

ОЦЕНКА КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2017

- А. В. Солодовников** кандидат технических наук, подполковник, преподаватель;
филиал Военной академии имени Петра Великого, г. Серпухов
aleksey.solod@mail.ru
- И. А. Акиншин** аспирант;
Воронежский государственный технический университет;
24vano24@mail.ru
- В. В. Голубятник** кандидат технических наук, научный консультант;
филиал Военной академии имени Петра Великого, г. Серпухов;
slava6123@rambler.ru
- А. В. Кривоногов** адъюнкт (аспирант);
филиал Военной академии имени Петра Великого, г. Серпухов;
andreikrivotnogov@mail.ru

Перспективным направлением снижения себестоимости производства жидкостных ракетных двигателей является применение инновационных методов производства, таких как аддитивные технологии, а также применение композиционных материалов в силовой конструкции. Целью работы является оценка концепции создания инновационного двигателя, в котором смесительная головка камеры сгорания изготавливается по аддитивной технологии, а цилиндр с соплом – из композиционного материала. При решении основных задач исследования проанализирован опыт внедрения инновационных методов производства в аэрокосмическую технику и проведено технико-экономическое сравнение конструкций отдельных агрегатов, изготовленных по аддитивной и традиционной технологиям. По результатам огневых испытаний на модели экспериментально подтверждена работоспособность новой конструкции и определены вопросы, требующие дальнейшего решения. В результате проведённого исследования концепции инновационного двигателя получено, что трудоёмкость серийного производства изделия снижается в 3-4 раза и в 3-6 раз сокращается номенклатура деталей, необходимых для единичной сборки. Следует отметить снижение на 25% массы изделия. За счёт изменения конструкции возникает возможность обеспечения форсирования режима работы двигателя до 30% от номинальной тяги.

Инновационные технологии; ракетные двигатели; композиционные материалы.

Цитирование: Солодовников А.В., Акиншин И.А., Голубятник В.В., Кривоногов А.В. Оценка концепции создания жидкостного ракетного двигателя на основе инновационных технологий // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 2. С. 127-134. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-127-134

Одним из перспективных направлений по повышению энергоёмкости характеристик жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является применение инновационных технологий при производстве деталей и сборочных единиц (ДСЕ).

Согласно докладу Сколковского института науки и технологий (Skoltech) [1] к инновационным технологиям, применяемым в ракетной технике, относятся:

- аддитивные технологии (AF – Additive Manufacturing), т. е. метод послойного селективного лазерного плавления гранул металлических сплавов;
- композиционные материалы (КМ) на основе углерод-углеродных (углерод-керамических) композиционных нитей.

Современные традиционные технологии изготовления ЖРД основаны на создании деталей путём удаления избыточного материала с последующим соединением их сваркой, пайкой и т. п. в единое целое.

Предлагается концепция создания инновационного жидкостного ракетного двигателя, в котором агрегаты, а также их ДСЕ, выполнены по новым перспективным технологиям.

За рубежом аналогичные работы проводят специалисты аэрокосмической компании Space-X (США) при создании ЖРД «Мерлин-1А». Однако внедрить в конструкцию двигателя КМ и ДСЕ, изготовленные по АФ-технологиям, не удалось.

Из [2] известно, что общую стоимость (трудоемкость) ЖРД в основном определяют семь основных агрегатов (60% трудоемкости): камера сгорания (КС), турбонасосный агрегат (ТНА), газогенератор (ГГ), дроссель и регулятор, а также входные пусковые клапаны окислителя и горючего. Остальные ДСЕ (более 50 наименований) имеют незначительную трудоемкость и поэтому в дальнейшем рассматривать их нецелесообразно.

Авторами предлагается металлическую КС регенеративного охлаждения заменить принципиально новой конструкцией, в которой:

- смесительная головка (СГ) изготавливается по аддитивной технологии из никель-хромового сплава;
- цилиндр камеры сгорания с соплом изготавливается из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ);
- соединение двух элементов осуществляется фланцевым болтовым соединением за зоной смесительной головки (уплотнитель – материал IZOLOCK C-200) в месте, где отсутствует тепловое воздействие горячих газов на конструкцию.

Перечислим преимущества данной конструктивной схемы КС:

1. Исключение регенеративного охлаждения (потерь давления по линии горючего), что позволяет при сохранении температуры генераторного газа увеличить давление до 30 МПа.
2. Снижение массы за счёт использования КМ.
3. Значительное упрощение производства.

СГ инновационного ЖРД предлагается изготавливать методом лазерного спекания металла на установке типа ConceptLaser (США) с последующей токарной обработкой интерфейсов.

Цилиндр камеры с соплом создаётся выкладкой углеродно-волоконистого материала на металлическую формообразующую оправку с заданным профилем, предварительно пропитанную фенолформальдегидным связующим. Толщина заготовки регулируется количеством слоёв углеродного материала. Дальнейшие технологические процессы включают: карбонизацию ($T = 850^{\circ}\text{C}$), термообработку ($T = 1800^{\circ}\text{C}$), предварительное ($T = 950^{\circ}\text{C}$) и окончательное пироуплотнение ($T = 1000^{\circ}\text{C}$) углепластиковых заготовок. Во время этих стадий материал насыщается пироуглеродом, приобретая достаточную жёсткость для сохранения формы.

В настоящее время для высокотемпературных условий работы в ЖРД разработаны и опробованы КМ нового поколения, например, российский «Граурис» (изготовитель ФГУП Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов, г. Пермь) или французский «Нахесо» (фирма-производитель Snecma Propulsion Solid), которые применяются для изготовления крупногабаритных тонкостенных камер ракетных двигателей твёрдого топлива и имеют плотность $1,4 \text{ г/см}^3$ [3].

Следующим наиболее сложным агрегатом двигателя является турбонасосный агрегат, при создании которого предполагается внедрить перспективные технологии для изготовления следующих ДСЕ:

- турбина, колёса насосов горючего и окислителя создаются по АФ-технологии;
- части силового корпуса ТНА изготавливаются из высокопрочного КМ.

Применение вышеперечисленных технологий позволит снизить затраты на 35 – 40% от общей стоимости агрегата.

Газогенератор инновационного ЖРД предполагается изготовить методом лазерного спекания никель-хромового сплава, при этом конструкция получается за один технологический цикл без сложных сборочных, паяных и сварочных операций. Входные штуцера подвода топлива обрабатываются токарным способом для последующего соединения с трубопроводами.

Остальные элементы двигателя (дроссель, регулятор, входные пусковые клапаны) рекомендуется изготавливать комбинированным способом: методом АФ-технологии создаются только наиболее конструктивно сложные детали – корпуса, а входящие в них ДСЕ изготавливаются по традиционной технологии (токарным, фрезерным, слесарным способами).

Для подтверждения концепции создания инновационного ЖРД авторами были проведены теоретические исследования на основе СГ двигателя (рис. 1), которую предполагается изготовить по АФ-технологии.

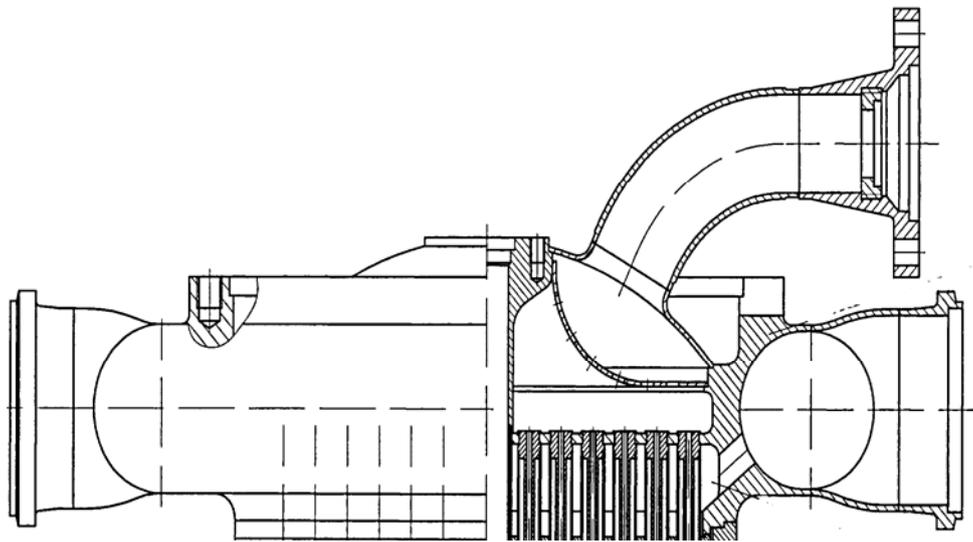


Рис. 1. Схема смесительной головки гипотетического инновационного ЖРД

Анализ показал, что смесительная головка, выполненная по АФ-технологии, в 3,5 раза дешевле традиционной, а подготовка производства уменьшается в сотни раз. Дополнительно необходимо отметить, что количество входящих ДСЕ в комплектацию СГ уменьшилось в 20 раз, а количество используемого при изготовлении оборудования сократилось в 2,5 раза. При этом отмечается сокращение номенклатуры ДСЕ, необходимых для изготовления СГ, с 20 наименований до 1.

Применение в производстве ЖРД АФ-технологий и КМ в конструкции ДСЕ позволяет разрабатывать принципиально новые схемы двигателей.

С учётом новой конструкции КС на рис. 2 представлена упрощённая пневмогидравлическая схема (ПГС) инновационного ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа. Для сравнения показана традиционная металлическая КС с регенеративным охлаждением.

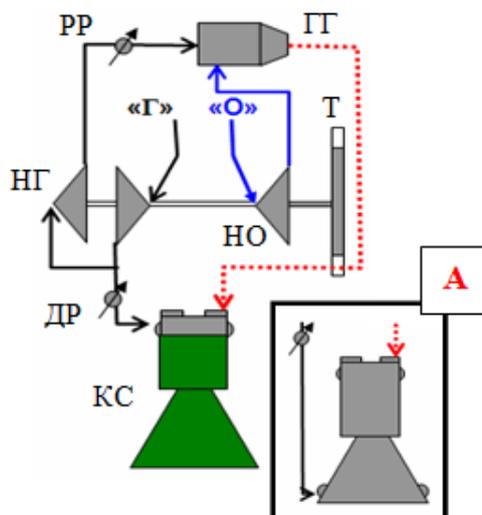


Рис. 2. Упрощённая ПГС инновационного ЖРД:
 КС – камера сгорания, ГГ – газогенератор, Т – турбина, НО – насос окислителя,
 НГ – насос горючего, ДР – дроссель, РР – регулятор

Данная схема ЖРД имеет следующие преимущества по сравнению с традиционной схемой:

1. Исключение регенеративного охлаждения (исключение потерь давления по линии горючего), что позволяет при сохранении температуры генераторного газа увеличить давление в камере сгорания до 30 МПа и выше.
2. Снижение массы за счёт использования КМ в конструкциях ДСЕ.
3. Обеспечение возможности форсирования режима работы на 33% от давления в КС.
4. Значительное снижение себестоимости серийного производства.

Основной недостаток вышеописанной ПГС – снижение удельного импульса на 5 с за счёт необходимости завесного охлаждения КС. Однако этот недостаток можно компенсировать за счёт повышения давления в камере сгорания на 10 – 20%.

Для выполнения проектных работ разработана математическая модель инновационного ЖРД, учитывающая:

- применение новой КС, изготовленной по перспективным технологиям;
- конструктивное объединение разнофункциональных агрегатов: дросселя с клапаном пуска горючего КС (применён шаровый кран с электроприводом) и регулятора с клапаном пуска горючего в газогенератор.

Для подтверждения концепции инновационного ЖРД согласно [4] проведены экспериментальные исследования на модельной КС, в которой реализована вышеописанная конструкция:

- моделирование технологий изготовления элементов ЖРД (по трудоёмкости);
- оценка технических параметров, полученных при огневых испытаниях (ОИ) моделей ЖРД, изготовленных по традиционной и инновационной технологиям.

Опытные камеры были изготовлены на основе чертежей твёрдотельной модели, выполненной в программном обеспечении SolidWorks, традиционным и инновационным способами производства.

Инновационная модельная камера создавалась на основе прототипа КС, установленной на стенде лаборатории кафедры № 11 филиала Военной академии имени Петра Великого в г. Серпухове (рис. 3).

Обе камеры работают на сжатом воздухе и керосине, имеют тягу 15 Н ($K_m = 14,8$). Модельная КС изготовлена с учётом инновационных технологий и имеет в своём составе СГ, выполненную по АФ-технологии (рис. 4), и цилиндр камеры с соплом, выполненным из УУКМ (рис. 5).



Рис. 3. Общий вид модельной камеры, выполненной по традиционной технологии



Рис. 4. Общий вид СГ модельной КС, выполненной по аддитивной технологии

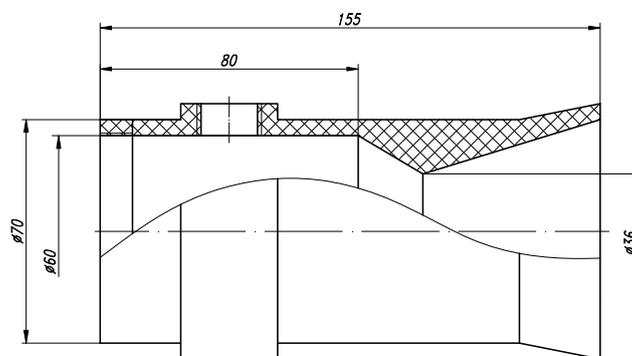


Рис. 5. Чертёж цилиндра модельной камеры с соплом, выполненного из УУКМ

Значения трудоёмкости производства модельных традиционной и инновационной камер сгорания приведены в табл. 1.

Таблица 1. Трудоёмкость изготовления модельных камер сгорания

Наименование ДСЕ	Трудоёмкость, н/ч	
	Традиционная	Инновационная
Смесительная головка		
Корпус СГ	4	10
Кольцо тракта охлаждения	2	
Сопловой штуцер	2,5	
Переходник	0,5	
Штуцер горючего	1	
Крышка СГ	4	
Штуцер окислителя	1	
Сборка (сварка)	8	
Цилиндр камеры с соплом		
Корпус камеры	39	8
Штуцер искровой свечи	1	
Сборка (сварка)	6	
Сборка		
Механическая сборка	0,5	0,5
Гидравлические испытания	0,5	0,5
Итого	70	19

Анализ данных, приведённых в табл. 1, показывает, что модельная КС, выполненная по инновационным технологиям, в 3,7 раза дешевле традиционной металлической (теоретические расчёты показали значение 3,5). Дополнительно можно отметить сокращение в три раза номенклатуры деталей, необходимых для изготовления модельной камеры: с 9 (традиционная) до 3 (инновационная) наименований.

Технические параметры, полученные при огневых испытаниях модельных КС, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Технические параметры модельных камер сгорания

Наименование, размерность	Значение	
	Традиционная	Инновационная
Тяга, Н	14	13 – 15
Удельный импульс, с	2750	2750
Время работы, с	45	45
Температура в КС, К	1200	1200
Давление в КС, МПа	20	20

Анализ данных, приведённых в табл. 2, показывает, что различия в значениях параметров модельных КС практически отсутствуют.

Необходимо отметить, что потеря массы композиционной камеры после ОИ составляет от 0,65 до 2,32 %, при этом эрозии и сколов КМ не обнаружено, а геометрические характеристики конструкции практически не изменились.

Проведённые эксперименты подтвердили, что модельная КС, имеющая в своём составе смесительную головку, изготовленную по аддитивной технологии, и цилиндр с соплом, изготовленный из композиционного материала, может полностью заменить камеру, созданную традиционным способом.

По результатам работы над концепцией инновационного ЖРД возникли следующие нерешённые вопросы:

- необходима разработка отечественной технологии получения гранул от 5 до 40 мкм хромоникелевых, титановых и коррозионно-стойких сталей, так как в Российской Федерации отсутствует производитель качественных гранульных материалов для промышленных аппаратов лазерного спекания металлов;
- отсутствие отечественных промышленных аппаратов лазерного спекания металлов (в особенности для получения крупногабаритных конструкций);
- необходимо изменение конструкции СГ с целью сокращения тупиковых зон, трубопроводов с малым диаметральным сечением и др., что может при производстве по АФ-технологии привести к случайному их заплавлению;
- изменение программ и методик проведения наземных ОИ ЖРД с композиционной камерой перед поставкой товарного двигателя на завод-изготовитель ракет.

Таким образом, получены следующие результаты:

- применение метода лазерного спекания металла и КМ в конструкциях агрегатов позволит значительно снизить производственные расходы;
- огневые испытания модельной КС, состоящей из СГ, выполненной по аддитивной технологии из никель-хромового сплава, и цилиндра камеры с соплом, изготовленного из УУКМ, подтвердили работоспособность агрегата, созданного на основе инновационных технологий.

Библиографический список

1. Публичный аналитический доклад по развитию новых производственных технологий. Сколково: Сколковский институт науки и технологий, 2014. 203 с.
2. Воробей В.В., Логинов В.Е. Технология производства жидкостных ракетных двигателей. М.: Московский авиационный институт, 2001. 496 с.
3. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1969. 547 с.
4. Жуковский А.Е., Кондрусев В.С., Левин В.Я., Окорочков В.В. Испытание жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1981. 199 с.

ASSESSMENT OF A LIQUID ROCKET ENGINE CONCEPT BASED ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES

© 2017

A. V. Solodovnikov Candidate of Science (Engineering), lieutenant colonel, lecturer;
Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great, branch in Serpukhov, Moscow Region, Russian Federation;
aleksey.solod@mail.ru

I. A. Akinshin Postgraduate student;
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;
24vano24@mail.ru

V. V. Golubyatnik Candidate of Science (Engineering), scientific consultant;
Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great, branch in Serpukhov, Moscow Region, Russian Federation;
Slava6123@rambler.ru

A. V. Krivonogov adjunct (postgraduate student);
Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great, branch in Serpukhov, Moscow Region, Russian Federation;
andreikrivonogov@mail.ru

Application of innovative methods of production such as additive technologies and use of composite materials in the engine primary structure is one of the promising directions of reducing the cost of production of liquid rocket engines. The purpose of the work is to assess an innovative engine concept with the mixing head made by an additive technology and the cylinder and nozzle made of a composite material. To solve the main tasks of the investigation we analyzed the available experience in introducing innovation production methods into aerospace engineering. A feasibility study of configurations of separate components manufactured by method of additive and traditional technologies was performed. According to the results of the validation firing of the model the operability of the new configuration was confirmed and the main engineering problems to be solved were determined. The results of the analysis of the innovation engine concept show a 3- or 4-fold reduction of labor intensity in serial production, as well as 3-6-fold reduction of the components variety required for a single assembly. In addition, it is necessary to note the 25% reduction of the item mass. The design modification makes it possible to provide the augmentation of engine operation up to 30% of nominal thrust.

Innovative technologies; rocket engines; composite materials.

Citation: Solodovnikov A.V., Akinshin I.A., Golubyatnik V.V., Krivonogov A.V. Assessment of a liquid rocket engine concept based on innovative technologies. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 2. P. 127-134. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-127-134

References

1. Public analytical report on the development of new production technologies. Skolkovo: Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), 2014. 203 p.
2. Vorobey V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Technology of manufacturing liquid rocket engines]. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 2001. 496 p.
3. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P. *Teoriya raketnykh dvigateley: uch. posobie* [Theory of rocket engines. Manual]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 547 p.
4. Zhukovskiy A.E., Kondrusev V.S., Levin V.Ya., Okorochkov V.V. *Ispytanie zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Testing liquid rocket engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 199 p.