



ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

УДК 621.1

Н.В. КОЧЕТОВ, канд. техн. наук, доц.
ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела¹
E-mail: nio@optron.by

С.Н. ЯНКЕВИЧ
заместитель генерального директора по инновационной работе¹
E-mail: nio@optron.by

И.Н. ХРОЛЬ
начальник научно-исследовательского отдела¹
E-mail: nio@optron.by

И.И. ВАЛЬЧАК
младший научный сотрудник¹
E-mail: nio@optron.by

А.А. ПОСТЕЛЬНЯК
младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела¹
E-mail: nio@optron.by

Г.Р. ПРИСЯЖЕНКО
младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела¹
E-mail: nio@optron.by

¹ОАО «Оптрон», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21.06.2024

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассматривается процесс развития тепловых машин, их типы, модификации, проблемы, встречающиеся на этом пути, и способы их преодоления. Описан творческий поиск инженеров, ученых, практиков, эксплуатировавших тепловые машины (от момента их появления до наших дней). Особенно подробно рассматриваются последние тенденции XX–XXI веков, когда в полной мере получили развитие небольшие двухтактные двигатели внутреннего сгорания (ДВС), которые использовались как в стационарном виде для различных силовых агрегатов (пил, кос, ямобуров), так и на транспорте (сухопутном, речном, морском, легкой авиации).

Ключевые слова: тепловой двигатель, ДВС, двухтактный двигатель

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-99-104>

Введение. Появление теплового двигателя (первой была паровая машина) вызвало переход человечества к новому технологическому укладу. Первоначально люди полагались на собственную физическую силу, которая долгое время оставалась актуальной.

С древности люди использовали природные источники механической энергии с помощью таких устройств, как ветряные мельницы, водяные колеса и паруса.

С приручением животных люди смогли существенно расширить свои экономические воз-

возможности: стали развиваться сельское хозяйство, особенно земледелие, наладилось устойчивое сухопутное транспортное сообщение, почта.

Это привело к синергетическому эффекту и в других сферах: стали развиваться торговля, появились деньги, активизировалось строительство, ремесла, военное дело. Долгие годы животные были основой экономики, особенно в сельском хозяйстве.

Для дальнейшего развития требовалось все большее количество именно механической энергии, поскольку использование рабочего скота имело существенные ограничения: плодородные пастбища в Европе были ограничены. Природные источники механической энергии (ветер, потоки рек, солнечное тепло) были неустойчивы.

Имелись и другие потенциальные источники тепловой энергии: дрова, уголь, нефть, поэтому встал вопрос о получении такой механической энергии. В итоге это привело к изобретению паровой машины. Человечество получило новый источник механической энергии, перейдя в новый технологический уклад.

Краткая историческая справка [1]. Первую тепловую машину упоминал еще древнегреческий ученый Герон Александрийский (рисунок 1). Древние китайцы для своих празднеств использовали порох и ракеты, которые впоследствии вошли в основу огнестрельного оружия.

Многие изобретения появлялись случайно, потом забывались. Только научная основа позволяла их систематизировать, сохранить и продолжить целенаправленное развитие до реального использования. Интересна история изобретения паровой машины.

Талантливый русский изобретатель И.И. Ползунов в 1764 году предложил паровую машину, которая через два года была построена, испытана и в последующем использовалась в горном деле.



Рисунок 1 — Простейшая паровая турбина «Шар бога ветров Эола» [1]
Figure 1 — The simplest steam turbine «The ball of the wind god Aeolus» [1]

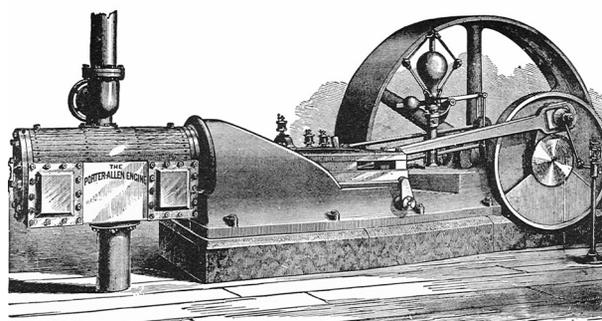


Рисунок 2 — Паровая машина Уатта (музейный экспонат)
Figure 2 — Watt's steam engine (museum exhibit)

Из-за дороговизны ремонта и эксплуатации при дешевой рабочей силе о машине забыли. В промышленно развитой Англии изобретатель Джеймс Уатт в 1768 году построил свой агрегат, а в 1782-м получил патент на паровую машину (рисунок 2) [1].

Потребность в машине для промышленных нужд была высокая. Производители не справлялись с многочисленными заказами.

Паровая машина как толчок для изобретательства и науки. В конце XVIII в. наблюдался бурный рост числа паровых машин, используемых в производстве. Особый «бум» произошел в промышленно развитой Англии. Немного позже паровые машины начали использовать на транспорте паровозы (Джордж Стефенсон, 1814 год [2]), пароходы (Роберт Фултон, 1807 год [3]).

Какое-то время (1910–1931 годы) разрабатывались паровые автомобили (Абнер и Джон Добл) [4]. Они были бесшумными и экологичными (как и электромобили).

Но длительность запуска паровых двигателей существенно снижала мобильность такого транспортного средства. При хороших показателях машина была достаточно дорогой и не получила массового распространения, как это было у Форда, в то время как паровозы еще долго колесили по миру.

Эффективность (КПД) паровых машин на рубеже XVIII–XIX веков была крайне низкой: 2–5 % [1].

Обострение промышленной конкуренции толкало к совершенствованию теплового двигателя, к повышению его эффективности. Активизировалась научная деятельность в этой и смежных областях. Появились и более эффективные виды топлива на основе нефти (светильный газ, керосин, бензин, мазут).

Некоторые изобретения в области тепловых двигателей намного опередили время. Например, газовая турбина была изобретена Джоном Барбером в 1791 году [5], а чуть позже, в 1794 году Томас Мид запатентовал газовый двигатель, работающий на светильном газе [6]. Однако идея была реализована значительно позже. Конструкцию такого двигателя только в 1858 году предложил французский изобретатель Этьен Ленуар (рисунок 3) [7].



Рисунок 3 — Двигатель внутреннего сгорания
(музейный экспонат)
Figure 3 — Internal combustion engine (museum piece)

Француз Несефор Ньепс в 1807 году [8] запустил твердотопливный двигатель внутреннего сгорания на измельченном в порошок пиреолофоре.

Интересно, что первоначально хотели использовать порох (как в пушке), но проект потерпел неудачу [7].

Опыты в области электричества показали, что многие легковоспламеняющиеся жидкости могут воспламеняться с помощью электрической искры. Зажигание топлива от электрической искры оказалось намного эффективнее для автомобиля, повышая его динамику. Эти факты и были предтечей создания двигателей внутреннего сгорания.

Автомобильная эра. Начинаясь век двигателей внутреннего сгорания. Интенсивно велись теоретические изыскания и практические разработки новых двигателей, породившие интересные конструкции, многие из которых оказались тупиковыми ветками прогресса (а может быть, спящими до поры появления новых научных открытий).

В конце 1870-х годов известный немецкий инженер и изобретатель Карл Бенц получил патент на свой двухтактный двигатель внутреннего сгорания [2]. В 1877 году Николаус Отто получил патент на четырехтактный ДВС [9].

Как видно, одно крупное изобретение, в данном случае двигатель, является триггером для появления новых. Преимущество такого вида транспорта было заметным, хотя еще долго использовался и гужевой, по воде ходили пароходы, а по рельсам — паровозы. КПД стационарных паровых машин составлял не более 12 % [2, 4], а на транспорте и того меньше — порядка 6 %, в то время как ДВС имел 30–35 % [7]. Еще больший КПД имели дизельные двигатели: около 40 % [7], о которых пойдет речь дальше.

Двигатель с воспламенением топлива от сжатого воздуха. Был и еще один способ зажигания топлива — за счет быстрого сжатия воздуха, когда температура внутри цилиндра повышалась. Отцом такого двигателя, основанного на сжатии

топливной смеси, был немецкий инженер Рудольф Дизель [10].

Этот двигатель работал на более дешевых сортах жидкого топлива, при этом была достигнута высокая экономичность. С этого времени стали развиваться две линии моторов: бензиновые со свечой зажигания и дизельные с зажиганием горючей смеси от быстрого экзотермического сжатия воздуха в цилиндре, в который подавалось топливо.

Существенный вклад в развитие дизельного двигателя внес советский ученый-изобретатель Г.В. Тринклер, который совершенствовал двигатель на Сормовском заводе. В результате был создан бескомпрессорный дизельный двигатель, получивший распространение во второй половине XX века.

Полет инженерной мысли. Для полноты нашего обзора опишем оригинальные проекты с указанием их особенностей [11].

Роторно-поршневой двигатель (РПД) Ванкеля был создан в 1957 году изобретателем Феликсом Ванкелем (рисунок 4). Основная задача заключалась в упрощении конструкции за счет отказа от кривошипно-шатунного механизма.

В отечественной практике такие двигатели применяли на автомобилях спецслужб (милиция, ГАИ). За рубежом роторно-поршневой двигатель использовался на некоторых моделях Mazda. Экспериментировали и другие производители, но большого успеха не достигли.

Несмотря на хорошие характеристики, двигатель Ванкеля был достаточно сложен при изготовлении. Однако РПД имеет определенные перспективы для развития.

Двигатель с переменной степенью сжатия. Одной из проблем автомобильных ДВС была оптимизация работы в зависимости от нагрузки, которая позволяет экономить до 27 % топлива, поэтому многие конструкторы работали в этом направлении (рисунок 5).

До этого были конструкции с составными поршнями изменяемой длины (Ford, Volkswagen), однако приемлемого решения для дальнейшего



Рисунок 4 — Двигатель Ванкеля
Figure 4 — Wankel engine



Рисунок 5 — Двигатель с переменной степенью сжатия
Figure 5 — Variable compression ratio engine

использования на практике (из-за сложности конструкции) так и не нашлось

«Второе дыхание» тепловых двигателей.

В последнее время особенный интерес для применения двигателей внутреннего сгорания проявился в бурном развитии беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В связи с повышенными требованиями к удельной мощности, дальности полета двухтактные двигатели получили большую популярность как за рубежом, так и в отечественной практике [12–14].

Это вызвано тем, что двухтактные ДВС имеют более высокую удельную мощность (отдача на единицу рабочего объема), по сравнению с четырехтактными, примерно в 1,5–1,7 раза [9]. При этом конструкция таких двигателей проще из-за отсутствия многих узлов: механизма газораспределения, насоса высокого давления, что упрощает и удешевляет производство.

Совершенствование ДВС идет по пути развития достоинств тех или иных типов двигателей, компенсации имеющихся недостатков двигателей [15]. Многие проблемы тепловых двигателей удалось решить благодаря развитию электроники (система управления двигателем и контроль его состояния). Исследователи из Европейского Союза в 2010-х годах создали новый двухтактный двигатель, предназначенный для малолитражных бюджетных автомобилей [16]. Испытания показали хорошие результаты по экологическим нормам и потреблению топлива в сравнении с четырехтактными двигателями.

Определенная работа по совершенствованию ДВС ведется в Российской Федерации, но многие публикации не раскрывают всех результатов. Например, ученым из Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева удалось создать малоразмерный поршневой двигатель для беспилотников [17–19].

Анализ, предшествующий созданию двигателя, показал, что в диапазоне мощностей 5–50 л. с. у двухтактного поршневого двигателя есть неоспоримые преимущества по сравнению с четырехтактным двигателем по массогабаритным параметрам, простоте и технологичности изготовления.

Заключение. С учетом роста потребности в маломощных двигателях для БПЛА можно отметить несколько рекомендаций для развития этого направления.

1. Наиболее целесообразно использовать двухтактные двигатели как более простые, технологичные, недорогие и обладающие большей удельной мощностью [12, 15–17, 19]. Это особенно значимо для легких летательных аппаратов, где важны вес и дальность полета. В актуальных условиях при широком их применении целесообразно наладить недорогое массовое производство.

2. Важно использовать накопленный опыт производства и эксплуатации двухтактных двигателей для небольших автомобилей, маломерных речных судов, мототехники. Хорошая практическая база имела в бывшей ГДР (малолитражные автомобили) [12]. Двигатели этих машин отличались тщательностью проработки конструкции (аккуратность изготовления каналов проводки топливной смеси и воздуха, их форма, состояние поверхностей, тщательность проработки процесса продувки). Была создана хорошая экспериментальная база.

Определенный опыт имелся и в отечественной практике [13, 14]. Для массового производства целесообразно тщательно спроектировать метрические характеристики деталей (точность изготовления, формы поверхностей потоков воздуха и топливной смеси, соответствующий класс шероховатости поверхности), отладить высокотехнологичный процесс производства [16].

3. Новыми направлениями могут стать принудительная подача топлива под управлением электронных микроконтроллеров в строгом соответствии с заданными оптимальными параметрами: дозировкой, временными интервалами, последовательностью подачи (для снижения потери топливной смеси при продувке и сгорании) [17, 19].

Возможна дополнительная подпитка кислородом и другими химическими компонентами (окислители, катализаторы), которые смогут активизировать процесс горения, поднять его температуру (для повышения КПД) [19].

4. Применение новых материалов и технологий (металлов, их сплавов, термо- и химической обработки, композитных материалов, керамики). Например, использование керамических материалов для покрытия поверхностей с целью снижения трения и износа, лучшей теплоизоляции [20].

5. Следует предусмотреть эффективную смазку трущихся поверхностей и подобрать состав лубри-

каторов, позволяющих снизить трение в жестких температурных условиях и недостатке смазки [21].

Список литературы

1. Гончаров, О.Г. Основы теплотехники. История создания тепловых двигателей [Электронный ресурс] / О.Г. Гончаров. — Режим доступа: https://k-a-t.ru/teplotexnika/10_dvigateli/. — Дата доступа: 31.05.2024.
2. Исторический путь паровых машин — из древности до наших дней. Кем и когда были сделаны эти изобретения? [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dzen.ru/a/XUv0Jfvm5wCuOD33>. — Дата доступа: 31.05.2024.
3. Пароход [Электронный ресурс] // Википедия. — Режим доступа: <https://w.wiki/AnHU>. — Дата доступа: 31.05.2024.
4. Паровое совершенство братьев Дюбель — стимпанк жив! [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dzen.ru/a/XMR9Ab3Q5wCzeRN7>. — Дата доступа: 31.05.2024.
5. Барбер, Джон (инженер) [Электронный ресурс] // Википедия. — Режим доступа: <https://w.wiki/AnHn>. — Дата доступа: 31.05.2024.
6. Стативко, В.Л. Двигатель внутреннего сгорания на светильном газе / В.Л. Стативко // Транспорт на альтернативном топливе. — 2010. — № 2(14). — С. 79–81.
7. Ленуар, Этьен [Электронный ресурс] // Википедия. — Режим доступа: <https://w.wiki/AnPe>. — Дата доступа: 31.05.2024.
8. Пороховой двигатель [Электронный ресурс] // DRIVE2.RU. — Режим доступа: <https://www.drive2.ru/b/3061948/?yclid=Iwt3rx6ven947909055>. — Дата доступа: 31.05.2024.
9. Боярских, С. Как четырехтактные моторы одолели двухтактные и любые другие [Электронный ресурс] / С. Боярских // abw.by. — Режим доступа: <https://abw.by/news/knowledge/2024/02/26/kak-chetyrehtaktnye-motory-odoleli-dvuhhtaktnye-i-lubye-drugie>. — Дата доступа: 31.05.2024.
10. Дизель, Рудольф [Электронный ресурс] // Википедия. — Режим доступа: <https://w.wiki/AnPk>. — Дата доступа: 31.05.2024.
11. Кротов, Д. Самые необычные конструкции двигателей [Электронный ресурс] / Д. Кротов // дром. — Режим доступа: <https://www.drom.ru/info/misc/79118.html>. — Дата доступа: 31.05.2024.
12. Цинке, Х.-П. Двухтактный двигатель внутреннего сгорания [Электронный ресурс] / Х.-П. Цинке // Основные средства. — 2023. — № 8. — Режим доступа: <https://os1.ru/article/28241-istoriya-i-budushchee-dvuhhtakniy-dvigatel-vnutrennego-sgoraniya>. — Дата доступа: 31.05.2024.
13. Фишбейн, Е.И. Устройство системы продувки (с сокращением) [Электронный ресурс] / Е.И. Фишбейн // Катера и Яхты. — 1974. — № 3(49). — Режим доступа: <https://motolodka.ru/scavenging.htm>. — Дата доступа: 31.05.2024.
14. Шикин, А.С. Повышение мощности двигателей «Ветерков» [Электронный ресурс] / А.С. Шикин // Катера и Яхты. — 1972. — № 6(40). — Режим доступа: <https://motolodka.ru/fv.htm>. — Дата доступа: 31.05.2024.
15. Двухтактные моторы можно было довести до ума, но желающих так и не нашлось [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dzen.ru/a/ZCrTMBvP7UBQNso0>. — Дата доступа: 31.05.2024.
16. Новый двухтактный двигатель [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dzen.ru/a/XaYBR5WqncXnNYvV>. — Дата доступа: 31.05.2024.
17. Довгялло, А.И. Повышение эффективности работы двухтактного ДВС с искровым зажиганием при использовании впрыска топлива / А.И. Довгялло, С.В. Крашенинников, Д.А. Щепетов // Вестн. СГАУ им. акад. С.П. Королёва. — 2013. — № 3(41), ч. 2. — С. 107–112.
18. В Самаре разработали отечественный двигатель для беспилотников — мощностью 5 л.с., двухтактный, с карбюратором [Электронный ресурс] // IXBT.com. — Режим доступа: yuaelle.ru/fez97. — Дата доступа: 31.05.2024.
19. Алемасов, Д. Двухтактный дизель — будущее легкой авиации [Электронный ресурс] / Д. Алемасов // Авиабаза. — Режим доступа: https://www.airbase.ru/hangar/equipment/engines/2st_dis/. — Дата доступа: 31.05.2024.
20. Hannoosh, J.G. Two-cycle ceramic/metallic internal combustion engine: pat. US6050234A [Electronic resource] / J.G. Hannoosh // Google Patents. — Mode of access: <https://patents.google.com/patent/US6050234A/en?qoq=US6050234A>. — Date of access: 31.05.2024.
21. Шабанов, А. Как отсрочить смерть двигателя: тест пяти присадок к моторному маслу [Электронный ресурс] / А. Шабанов, М. Колодочкин // За рулем. — Режим доступа: <https://www.zr.ru/content/articles/840783-lechim-motory-prisadkami-k-motornym-maslam/>. — Дата доступа: 31.05.2024.

KOCHATAU Mikalai U., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Researcher of the Research Department¹

E-mail: nio@optron.by

YANKEVICH Stepan N.

Deputy General Director for Innovation¹

E-mail: nio@optron.by

KHROL Igor N.

Head of the Research Department¹

E-mail: nio@optron.by

VALCHAK Ilya I.

Junior Researcher¹

E-mail: nio@optron.by

POSTELNYAK Aleksey A.

Junior Researcher of the Research Department¹

E-mail: nio@optron.by

PRISYAZHENKO Gleb R.

Junior Researcher of the Research Department¹

E-mail: nio@optron.by

¹ОАО “Optron”, Minsk, Republic of Belarus

EVOLUTION OF HEAT ENGINES

The process of development of heat engines, their types, modifications, problems encountered on this way and ways to overcome them are considered. The creative search of engineers, scientists, and practitioners who operated heat engines (from the moment of their appearance to the present day) is described. The last tendencies of the XX–XXI centuries, when small two-stroke internal combustion engines (ICE), which were used both in stationary form for various power units (saws, scythes, pit drills) and in transportation (land, river, sea, light aviation), are considered in particular detail.

Keywords: heat engine, ICE, two-stroke engine

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-99-104>

References

1. *Osnovy teplotekhniki. Istoriya sozdaniya teplovykh dvigateley* [Fundamentals of heat engineering. History of creation of heat engines]. Available at: https://k-a-t.ru/teplotekhnika/10_dvigateli/ (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
2. *Istoricheskiy put parovykh mashin — iz drevnosti do nashikh dney. Kem i kogda byli sdelayani eti izobreteniya?* [The historical path of steam engines — from antiquity to the present day. By whom and when were these inventions made?]. 2019. Available at: <https://dzen.ru/a/XUv0Jfvm5wCuOD33> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
3. *Parokhod* [Steamship]. Available at: <https://w.wiki/AnHU> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
4. *Parovoe sovershenstvo bratev Dobl — stimpunk zhiv!* [Doble Brothers steam perfection — steampunk lives!]. 2019. Available at: <https://dzen.ru/a/XMR9Ab3Q5wCzeRN7> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
5. *Barber, Dzhon (inzhenер)* [Barber, John (engineer)]. Available at: <https://w.wiki/AnHn> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
6. Stativko V.L. Dvigatel vnutrennego sgoraniya na svetilnom gaze [Lighting gas internal combustion engine]. *Alternative fuel transport*, 2010, no. 2(14), pp. 79–81 (in Russ.).
7. Lenuar, Eten [Lenoir Étienne]. Available at: <https://w.wiki/AnPe> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
8. *Porokhovoy dvigatel* [Gunpowder engine]. 2016. Available at: <https://www.drive2.ru/b/3061948/?ysclid=lwt3rx6ven947909055> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
9. Boyarskikh S. *Kak chetyrehtaktnye motory odoleli dvukhtaktnye i lyubye drugie* [How four-stroke motors defeated two-strokes and any other motor]. 2024. Available at: <https://abw.by/news/knowledge/2024/02/26/kak-chetyrehtaktnye-motory-odoleli-dvukhtaktnye-i-lubye-drugie> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
10. *Dizel, Rudolf* [Diesel, Rudolf]. Available at: <https://w.wiki/AnPk> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
11. Krotov D. *Samye neobychnye konstruksii dvigateley* [The most unusual engine designs]. 2020. Available at: <https://www.drom.ru/info/misc/79118.html> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
12. Zinke H.-P. Dvukhtaktnyy dvigatel vnutrennego sgoraniya [Two-stroke internal combustion engine]. *Osnovnye sredstva*, 2023, no. 8. Available at: <https://os1.ru/article/28241-istoriya-i-budushchee-dvukhtaktniy-dvigatel-vnutrennego-sgoraniya> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
13. Fishbeyn E.I. *Ustroystvo sistemy produvki (s sokrashcheniem)* [Purge system design (abridged)]. *Katera i yakhty*, 1974, no. 3(49). Available at: <https://motolodka.ru/scavenging.htm> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
14. Shikin A.S. *Povyshenie moshchnosti dvigateley «Veterkov»* [Increasing the power of “Veterki” engines]. *Katera i yakhty*, 1972, no. 6(40). Available at: <https://motolodka.ru/fv.htm> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
15. *Dvukhtaktnye motory mozjno bylo dovesti do uma, no zhelayushchikh tak i ne nashlos* [The two-stroke motors could have been upgraded, but there was no one willing to do it]. 2023. Available at: <https://dzen.ru/a/ZCrTMBvP7UBQNso0> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
16. *Novyy dvukhtaktnyy dvigatel* [New two-stroke engine]. Available at: <https://dzen.ru/a/XaYBR5WqnwCXNYvV> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
17. Dovgyallo A.I., Krashennikov S.V., Schepetov D.A. *Povyshenie effektivnosti raboty dvukhtaktnogo DVS s iskrovym zazhiganiem pri ispolzovanii vpryska topliva* [Increasing the overall performance of a two-stroke engine with spark ignition by fuel injection]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo instituta)*, 2013, no. 3(41), part 2, pp. 107–112 (in Russ.).
18. *V Samare razrabotali otechestvennyy dvigatel dlya bespilotnikov — moshchnostyu 5 l.s., dvukhtaktnyy, s karbyuratorom* [Samara has developed a domestic engine for drones — 5 hp, two-stroke, with a carburetor]. 2023. Available at: yarelle.ru/fez97 (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
19. Alemasov D. *Dvukhtaktnyy dizel — budushchee legkoy aviatsii* [Two-stroke diesel is the future of light aviation]. Available at: https://www.airbase.ru/hangar/equipment/engines/2st_dis/ (accessed 31 May 2024) (in Russ.).
20. Hannoosh J.G. *Two-cycle ceramic/metallic internal combustion engine*. Patent US, no. US6050234A, 2000. Available at: <https://patents.google.com/patent/US6050234A/en?q=US6050234A> (accessed 31 May 2024).
21. Shabanov A., Kolodochkin M. *Kak otsrochit smert dvigatelya: test pyati prisadok k motornomu maslu* [How to delay engine death: a test of five engine oil additives]. 2016. Available at: <https://www.zr.ru/content/articles/840783-lechim-motory-prisadkami-k-motornym-maslam/> (accessed 31 May 2024) (in Russ.).