двухтактных двигателей беспилотных летательных аппаратов рекомендуется использовать моторные масла, включающие синтетическую основу. Полученные

результаты испытаний подтверждают указанный вывод, поскольку масло Motul Kart Grand Prix 2T обладает наименьшей склонностью к нагарообразованию среди испытанных образцов.

Список литературы

1. Кузнецов Г.А. Беспилотные летательные аппараты с поршневыми двигателями. Компоновки и конструкции. М.: Спутник+, 2010. 194 с.
2. Синяткин Д.А., Божков А.Ю., Горчаков М.А. Создание многофункциональных беспилотных летательных аппаратов: пути решения проблемных вопросов // Военная мысль. 2018. № 10. С. 86–91.
3. Михайлов Д.А. Разработка в Израиле систем противодействия БЛА // Зарубежное военное обозрение. 2015. № 12. С. 85–86.
4. Тыщенко В.А. Исследования в области разработки масел для двухтактных бензиновых двигателей / В.А. Тыщенко, К.А. Овчинников, М.А. Жумлякова, М.С. Еремин, О.В. Галкина, С.А. Новиков, Ю.Н. Хорошев // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2014. № 12. С. 13–17.
5. Торхов Г.И. Двухтактные двигатели легких и сверхлегких летательных аппаратов. Пермь: Звезда, 2009. 263 с.
6. Иванов А.В., Криушин С.А., Селезнев М.В. Обоснование требований к маслу для двухтактных двигателей беспилотных летательных аппаратов // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. 2019. № 1. С. 116–121.
7. Панов В.В. Повышение эффективности двухтактных бензиновых двигателей внутреннего сгорания: дисс. ... докт. техн. наук. Владимир, 1995. 462 с.
8. Самусенко В.Д. Разработка методики оперативной оценки антизадирных свойств масел для двухтактных бензиновых двигателей: дисс. ... канд. техн. наук. М.: НИУ МГСУ, 2017. 102 с.
9. Маньшев Д.А. Исследование эксплуатационных свойств масла для малоразмерного поршневого авиационного двигателя / Д.А. Маньшев, А.В. Иванов, С.А. Криушин,

А.В. Чернышева, С.Г. Потупчик // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. 2020. № 59. С. 253–261.

10. Мещерин Е.М., Островская М.Е. Масла для двухтактных бензиновых двигателей. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1989. 72 с.

11. Воробьева Е.И. Исследование и разработка экологически улучшенного масла для двухтактных бензиновых двигателей: дисс. ... канд. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001. 91 с.

12. Чудиновских А.Л., Мещерин Е.М., Бартко Р.В. Прогнозирование склонности масел к образованию отложений в двухтактных бензиновых двигателях // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2014. № 8. С. 26–27.

13. Сафонов А.С., Ушаков А.И., Гришин В.В. Химмотология горюче-смазочных материалов. СПб.: НПИКЦ, 2007. 488 с.

14. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Пер. с англ. А.И. Демьяникова, под ред. Г.В. Анцева. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 312 с.

15. Грядунов К.И. Химмотология авиационных горюче-смазочных материалов: тексты лекций. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. 184 с.

16. Исаенко Ю.К. Разработка метода оценки и исследование противозадирных свойств масел с присадками на двухтактном карбюраторном двигателе: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1972. 139 с.

17. Пименов Ю.М. Планирование эксперимента в задачах химмотологии: учеб. пособие. СПб.: ВАТТ, 1994. 108 с.

18. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.

19. Спирин Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учеб. пособие для вузов / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурыкин, под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УИИЦ, 2015. 290 с.

20. Мойкин А.А. Разработка загущенного полусинтетического масла М-5з/20 АЭРО для авиационных поршневых четырехтактных бензиновых двигателей беспилотных летательных аппаратов / А.А. Мойкин, А.С. Мед-

жибовский, С.А. Криушин, М.В. Селезнев, Е.Н. Кириков // Мир нефтепродуктов. Научно-технический журнал. 2020. № 6. С. 44–47. DOI: 10.32758/2071-5951-2020-0-6-44-47

21. Гришин Н.Н., Середа В.В. Энциклопедия химмотологии. М.: Перо, 2016. 959 с.

References

1. Kuznetsov, G.A. (2010). Unmanned aircraft with piston engines. Layouts and designs. Moscow: Sputnik+, 194 p. (in Russian)

2. Sinyatkin, D.A., Bozhkov, A.Y., Gorchakov, M.A. (2018). Creation of multifunctional unmanned aerial vehicles: ways to solve problematic issues. *Voennaya Mysl'*, no. 10, pp. 86–91. (in Russian)

3. Mikhailov, D.A. (2015). Development of UAV counteraction systems in Israel. *Zarubezhnoye voyennoye obozreniye*, no. 12, pp. 85–86. (in Russian)

4. Tyschenko, V.A., Ovchinnikov, K.A., Zhumljakova, M.A., Eremin, M.S., Galkina, O.V., Novikov, S.A., Khoroshev, Yu.N. (2014). Research in the field of oils development for two-stroke gasoline engines. *World of Petroleum Products. Scientific and Technical Journal*, no. 12, pp. 13–17. (in Russian)

5. Torkhov, G.I. (2009). Two-stroke engines of light and ultralight aircraft. Permian: Zvezda, 263 p. (in Russian)

6. Ivanov, A.V., Kriushin, S.A., Seleznev, M.V. (2019). Substantiation of oil requirements for two-stroke engines of unmanned aerial vehicles. *Scientific Investigations of the 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of Russian Federation*, no. 1, pp. 116–121. (in Russian)

7. Panov, V.V. (1995). Increase of efficiency of two-stroke gasoline internal combustion engines: D. of Tech. Sc. Thesis. Vladimir, 462 p. (in Russian)

8. Samusenko, V.D. (2017). Development of a methodology for the operational evaluation of anti-bullying properties of oils for two-stroke petrol engines: Cand. of Tech. Sc. Thesis. Moscow: NIU MGSU, 102 p. (in Russian)

9. Manshev, D.A., Ivanov, A.V., Kriushin, S.A., Chernysheva, A.V., Potup-

chik, S.G. (2020). Performance study of motor oil intended for small-sized reciprocating aviation engine. *Scientific Investigations of the 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of Russian Federation*, vol. 59, pp. 253–261. (in Russian)

10. Meshcherin, E.M., Ostrovskaya, M.E. (1989). Oils for two-stroke gasoline engines. Moscow: TSNIITeneftekhimi, 72 p. (in Russian)

11. Vorobieva, E.I. (2001). Research and development of environmentally improved oil for two-stroke petrol engines: Cand. of Tech. Sc. Thesis. Moscow: RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 91 p. (in Russian)

12. Chudinovskikh, A.L., Meschcherin, E.M., Bartko, R.V. (2014). Forecasting of oils tendency to deposits formation in two-stroke gasoline engines. *World of Petroleum Products. Scientific and Technical Journal*, no. 8, pp. 26–27. (in Russian)

13. Safonov, A.S., Ushakov, A.I., Grishin, V.V. (2007). Chemmotology of fuel and lubricating materials. St. Petersburg: NPIKTs, 488 p. (in Russian)

14. Beard, R.W., McLain, T.W. (2012). Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. 2nd ed. Publisher: Princeton University Press, 320 p.

15. Gryadunov, K.I. (2021). Chemmotology of aviation fuel and lubricants: lecture texts. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, 184 p. (in Russian)

16. Isaenko, Y.K. (1972). Development of a method for evaluating and studying anti-seizure properties of oils with additives on a two-stroke carburetor engine: Cand. of Tech. Sc. Thesis. Moscow, 139 p. (in Russian)

17. Pimenov, Y.M. (1994). Planning an experiment in the tasks of chemmotology: Tutorial. St. Petersburg: VATT, 108 p. (in Russian)

18. Guhman, A.A. (1973). Introduction to the theory of similarity. 2nd ed. Moscow: Vysshaya shkola, 296 p. (in Russian)

19. Spirin, N.A., Lavrov, V.V., Zainullin, L.A., Bondin, A.R., Burykin, A.A. (2015). Methods of planning and processing the results of engineering experiment: Tutorial, in Spirin N.A. (Ed.). Yekaterinburg: UINs, 290 p. (in Russian)

20. Moikin, A.A., Medzhibovsky, A.S., Kriushin, S.A., Seleznev, M.V., Kirikov, E.N. (2020). Development of thickened semi-synthetic engine oil M-5z / 20 AERO for four-stroke gasoline engines aircraft piston of unmanned aerial vehicles (UAVs). *World of Petroleum Products. Scientific and Technical Journal*, no. 6, pp. 44–47. DOI: 10.32758/2071-5951-2020-0-6-44-47 (in Russian)

21. Grishin, N.N., Sereda, V.V. (2016). Encyclopedia of Chemmotology. Moscow: Pero, 959 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Криушин Сергей Александрович, старший научный сотрудник отдела смазочных масел ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии МО РФ», sergkriushin78@gmail.ru.

Селезнев Максим Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, mr.selmaks@mail.ru.

Маньшев Дмитрий Альевич, доктор технических наук, доцент, начальник I Научно-исследовательского управления (химмотологии) ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии МО РФ», 25gosniihim@mail.ru.

Зайцева Анна Николаевна, старший научный сотрудник отдела смазочных масел ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии МО РФ», 25gosniihim@mail.ru..

Иванов Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела смазочных масел ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии МО РФ», 25gosniihim@mail.ru.

Information about the authors

Sergey A. Kriushin, Senior Researcher of the Lubricating Oils Department, FAO “25 State Research Institute of Chemmotology of the Ministry of Defense of the Russian Federation”, sergkriushin78@gmail.ru.

Maxim V. Seleznev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mr.selmaks@mail.ru.

Dmitry A. Manshev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, The Head of the I Scientific Research Division (Chemmotology), FAO “25 State Research Institute of Chemmotology of the Ministry of Defense of the Russian Federation”, 25gosniihim@mil.ru..

Anna N. Zaitseva, Senior Researcher of the Lubricating Oils Department, FAO “25 State Research Institute of Chemmotology of the Ministry of Defense of the Russian Federation”, 25gosniihim@mil.ru..

Alexey V. Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Lubricating Oils Department, FAO “25 State Research Institute of Chemmotology of the Ministry of Defense of the Russian Federation”, 25gosniihim@mil.ru..

Поступила в редакцию
Принята в печать

02.11.2022
23.03.2023

Received
Accepted for publication

02.11.2022
23.03.2023