

## Создание твердотопливных зарядов для ракетных двигателей твердого топлива с помощью аддитивных технологий

© С.С. Курдов, В.Е. Заволокин, М.А. Комков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Предложен новый метод производства твердотопливных зарядов для ракетного двигателя твердого топлива. Описаны основные положения, возможные проблемы создания 3D-принтера для печати твердотопливных зарядов для такого ракетного двигателя и их решение. Представлены концептуальный облик и блок-схема аппаратного обеспечения данного 3D-принтера. Рассмотрена конкретная модель твердотопливных зарядов такого ракетного двигателя для проведения экспериментальных работ при отработке технологии печати соответствующих зарядов. Рекомендуются иные области применения данной технологии производства высокоэнергетических зарядов.*

**Ключевые слова:** ракетные двигатели твердого топлива, аддитивные технологии, 3D-принтер, технологии ракетно-космического машиностроения, смесевое топливо

**Введение.** Твердотопливный заряд для ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) с максимальной кривизной профиля поперечного сечения может обеспечить максимальную тягу РДТТ. Современные технологии не позволяют реализовать сложные профили поперечного сечения твердотопливных зарядов вследствие ограничения по геометрическим и структурным параметрам формируемого топлива. В целях преодоления проблемы актуальность приобрели аддитивные технологии, используя которые можно создавать изделия сложной криволинейной формы. Разработка 3D-принтера, способного напечатать твердотопливный заряд для РДТТ, — один из вариантов ее решения для создания различных РДТТ исходя из энергетических характеристик и конкретных задач, предъявляемых заказчиком.

Современная технология производства полимерных видов твердого топлива для РДТТ имеет существенные недостатки, вызванные непосредственно способом изготовления шашек для них. Смесевое твердое топливо производят с применением литья (вакуумной заливки и литья под давлением) и прессования (проходного, глухого, штамповочного).

Реологический характер технологии литья твердотопливных шашек обуславливает возникновение объемной усадки и растрескивания изделия, ограничение его геометрических параметров вследствие

процесса полимеризации и охлаждения. К этим дефектам добавляются проблемы:

необходимость дополнительной оснастки в виде всевозможных вкладышей, манжет, уплотнительных колец, предохраняющих от попадания жидкой массы топлива в элементы стыковых соединений во время процесса литья и полимеризации;

усиление корпуса из-за необходимости выдерживать длительные внутренние нагрузки (до 30 сут) и, как следствие, его чрезмерное утяжеление;

потребность в средствах контроля процесса полимеризации и технологической оснастки формования каналов горения (игл, пальцев);

соблюдение герметичности изделия в ходе процесса полимеризации и после выпрессовки.

Прессование не обеспечивает однообразия эксплуатационных характеристик, а также ограничивает энергетику топлива нормами безопасности, вызванной условием обязательной механической обработки после запрессовки.

Самым главным минусом существующих технологий производства твердотопливного заряда, вне зависимости от процесса его формообразования, является ограниченность кривизны поперечного сечения профиля такого заряда, выраженная в минимизации энергетических характеристик РДТТ. Выполнение всего спектра задач привело к увеличению номенклатуры оснастки технологических процессов вследствие необходимости обеспечения различной кривизны профиля поперечного сечения заряда (под каждую задачу необходим свой), что влияет на организацию производства и его экономические показатели.

Все перечисленные особенности отрицательно влияют на развитие ракетостроения, в частности космонавтики.

Наиболее распространенным видом профиля заряда РДТТ в настоящее время является полый цилиндр с круглым отверстием по центру, характерным примером которого служит твердотопливный ускоритель Space Shuttle (рис. 1).

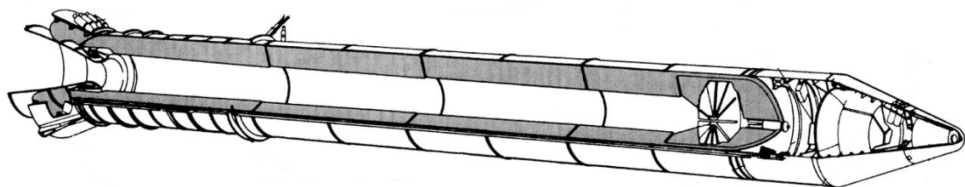


Рис. 1. Твердотопливный ракетный ускоритель Space Shuttle

Создание технологии 3D-печати твердотопливного заряда для РДТТ откроет возможность изготовления его более сложного профиля (рис. 2).

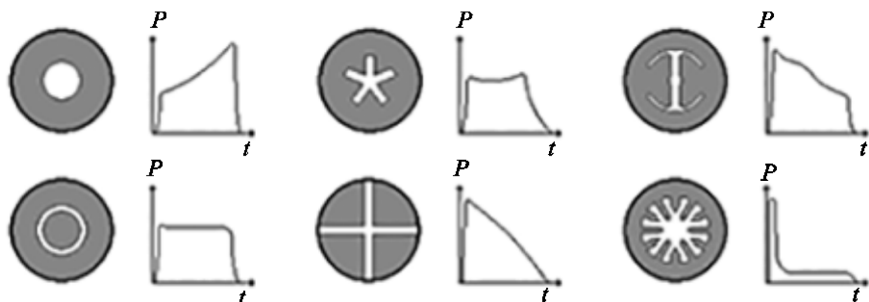


Рис. 2. Тяговые характеристики РДТТ различных профилей поперечного сечения

Данное решение уже существует: современные 3D-принтеры способны любую CAD-модель воплотить в материю с приемлемой степенью соответствия изготовленной детали заданным размерам и форме (рис. 3). Важно обеспечить возможность замены рабочего тела на такое, которое будет соответствовать рассматриваемой задаче.

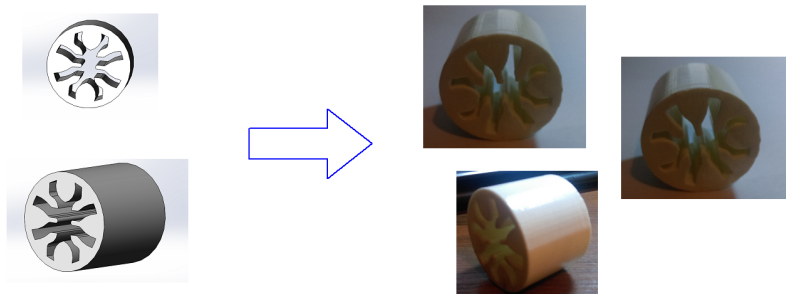


Рис. 3. Реализация CAD-модели

**Решение проблемы.** Развитие современных аддитивных технологий значительно расширило возможности индустриального производства. Применяя аддитивные машины послойного синтеза — 3D-печати, можно повысить технологичность производства при создании твердотопливного заряда и, что самое главное, увеличить их энергоемкость за счет усложнения криволинейности профиля поперечного сечения твердотопливного заряда. Возможность печати подобных зарядов позволит создавать РДТТ для конкретной миссии, выполнение которой будет обеспечено его специализированными тактико-техническими характеристиками.

Существующий ближайший аналог данной технологии представлен компанией Stratasys, которая смогла напечатать твердотопливный заряд в качестве горючего для гибридного ракетного двигателя [1].

Цель настоящей работы заключается в демонстрации теоретической модели автоматизированного метода аддитивного производства твердого ракетного топлива. Особенностью технологии в случае ее реализации является возможность использования топливной шашки сразу же после печати, а также перспективно высокая серийность.

В работе поставлена следующая задача: определить техническое решение для уже существующей технологии 3D-печати, которая позволяет создавать твердотопливный заряд на приемлемом уровне.

Практическая новизна работы состоит в возможности создания РДТТ с более высокими тяговыми характеристиками в силу увеличения площади горения заряда [2], а также в возможности универсализации производства РДТТ для различных задач.

**Основные положения.** Известно большое количество аддитивных технологий 3D-печати, которые в настоящее время никоим образом не классифицированы по какому-либо признаку в международном сообществе. Наиболее подходящей для данного проекта является технология FDM-печати (Fused Deposition Modeling) [3], однако специфичность изделия накладывает дополнительные меры безопасности, в частности необходимо минимизировать температуру нагрева рабочей массы, компенсировав параметры синтеза крепящим составом. Таким образом, задачей проекта является создание новой технологии 3D-печати, но на основе уже готовой технологии FDM-печати.

Вследствие простоты и безопасности в качестве экспериментальной, а в дальнейшем и рабочей модели для отработки технологии выступает карамельное топливо:  $\text{KNO}_3$  + сорбит [4]. Главным преимуществом такого вида топлива для отработки подобной технологии является возможность минимизации и контроля нагрева, что отвечает требованиям безопасности и благодаря этому позволит решить проблему взрывоопасности рабочей массы топлива во время синтеза порошка. Именно поэтому предлагается контролируемый локальный нагрев поступающей топливной массы вместе с клеевым синтезом с помощью теплового элемента, как это принято в стандартной технологии FDM-печати. В качестве связующего в РДТТ используют различные крепящие составы на основе полиуретанового раствора. Например, в данном случае можно использовать крепящий состав на основе полиэфируретанового каучука с концевыми эпоксиуретановыми группами ППГ-3А [5].

**Концептуальный облик.** Функционал принтера, его аппаратное обеспечение и технология подробно проиллюстрированы на блок-схеме (рис. 4). Последовательность процесса печати твердотопливо-

го заряда осуществляется по такому алгоритму: пользователь создает в системе автоматизированного проектирования 3D-модель, загружает ее в ЭВМ принтера, ЭВМ формирует управляющие сигналы для соответствующих контроллеров, которые и определяют механику процесса формирования твердотопливного заряда. Из накопителя калийной селитры ( $KNO_3$ ) и накопителя сахара через дозатор, который, согласно определенной заданной модели и контролируемый датчиками веса, высыпает смесь в миксер в соответствии со стехиометрическим соотношением. Далее крепящий состав подается в миксер, который смешивает все компоненты. Затем смешанная масса топлива попадает в тракт, где под давлением прессы и нагревания подвергается первичной формовке. Температура нагрева измеряется датчиками температуры и регулируется нагревательным элементом. Приводы

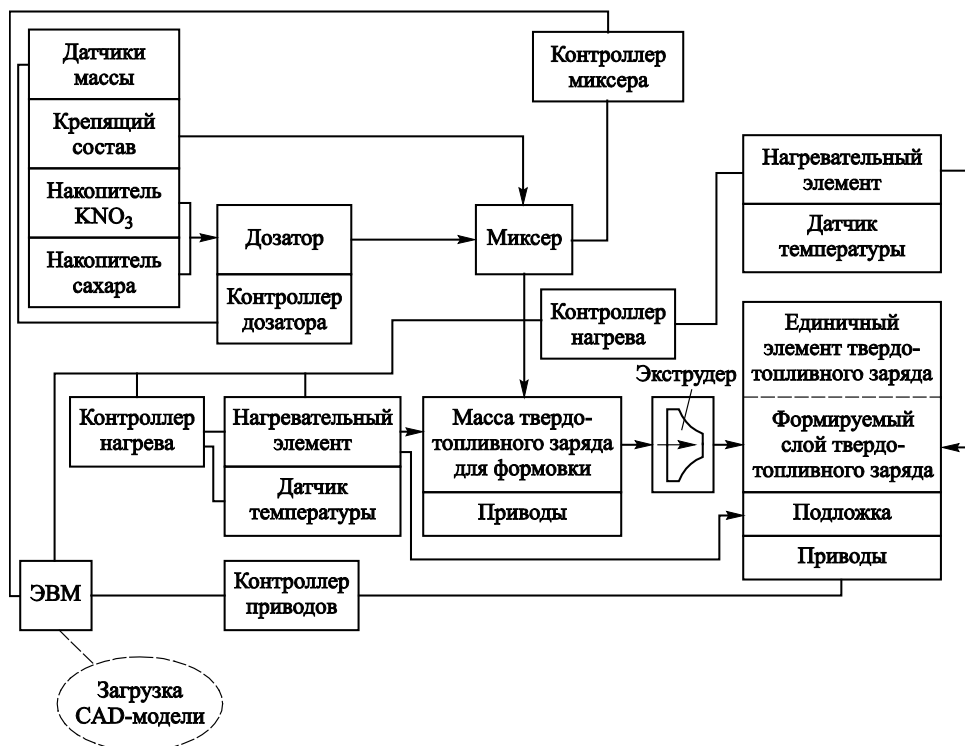


Рис. 4. Блок-схема 3D-принтера

перемещают тракт с массой топлива в требуемую точку по выстроенной ЭВМ траектории на основе заданной пользователем геометрии формируемого твердотопливного заряда, слой которого создается последовательно экструдером, точно размещающим массу топлива на подложке. Температура каждого формируемого слоя твердотопливного заряда регулируется контролем нагревательного элемента, рабо-

тающего точно так же, как и нагревательный элемент топливной массы, что обеспечивает стабилизацию процесса полимеризации.

Критически важной стороной данного проекта является необходимость предотвращения воспламенения топливной массы посредством контроля всей системы через сбор данных о рабочем процессе в реальном времени. Система контроля должна регистрировать давление и температуру в миксере, температуру на выходе форсунки экструдера, температуру выложенного слоя, скорость истечения крепящего состава и смешанной топливной массы, а также другие жизненно важные параметры, что в конечном итоге и определит как качество самого продукта, так и облик рабочей системы.

**Перспективы развития теории.** Для понимания необходимой конструкции принтера необходимо описать фазовые превращения топлива на протяжении всего процесса печати, а именно: описать поведение и свойства горючего в порошкообразном, расплавленном и полимеризованном состояниях, а также собрать данные испытаний для сравнения характеристик напечатанного твердотопливного заряда и полученного литьем. Контролируемые физические характеристики испытаний должны включать в себя такие параметры, как соответствие габаритов напечатанного твердотопливного заряда номинальным, предел прочности изделия при различных нагрузках, итоговую твердость материала и другие параметры. Для полноты опыта при наличии такой возможности следует провести термодинамический анализ полученного топлива, определив его энергетические характеристики, в частности энтальпию, а также анализ характерных зависимостей кривизны профиля поперечного сечения от тяги, как представлено на рис. 2.

**Иные области применения твердотопливного заряда.** Данная технология, позволяющая производить недорогие и в то же время сложно профилированные твердотопливные заряды, даст возможность решить некоторые сложные технические задачи современной космонавтики в долгосрочной перспективе, т. е. проблемы загрязнения орбиты космическим мусором, энергетического обеспечения проектов добычи полезных ископаемых на других планетах и астероидах, а также кометно-астероидной безопасности и обеспечения энергетической независимости автономных баз. Технология может быть полезной и в иных областях науки и техники, в том числе в создании экологически чистого топлива для твердотопливных котлов.

**Заключение.** Разработанные теоретические аспекты новой технологии создания твердотопливных зарядов РДТТ на основе аддитивного метода позволяют повысить энергетические характеристики РДТТ и усовершенствовать производственный процесс. Основные научные положения и блок-схема 3D-принтера, способного печатать

твердотопливные заряды РДТТ, подтверждают обоснованность технического решения и возможность его реализации. Достигнутый результат позволит и в дальнейшем развивать теоретические разработки и создавать новые экспериментальные модели твердотопливного заряда РДТТ.

Рассмотренные конкретные модели твердотопливных зарядов применимы в иных отраслях промышленности и сферах жизнедеятельности человека.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jones R. Hybrid Rocket Engines Use Additive Manufacturing to Combine the Advantages of Solid and Liquid Propellants. *Stratasys*. URL: <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/aerospace/rocket-crafters> (дата обращения: 10.01.2017).
- [2] Ягодников Д.А., Андреев Е.А., Эйхенвальд В.Н., Козлов В.А. *Основы проектирования ракетных двигательных установок на твердом топливе*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 168 с.
- [3] *Fused deposition modeling (FDM)*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_deposition\\_modeling](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling) (дата обращения 10.01.2017).
- [4] *Карамельное ракетное топливо*. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Карамельное\\_ракетное\\_топливо](https://ru.wikipedia.org/wiki/Карамельное_ракетное_топливо) (дата обращения 10.01.2017).
- [5] Сидоров О.И., Поисова Т.П., Хайруллин З.Я., Паршина Е.И., Метелёв А.И., Самойленко А.Ф., Милехин Ю.М., Меркулов В.М., Банзула Ю.Б., Капитонов А.В., Парфенова Н.Н. *Способ изготовления прочно скрепленного с корпусом ракетного двигателя заряда смесового ракетного твердого топлива*. Пат. 2374213 Российская Федерация, МПК С06В 21/00, С09D 175/04, С06D 5/06. № 2008129339/02, заявл. 18.07.2008; опубл. 27.11.2009, бюл. № 33, 13 с.

Статья поступила в редакцию 13.01.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Курдов С.С., Заволокин В.Е., Комков М.А. Создание твердотопливных зарядов для ракетных двигателей твердого топлива с помощью аддитивных технологий.

*Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1629>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.*

**Курдов Сильвестр Сергеевич** — студент кафедры «Технология ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер КБ «Салют». e-mail: [ksylvestr@yandex.ru](mailto:ksylvestr@yandex.ru)

**Заволокин Владислав Евгеньевич** — студент кафедры «Технология ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, технический переводчик и специалист по оборудованию ООО «Robert Bosch». e-mail: valdman8@mail.ru

**Комков Михаил Андреевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 130 научных работ по технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: cm12@sm.bmstu.ru



## Manufacturing of propellant grains for solid rocket motors using additive technology

© S.S. Kurdov, V.E. Zavolokin, M.A. Komkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper considers the development of a propellant grain with the maximum cross-section curvature for SRM, which would provide maximum SRM thrust. However, modern propellant grain production technologies cannot enable the production of complex cross-section propellant grains due to existing geometrical and structural parameters of the fuel. It sidelines modern space engineering. Additive technologies make it possible to produce complex curve shaped items. The development of 3D-printer capable of printing the propellant grain for SRM would allow producing SRM with different power characteristics depending on customer's preferable tasks. In our work we introduce a new technology for producing the propellant grain for SRM. Moreover, we describe some fundamental principles and potential problems of producing 3D-printer for printing the propellant grain for SRM. We also suggest the ways to solve the problems and give the printer conceptual image and its hardware flowchart. In order to carry out tests on fine-tuning technologies of printing the relevant propellant grain, we analyze a specific model of the propellant grain for SRM. Finally, we propose other fields of application for the high-energy propellant grain technology.*

**Keywords:** solid rocket motor, additive technology, 3D-printer, rocket-space engineering, rocket-space technology, mixed fuel

### REFERENCES

- [1] Jones R. Hybrid Rocket Engines Use Additive Manufacturing to Combine the Advantages of Solid and Liquid Propellants. *Stratasys*. Available at: <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/aerospace/rocket-crafters> (accessed January 10, 2017).
- [2] Yagodnikov D.A., Andreev E.A., Eykhenvald V.N., Kozlov V.A. *Osnovy proektirovaniya raketnykh dvigatelnykh ustanovok na tverdom toplive* [Design principles of solid fuel rocket propulsion systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 168 p.
- [3] *Fused deposition modeling (FDM)*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_deposition\\_modeling](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling) (accessed January 10, 2017).
- [4] *Karamelnoe raketnoe toplivo* [Caramel rocket fuel]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Карамельное\\_ракетное\\_топливо](https://ru.wikipedia.org/wiki/Карамельное_ракетное_топливо) (accessed January 10, 2017).
- [5] Sidorov O.I., Poisova T.P., Khayrullin Z.Ya., Parshina E.I., Metelev A.I., Samoylenko A.F., Milekhin Yu.M., Merkulov V.M., Banzula Yu.B., Kapitonov A.V., Parfenova N. N. *Sposob izgotovleniya prochnoskrepennogo s korpusom raketnogo dvigatelya zaryada smesevogo raketnogo tverdogo topliva* [Method of manufacturing a firmly fastened rocket-motor case rocket engine of composite propellant grain propellant]. Patent RF, no. 2008129339/02, 2009, bul. no. 33, 13 p.

**Kurdov S.S.**, student, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, engineer, Design Bureau Salyut.  
e-mail: ksylvestr@yandex.ru

**Zavolokin V.E.**, student, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University; technical interpreter, equipment specialist, Robert Bosch Ltd. e-mail: valdman8@mail.ru

**Komkov M.A.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include technology of space-rocket engineering. e-mail: cm12@sm.bmstu.ru