

УДК 678.8

Э.Ш. Имамединов¹, М.И. Валуева¹**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (обзор)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28

Представлен обзор научно-технической литературы в области поршневых двигателей, применяемых в настоящее время в авиационной промышленности. Представлены данные о конструкции поршневых авиационных двигателей, разработках и практическом применении поршневых двигателей в составе российских и зарубежных изделий авиационной техники, актуальные сведения о конструктивных приемах, используемых при создании поршневых двигателей, а также в области материалов, применяемых при изготовлении конструкций современных поршневых авиационных двигателей. Рассмотрены перспективы применения в элементах конструкции неметаллических (композиционных) материалов.

Ключевые слова: двигатель, поршневой двигатель, материалы, неметаллические материалы, композиционные материалы.

E.S. Imametdinov¹, M.I. Valueva¹**COMPOSITES FOR PISTON ENGINES (review)**

The article provides an overview of the scientific and technical literature about of the piston engines that are used nowadays in the aviation industry. The paper provides the data on the design of piston aircraft engines, the development and practical use of piston engines as part of Russian and foreign products of aviation technology, relevant information on the structural methods used for manufacturing of piston engines, as well as on the materials used in the manufacturing of structures of modern piston aircraft engines. Prospects of using non-metallic (composite) materials in structural elements are discussed.

Keywords: engine, piston engine, materials, non-metallic materials, composite materials.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Создание новых материалов, технологических решений, их совершенствование и модификация предполагают организацию полного «жизненного» цикла материала – реализацию принципа неразрывности материала, технологии и конструкции [1, 2].

В настоящее время в сложных технических системах и конструкциях изделий современного транспортного машиностроения находят применение различные материалы – как металлические, так и неметаллические, при разработке которых проводится всестороннее и комплексное исследование их свойств [3–10].

Необходимым элементом конструкции летательных аппаратов является авиационный двигатель, к которому предъявляется ряд жестких требований. При этом вид применяемого двигателя, конструктивные и технологические особенности его изготовления, а также применяемые материалы

будут определять характеристики двигателя и надежность его работы.

На рис. 1 приведены турбореактивные двигатели современных пассажирских самолетов (А350, МС-21), представленных в 2019 г. на Международном авиационно-космическом салоне (МАКС) в г. Жуковский.

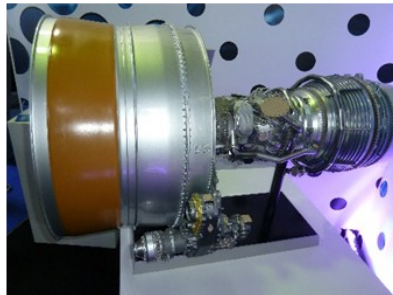
Поршневые двигатели (рис. 2) находят широкое применение при изготовлении изделий для малой авиации и в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Преимуществом поршневого двигателя является сравнительно низкий расход топлива, благодаря чему становятся возможными сокращение необходимого количества масла и горючего на борту, обеспечение длительности полета самолета без дозаправки до 4–5 ч.

Термин «поршневой двигатель» применяется в авиации, автомобильной промышленности и судостроении [11]. Данная статья посвящена поршневым авиационным двигателям. Работа выполнена в рамках реализации комплексного

Самолет Airbus A350



Макеты двигателя ПД-14 для самолета МС-21



Двигатель ПД-14
на самолете Ил-76ЛА



Самолет МС-21-300



Рис. 1. Двигатели современных самолетов, представленных на МАКС-2019



Многоцелевой самолет МАИ-411 (РФ)
с поршневым двигателем Rotax 912S (100 л. с.)



БПЛА «Орион» (РФ)
с поршневым двигателем Rotax 914 (115 л. с.)



Самолет TP-301 (РФ) с турбопоршневым V-образным инжекторным двигателем TP-750, в котором применены керамические материалы. Двигатель сохраняет номинальную мощность до высоты 4000 м, предназначен для установки на самолетах типа TP-301ТП и других воздушных судах с взлетной массой до 3900 кг, а также на двухмоторных самолетах типа Л-410 и TP-410

Рис. 2. Российские самолеты с поршневыми двигателями на МАКС-2019

научного направления 13 «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2].

История авиационных поршневых двигателей

Первые успехи в области создания поршневого двигателя были достигнуты с начала 1860-х гг. изобретателями из Франции и Германии (Э. Ленуар, Н. Отто, Г. Даймлер, В. Майбах, К. Бенц). Первоначально созданный для применения в автомобильной промышленности поршневой двигатель затем использовался на дирижаблях.

Первый авиационный поршневой двигатель внутреннего сгорания разработан конструкторами О. и У. Райт и установлен в 1903 г. на самолете «Флайер I» (США) [12].

В 1906–1909 гг. первые полеты на самолетах с поршневыми двигателями совершены во Франции, а в 1909 г. – в Германии и Великобритании. Максимальная мощность первых поршневых двигателей составляла 80 л. с. В 1915 г. в Швейцарии разработана конструкция поршневого двигателя мощностью 150 л. с. [12].

В конструкции отечественных самолетов первоначально использовали зарубежные или лицензионные поршневые двигатели. На самых больших в мире первых четырехдвигательных самолетах (1913 г.) – опытном «Русский витязь» и серийном «Илья Муромец» конструкции И.И. Сикорского – были установлены поршневые двигатели с водяным охлаждением мощностью до 150 л. с. [12]. Активное развитие поршневого авиадвигателестроения в России происходит в 1920–1930-х гг., и вплоть до середины XX в. поршневой двигатель является основным типом двигателя для авиационной техники.

Так, в СССР в 1925 г. на заводе «Большевик» №9 (г. Запорожье) были успешно завершены испытания первого двигателя М-6 с водяным охлаждением, полностью изготовленного из отечественных материалов, с блоками и поршнями из алюминиевого сплава. Первоначально двигатель М-6 предназначался для установки на самолеты иностранного производства, а в 1927 г. его установили на отечественный самолет П-2 конструктора Н.Н. Поликарпова, в 1928–1930 гг. – на санитарный самолет К-4 конструкции К.А. Калинина [13].

В конструкции двигателя М-11 (110 л. с.) с воздушным охлаждением (1926–1927 гг.) использовано новое для того времени резьбовое соединение отлитой из алюминиевого сплава головки цилиндра со стальной орбитальной гильзой, способствующее улучшению

условий размещения и охлаждения клапанов. Общее количество серийно изготовленных двигателей М-11 составило более 120 тыс. Впоследствии модификации двигателя М-11 устанавливали на самолетах конструкций Н.Н. Поликарпова, А.С. Яковлева, В.Б. Шаврова – более 80 типов летательных аппаратов [12, 13].

Поршневой двигатель М-22 (1930 г.) устанавливали на серийно выпускавшихся самолетах конструкций Н.Н. Поликарпова, А.Н. Туполева, К.А. Калинина, И.Г. Немана, А.И. Путилова, а с двигателем М-34 мощностью 800 л. с. (1931 г.) на самолете АНТ-25 выполнен уникальный беспосадочный перелет из СССР в США через Северный полюс [12, 13]. Двигатели типа АМ конструктора А.А. Микулина использовали на самолетах семейств МиГ, Пе и Ил [12]. Двигатели типа ВК конструктора В.Я. Климова мощностью до 1100–1650 л. с. использовали также для самолетов семейства Як (1940–1943 гг.).

Двигатели типа АШ конструктора А.Д. Швецова мощностью до 1700–1850 л. с. применяли как на самолетах, так и на вертолетах (1941–1943 гг.) [12]. Поршневой двигатель АШ-82ФН был установлен на самолетах конструкций С.А. Лавочкина, А.Н. Туполева, В.М. Петлякова; двигатель АШ-62ИР устанавливали на самолет Ан-2 ОКБ О.К. Антонова [13]. Созданный ОКБ №478 в 1947 г. поршневой двигатель с воздушным охлаждением АИ-26ГР (ЗМКБ «Прогресс») предназначался для вертолетов и был установлен на опытные вертолеты ОКБ И.П. Братухина и ОКБ А.С. Яковлева, а его модификация – двигатель АИ-26В – на вертолет Ми-1 ОКБ им. М.Л. Миля [13].

Сверхмощный (4300 л. с.) поршневой двигатель был разработан в ОКБ В.А. Добрынина в 1950 г. и установлен на самолете Ту-85 [12].

При создании и совершенствовании двигателей основными направлениями работ являлись улучшение отвода тепла от перегретых деталей, сохранение их геометрической формы в процессе работы, повышение стойкости поверхностей в условиях повышенного трения и воздействия горячего газового потока [13].

Во ФГУП «ВИАМ», с момента его основания в 1932 г., осуществляется разработка авиационных материалов [14–20]. В военные годы продолжалась работа по созданию новых материалов и технологий; сотрудники ФГУП «ВИАМ» занимались проблемами повышения живучести самолетов и улучшением их летно-технических характеристик, проводили научно-исследовательские работы непосредственно на предприятиях авиационной

и металлургической промышленности, в составе фронтовых бригад на месте помогали восстанавливать поврежденную в сражениях технику [15].

Несмотря на обозначившуюся к концу Второй мировой войны необходимость увеличения предельной скорости самолетов и перехода от поршневых двигателей к двигателям нового типа (газотурбинным) [21], поршневые двигатели и в настоящее время находят свое применение, в частности, при создании изделий малой авиации.

Конструкция (основные узлы) поршневого двигателя

Поршневые двигатели относятся к двигателям внутреннего сгорания, в которых тепло преобразуется в механическую работу, передаваемую на вал двигателя при помощи поршня и шатуна; вал двигателя, в свою очередь, приводит во вращение воздушный винт, создающий необходимую для полета тягу [22].

Стандартный поршневой двигатель включает такие узлы, как картер, элементы цилин-

дрово-поршневой группы, кривошипно-шатунный механизм, редуктор воздушного винта, впускные и выпускные патрубки (клапаны) цилиндра [23, 24]. На рис. 3 приведены основные узлы поршневого двигателя.

Поршневой двигатель может быть классифицирован по схемам расположения цилиндров относительно коленвала (рядный, оппозитный (V-образный) или звездообразный (радиальный)), способу подачи топлива (карбюраторное питание или впрыскивание), по количеству тактов процесса (двух- и четырехтактный) и цилиндров (4, 5, 12 и т. д.), по мощности, виду используемого топлива (работающие на жидком или газообразном топливе) и способу охлаждения цилиндров (жидкостное, воздушное, комбинированное воздушно-жидкостное) [12, 22].

Зарубежные и российские поршневые двигатели

За рубежом серийные поршневые двигатели различной мощности (50–450 л. с.) выпускаются фирмами Rotax (Австрия), Hirth (Германия),

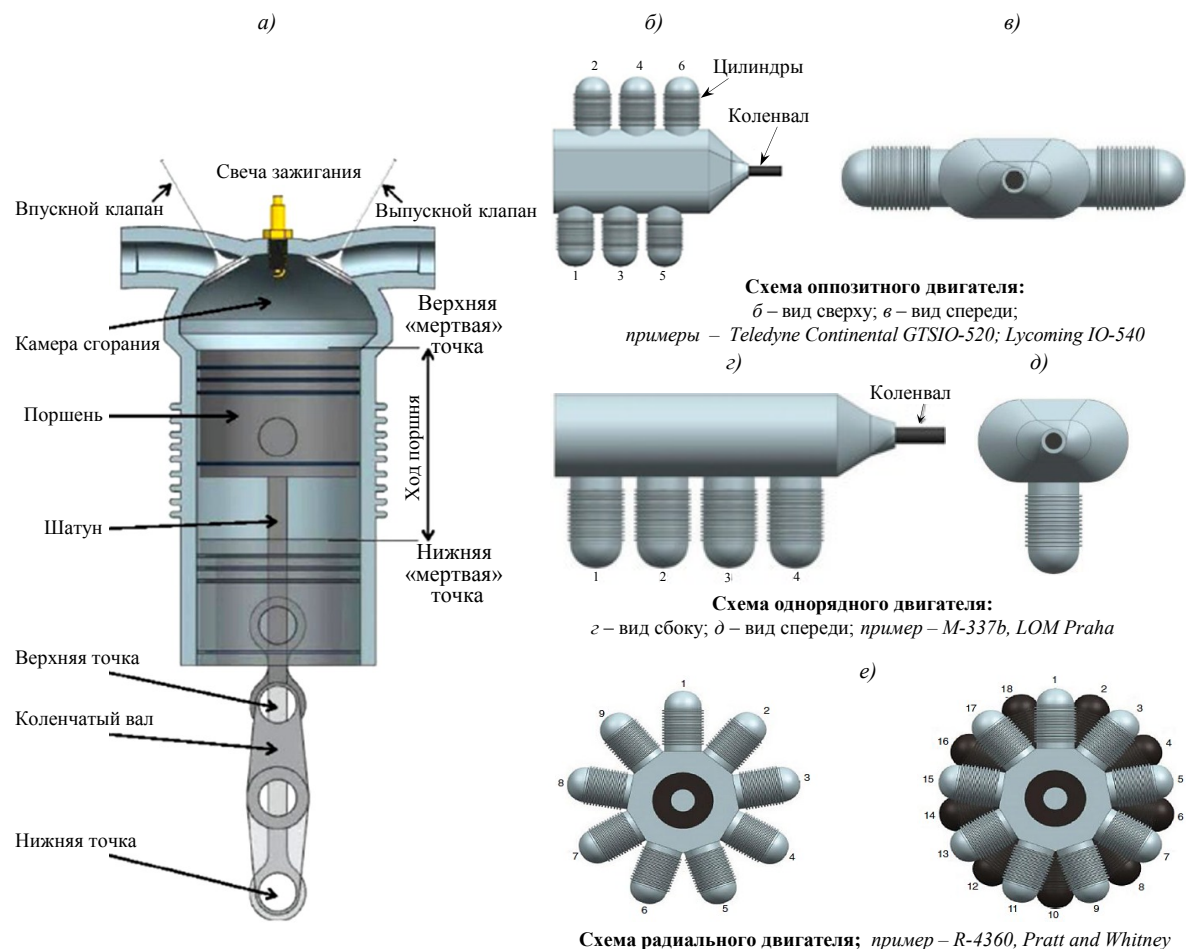


Рис. 3. Принципиальная схема поршневого двигателя (а) и схемы расположения цилиндров (б–е) [24]

Limbach (Германия), Lycoming (США), Teledyne (США), LOM Praha (Чехия), Rotec и Jabiru (Австралия) [25–33]. Стоимость поршневых двигателей, например R2800 и R3600 компании Rotec, составляет 22500 и 24990 долларов соответственно [31, 32]. В таблице представлены эксплуатационные требования к материалам для зарубежных поршневых двигателей.

Разработками в области поршневых авиационных двигателей в России занимаются ФГУП «ЦИАМ», АО Гаврилов-Ямский машиностроительный завод «Агат» (Ярославская обл.), АО «КБ «Луч» (г. Рыбинск); производством поршневых двигателей для летательных аппаратов гражданской малой авиации – АО «Уральский завод гражданской авиации» (г. Екатеринбург), для малой авиации и вертолетов – ООО «Опытно-конструкторское бюро моторостроения» (г. Воронеж), для БПЛА – ПАО «Кузнецов» (г. Самара) [37–45].

Одной из перспективных разработок (2017 г.) является авиационный поршневой двигатель

«Ритм» мощностью 200 л. с. производства «Истринского экспериментального механического завода», предусматривающий также модификацию для применения в вертолетной технике мощностью 260 л. с. [46].

На беспилотном летательном аппарате (БПЛА) «Орион» производства Группы «Кронштадт» [47] в настоящее время установлен поршневой двигатель Rotax 914 мощностью 115 л. с., для повышения высотности оснащенный турбокомпрессором; для серийного производства БПЛА планируется применение российского двигателя АПД-110/120 (АО «ГМЗ «Агат» – ФГУП «ЦИАМ») [48]. На БПЛА «Корсар» (АО «КБ «Луч») [49] также использован поршневой тип авиационного двигателя [50].

Требования к материалам для поршневых авиационных двигателей

Во время работы двигателя поршень перемещается с большой скоростью, подвергается

Эксплуатационные характеристики, определяющие требования к материалам для зарубежных поршневых двигателей [23, 34–36]

Характеристика	Двигатель			
Марка двигателя	M337C	семейство IO-360A, -AB, -B, -C, -CB, -D, -DB, -G, -GB, -H, -HB, -J, -JB, -K, -KB, -ES	семейство O-360 (O-360-A1P, O-360-J2A, IO360-L2A, HIO-360-D1A)	Rotax 912 ULS
Фирма-производитель	LOM Praha	Teledyne Continental Motors	Textron Lycoming	Rotax
Страна-производитель	Чехия	США	США	Австрия
Количество цилиндров	6	6	4	4
Температура наружного воздуха, °C	-40÷+40	–	–	–
Температура головок цилиндров, °C:				
– эксплуатационный диапазон	70–210	–	–	–
– минимальная (на снижении)	70	–	–	60
– нормальная эксплуатационная	140–195	–	–	–
– максимальная допустимая	210 (≤5 мин)	238	260	135
Максимальная температура корпусов цилиндров, °C	–	154	163	–
Температура масла, °C:				
– минимальная	25–35	–	–	50
– нормальная	40–90	–	–	90–110
– максимальная	80–90	225–240	118–127	130
– максимальная (≤10 мин)	85–110	–	–	–
Ресурс, ч:				
– для нормальной и многоцелевой категории (масла без/с присадками)	1200/2000	–	–	1200 (15 лет, межремонтный)
– для акробатической категории (масла без/с присадками)	850/1400	–	–	3600 (45 лет, общий)
Размеры, мм:				
– диаметр цилиндров	105	112,73	130	–
– ход поршня	115	98,43	111	–

воздействию повышенных температур и давления [51]. Возможность совершенствования процесса работы поршневого двигателя в значительной степени связана с конструкцией поршня, применяемых при его производстве технологий и материалов [52]. Материал поршня должен характеризоваться легкостью, износостойкостью, обеспечивать минимизацию потерь на трение, иметь оптимальную электропроводность и невысокие значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) [52]. В отечественной и мировой практике для производства поршней используются алюминиевые сплавы, чугуны, стали. При этом, например, используемые алюминиевые сплавы имеют ряд недостатков – таких как снижение прочностных характеристик при высоких температурах, высокий ТКЛР, низкая износостойкость. Применение приема армирования алюминиевого поршня керамическими волокнами позволяет повысить прочность, предел текучести базового алюминиевого сплава, износостойкость, снизить ТКЛР [52]. Композитное поршневое кольцо из армированной керамики рассмотрено в патенте [53]. Исследователями также проводятся работы по разработке поршней из композиционных материалов [52].

Композиционные материалы в конструкции поршневых двигателей

Ожидаемым эффектом внедрения в конструкцию поршневых авиационных двигателей для малой авиации композитных и неметаллических материалов (интерметаллиды, керамика, углепластики) является снижение весовых характеристик при увеличении ресурса и снижение потерь на трение [38, 39, 54–57].

К группе передовых и перспективных инженерных материалов, в том числе для изготовления деталей поршневых двигателей (поршней, вкладышей), относятся композиционные материалы с металлической матрицей. Для данной группы материалов характерны низкая плотность, повышенные прочность, жесткость, износостойкость, а также стабильность линейных размеров изделия при высоких температурах. Повышенная износостойкость таких материалов определяется межфазными явлениями между металлической матрицей и добавленными дисперсными керамическими частицами (Al_2O_3 , SiC). Важным технологическим аспектом производства данных композитных поршней является необходимость достижения гомогенизации для обеспечения однородности распределения частиц карбида кремния по всему объему металлической матрицы и стабильности свойств материала [58].

В работе [57] отмечена перспективность применения в элементах поршневого двига-

теля наноматериалов. Известно, что основными составляющими механических потерь на трение являются поршень и стенка цилиндра, при этом за счет трения движущихся механических частей расходуется около 10–15% топливной энергии. Применение технологического приема покрытия деталей двигателя (стенок цилиндров) нанокристаллическими материалами (например, нанокристаллами карбида и борида железа размером 50–120 нм) приводит к образованию твердой поверхности с очень низким коэффициентом трения, что способствует повышению износостойкости и снижению потерь на трение, соответственно, сокращается расход топлива. Применение наноглины, оксидов циркония ZrO и иттрия Y_2O_3 , обладающих высокой термостойкостью, как ожидается, позволит обеспечить возможность эксплуатации элементов двигателя при более высоких температурах [57].

В работе [59] представлены данные о применении композиционных материалов в деталях поршневых двигателей. В частности, взамен алюминия в качестве материала поршня может быть использован нитрид кремния. Низкая теплопроводность в сочетании с высоким значением ТКЛР керамических материалов позволяет применять их для изготовления элементов конструкции камеры сгорания поршневых двигателей. В работе [59] также приводятся данные о возможности применения в конструкции поршня из алюминиевого сплава цельнокерамических вставок на основе диоксида циркония.

Во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» совместно с РФПИ проводятся исследования по созданию перспективного роторно-поршневого двигателя для самолетов малой авиации и БПЛА на основе материалов нового поколения, а именно с применением интеркерамоматричных и металлокерамоматричных композитов. Композиционные материалы использованы в различных элементах демонстратора двигателя, показаны снижение потерь на трение и минимальный износ таких деталей, что иллюстрирует перспективность применения композиционных материалов для изготовления высоконагруженных элементов роторно-поршневого двигателя. По результатам испытаний (2019 г.) получен массив данных, позволяющих сформировать требования к ответственным деталям из керамических композиционных материалов для проведения дальнейшей отработки на опытных двигателях [60].

Альтернативой алюминию при изготовлении поршней могут также являться углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), которые имеют более низкую плотность, более высокую прочность и жесткость

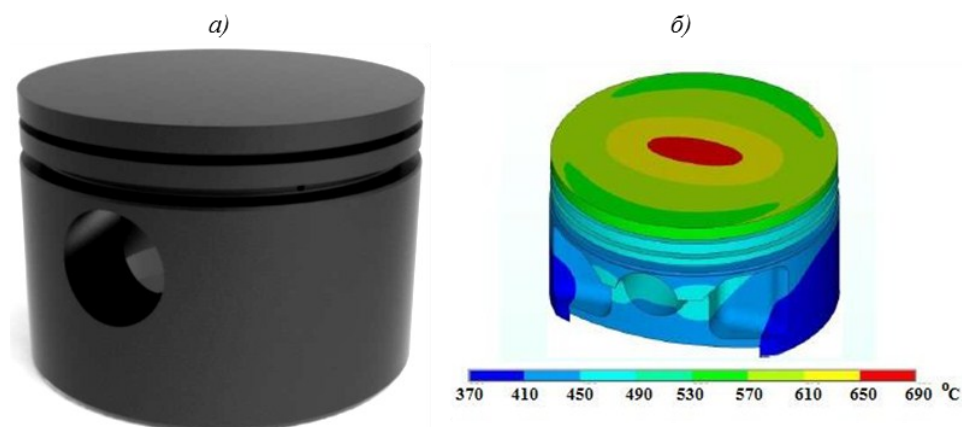


Рис. 4. Поршень из углеграфитового материала для авиационного двигателя [40]:
 а – общий вид поршня; б – распределение температур в поршне

по сравнению с алюминием и поддерживают уровень указанных свойств при температурах $>2500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такие материалы характеризуются высокой теплопроводностью и превосходным сопротивлением термическому удару [61], а низкий ТКЛР позволяет уменьшить монтажный зазор между поршнем и цилиндром в конструкции двигателя [55].

Преимуществами применения графитовых поршней в конструкции авиационного поршневого двигателя являются: снижение массы на величину до 40% в сравнении с традиционными алюминиевыми поршнями, увеличение допустимых тепловых нагрузок на огневое днище поршня, снижение инерционных нагрузок на коленчатый вал двигателя [40]. Так, графитовые поршни фирмы Hirth (Австрия) уже находят применение в комплектации ряда зарубежных серийных авиационных поршневых двигателей. Во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» проводятся исследования по созданию конструкторской документации и расчету теплонпряженного состояния поршня авиационного поршневого двигателя из углеграфитового материала [40, 41]. Величина температуры в различных зонах поршня составляет $370\text{--}690\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4).

Производством углеродных поршней занимаются компании из Германии (SCHUNK) и США (SGL) [52, 62]. В России в настоящее время из углеродного керамоподобного материала изготовлен образец поршня для авиационного двигателя [52].

Комплексное проектирование деталей цилиндропоршневой группы, колец и гильзы цилиндра позволит, как ожидается, максимально реализовать преимущества использования углерод-углеродного материала [61] в конструкции и будет способствовать улучшению эксплуатационных показателей двигателя [52].

Во ФГУП «ВИАМ» разработана широкая номенклатура металлических и неметаллических материалов и покрытий, проводятся исследования по разработке новых материалов с усовершенствованными свойствами, разрабатываются технологические процессы, методы и средства защиты от повреждений различной природы [2]. В изделиях предприятий отрасли широкое применение также находят высокожаропрочные суперсплавы, интерметаллидные материалы, высокотемпературные керамические и керамоподобные материалы, металломатричные и полиматричные композиционные материалы. Полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», предназначены для изготовления слабо-, средне- и сильнонагруженных конструкций, получаемых с применением современных технологий, с различными диапазонами температур эксплуатации, в том числе работающих при температурах до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2, 8].

Заключения

Поршневые двигатели находят применение в малой авиации, обеспечивая самолету длительность полета без дозаправки до 5 ч.

За рубежом серийные поршневые двигатели различной мощности (50–450 л. с.) выпускаются в Австрии, Германии, США, Чехии и Австралии. Вопросами разработки и производства в области поршневых авиационных двигателей в России занимаются ФГУП «ЦИАМ», АО «ГМЗ «Агат», АО «КБ «Луч», АО «УЗГА», ООО «ОКБМ» и ПАО «Кузнецов».

Для изготовления элементов конструкции поршневых двигателей применяются алюминиевые сплавы, чугуны, стали, титан, интерметаллиды, композитные материалы; максимально допустимая температура цилиндров поршневых двигателей составляет $210\text{--}260\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
4. Беляченков И.О., Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Ваганова М.Л., Шавнев А.А. Нитридокремниевые керамические материалы для подшипников авиационных ГТД и способы их получения (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №7 (79). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-42-49.
5. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №7 (43). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12.
6. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №6 (54). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
7. Валуева М.И., Зеленина И.В., Мишулов К.С., Гуляев И.Н. Обзор публикаций по разработкам лопаток из полимерных композиционных материалов для вентилятора авиационного двигателя // Вестник машиностроения. 2019. №2. С. 39–41.
8. Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И., Мухаметов Р.Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №2 (38). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
9. Евдокимов А.А., Гуляев И.Н., Зеленина И.В. Исследование физико-механических свойств и микроструктуры объемно-армированного углепластика // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №4 (76). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-38-47.
10. Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Автаев В.В. Влияние морской воды на сопротивление многоциклового усталости сплава ВТ3-1 при различных коэффициентах асимметрии нагружения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журнал. 2019. №1 (73). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-115-124.
11. Двухтактный аксиально-поршневой двигатель внутреннего сгорания «УГАТУ-МОТОР»: пат. 3785U1 Рос. Федерация. №94037791/20; заявл. 07.10.94; опубл. 16.03.97.
12. Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. М.: Машиностроение, 2010. Т. IV-21: Самолеты и вертолеты. Кн. 3: Авиационные двигатели / под ред. В.А. Скибина, Ю.М. Темиса, В.А. Сосунова. 720 с.
13. Богуслав В.А. Мотор Сич: от поршневых к газотурбинным. Запорожье: Мотор Сич, 2003. 256 с.
14. Каблов Е.Н., Демонис И.М., Дворяшин В.Г., Нарский А.Р. ВИАМ: у истоков (1924–1935 гг.). Четыре неизвестных факта // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 23–31.
15. Каблов Е.Н. Даже в тяжелые военные годы ВИАМ продолжал научные исследования // Металлы Евразии. 2015. №2. С. 4–7.
16. Скляр Н.М. Путь длиною в 70 лет – от древесины до суперматериалов / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. 488 с.
17. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
18. Каблов Е.Н. Всероссийскому институту авиационных материалов – 80 лет // Деформация и разрушение материалов. 2012. №6. С. 17–19.
19. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
20. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
21. Иноземцев Н.В. Основы теории реактивных двигателей. М.: Изд-во ДОСААФ, 1952. 201 с.
22. Рыбальчик В.С., Поляков С.В., Герасименко В.Ф. Теория поршневых авиационных двигателей / под ред. А.А. Добрынина. М.: Военное издательство Министерства обороны Союза ССР, 1955. 354 с.
23. Кулешов В.Н. Конструкция и эксплуатация двигателя Rotax 912 ULS и его систем: учеб. пособие. Екатеринбург: Уральский УТИЦ, 2010. 40 с. URL: <http://xn----8sbah4a6anjx.xn--p1ai/wp-content/uploads/2014/04/KiE-dvigatelia-Rotax.pdf> (дата обращения: 22.03.2020).

24. Farokhi S. Aircraft propulsion. Second ed. UK: John Wiley & Sons Ltd., 2014. 1048 p.
25. Products // BRP-Rotax GmbH & Co KG. URL: <https://www.flyrotax.com/products.html> (дата обращения: 22.03.2020).
26. Engines // Hirth Engines GmbH. URL: <http://hirthengines.com/engines/> (дата обращения: 22.03.2020).
27. Products // Limbach Airplane Engines. URL: <https://limflug.de/en/products/engines.php> (дата обращения: 22.03.2020).
28. Lycoming Engines // Lycoming. URL: <https://www.lycoming.com/engines> (дата обращения: 22.03.2020).
29. Teledyne Turbine Engines // Teledyne Technologies Incorporated. URL: <http://www.teledyne.com/turbine-engines> (дата обращения: 22.03.2020).
30. Engines // LOM Praha. URL: <http://www.pistovemotory.cz/ru/engines> (дата обращения: 22.03.2020).
31. Radial engines // Rotec aerosport. URL: <https://www.rotecaerosport.com/radial-engines> (дата обращения: 22.03.2020).
32. Products // Rotec aerosport. URL: <https://store.rotecaerosport.com/> (дата обращения: 22.03.2020).
33. Engines // Jabiru Aircraft Pty Ltd. URL: <https://jabiru.net.au/engines/> (дата обращения: 22.03.2020).
34. Сертификат №84-Д двигателя Teledyne Continental Motors (США). 2008. URL: http://www.aviadocs.net/MAK/AD/IO_360_A/N84_D.pdf (дата обращения: 22.03.2020).
35. Сертификат №CT158-АМД двигателя Textron Lycoming (США). 2008. URL: http://www.aviadocs.net/MAK/AD/O_360/N158_AMD.pdf (дата обращения: 22.03.2020).
36. Сертификат №CT214-АМД двигателя LOM Praha (Чехия). 2008. URL: http://www.aviadocs.net/mak/AD/M337C/N214_AMD.pdf (дата обращения: 22.03.2020).
37. Авиационные поршневые двигатели XXI века. URL: <http://www.ciam.ru/press-center/interview/aviation-piston-engines-of-the-xxi-century/> (дата обращения: 22.03.2020).
38. Финкельберг Л.А. Состояние дел и перспективы развития поршневого двигателестроения для малой авиации в России. URL: <http://gama-aero.ru/ru/matf-2014/6.pdf> (дата обращения: 22.03.2020).
39. Состояние, перспективы развития и ключевые направления работ по созданию авиационных поршневых двигателей для авиации общего назначения. 2017 г. URL: https://aviatp.ru/files/newturn/Presentatsiy/7_Perspektivy_razvitiya_porshnevyyh_dvigatelay.pdf (дата обращения: 22.03.2020).
40. Костюченков А.Н. Перспективы развития авиационных поршневых двигателей для БПЛА // II Международная конференция «Беспилотная авиация – 2015» (Москва, 17 апр. 2015 г.). URL: <http://aviacenter.org/d/166600/d/perspektivyrazvitiyaaviatsionnykhporshnevyyhdvigatelaydlyabpla.pdf> (дата обращения: 22.03.2020).
41. Костюченков А.Н., Финкельберг Л.А., Барышников С.И. Повышение эффективности перспективных авиационных поршневых двигателей. URL: https://aviatp.ru/files/enginew/recengines/1_AN_Kostuchenkov_TSIAM_im_PI_Baranova.pdf (дата обращения: 22.03.2020).
42. Завод «Агат»: выход на новый уровень сотрудничества // Инженер и промышленник сегодня. 2017. №3 (27). С. 20–22.
43. Самолетостроительное производство. URL: <http://www.uwca.ru/production/> (дата обращения: 22.03.2020).
44. Авиационные двигатели. URL: <https://okbm.ru/products.php?type=1> (дата обращения: 22.03.2020).
45. Исторические хроники ПАО «Кузнецов». URL: <http://www.kuznetsov-motors.ru/history> (дата обращения: 22.03.2020).
46. Авиационный поршневой двигатель «Ритм». URL: https://aviatp.ru/files/newturn/Presentatsiy/13_Dvigatel_Ritm.pdf (дата обращения: 22.03.2020).
47. Комплекс воздушной разведки «Орион-Э». URL: <https://kronshtadt.ru/products/bspilotny-e-sistemy-i-robototekhnika/ae-rokosmicheskie-sistemy/kompleksy-s-bla/orion-e/> (дата обращения: 22.03.2020).
48. Беспилотный летательный аппарат большой продолжительности полета «Орион» // Бастион: воен.-техн. сб. 2019. URL: http://bastion-karpenko.ru/orion_tranzas/ (дата обращения: 22.03.2020).
49. АО «КБ «Луч» (входит в состав АО «Концерн «Вега») представил беспилотник «Корсар» на открытой экспозиции форума «Армия-2019». URL: http://vega.su/press-room/?ELEMENT_ID=2234 (дата обращения: 22.03.2020).
50. Разведывательный беспилотный аппарат малого класса «Корсар» // Бастион: воен.-техн. сб. 2015. URL: <http://bastion-karpenko.ru/korsar-bla/> (дата обращения: 22.03.2020).
51. Основы теории поршневых двигателей. URL: <https://vzletim.ru/upload/iblock/9cc/engine01.pdf> (дата обращения: 22.03.2020).
52. Макаров А.Р., Смирнов С.В., Осокин С.В. Конструкционные материалы для поршней ДВС // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 1. №1 (15). С. 118–125.

53. Fiber reinforced ceramic matrix composite piston ring: пат. US6062569. №08/989283; заявл. 12.12.97; опубл. 16.05.00.
54. Ma J., Shen L., He Y. Application of composite materials in engine // *Materials Science: Advanced Composite Materials*. 2017. No. 1 (1). P. 1–9.
55. Posmyk A., Filipczyk J. Aspects of the applications of composite materials in combustion engines // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2013. Vol. 20. No. 4. P. 357–361.
56. Dolata-Grisz A., Dyzia M., Sleziona J., Wieczorek J. Composites applied for pistons // *Archives of foundry engineering*. 2007. Vol. 7. No. 1. P. 37–40.
57. Haynes H., Asmatulu R. *Nanotechnology Safety in the Aerospace Industry* // *Nanotechnology Safety*. Amsterdam: Elsevier, 2013. P. 85–97.
58. Dyzia M. Aluminum Matrix Composite (AlSi7Mg2Sr0.03/SiCp) pistons obtained by mechanical mixing method // *Materials*. 2018. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/1/42/htm> (дата обращения: 22.03.2020).
59. Baker A.R., Dawson D.J., Evans D.C. Ceramics and composite materials for precision engine components // *Materials & Design*. 1987. Vol. 8. No. 6. P. 315–323.
60. Перспективный роторно-поршневой двигатель для авиации на основе материалов нового поколения. URL: <https://naukatehnika.com/perspektivnyj-rotorno-porshnevoj-dvigatel.html> (дата обращения: 22.03.2020).
61. Gorton M.P. Carbon-Carbon Piston: NASA contractor report 4595. 1994. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940031440.pdf> (дата обращения: 22.03.2020).
62. Carbon pistons for internal combustion engines. URL: <http://www.shunk-group.com> (дата обращения: 22.03.2020).