

**СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ
ПАСТООБРАЗНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
ДЛЯ ПРЯМОТОЧНЫХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
РАКЕТНЫХ И АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ**

**THE STATE AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF PASTE-LIKE FUEL
COMPOSITIONS FOR RAMJET ENGINES OF ROCKET AND ARTILLERY SYSTEMS**

*Чл.-корр. РАРАН В.Ю. Мелешко¹, чл.-корр. РАРАН Г.Я. Павловец¹,
А.И. Гладышев², А.С. Булавский¹*

¹Военная академия РВСН им. Петра Великого, ²Президиум РАН

V. Yu. Meleshko, G.Ya. Pavlovets, A.I. Gladyshev, A.S. Bulavsky

Представлен краткий анализ состояния исследований по разработке газогенерирующих топлив для ракетных прямоточных двигателей ракетных и артиллерийских систем. Рассмотрена возможность использования пастообразных топливных композиций (ПТК) для прямоточных воздушно-реактивных двигателей боеприпасов и ракет с внутриатмосферной зоной эксплуатации, обладающих повышенной баллистической эффективностью. Предложены концептуальные положения для научно-технического обоснования направлений формирования перспективных рецептур ПТК и феноменологическая модель их горения.

Ключевые слова: ракетно-прямоточный двигатель, пастообразные топливные композиции, рецептура, ультра- и нанодисперсные горючие.

A brief analysis of the state of research on the development of gas-generating fuels for rocket ramjet engines of rocket and artillery systems is presented. The possibility of using paste-like fuel compositions (PFC) for ramjet engines of ammunition and missiles with an intra-atmospheric zone of operation with increased ballistic efficiency is considered. The conceptual provisions for the scientific and technical substantiation of the directions of the formation of promising formulations of PFC and a phenomenological model of their gorenje are proposed.

Keywords: rocket-ramjet engine, paste-like fuel compositions, formulation, ultra- and nanodisperse fuels.

Развитие средств вооруженной борьбы на современном этапе требует решения задач по разработке качественно новых и более эффективных образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) в целях парирования возможных научно-технических прорывов вероятного противника и угроз национальной безопасности.

Одним из приоритетных направлений существенного повышения эффективности раз-

личных видов ракетных и артиллерийских систем с внутриатмосферной зоной эксплуатации является применение в качестве энергосиловых установок твердотопливных прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД). Наиболее эффективными из ПВРД считаются ракетные двигатели с газогенераторной схемой — ракетно-прямоточные двигатели (РПД) [1–4]. При сравнительной простоте РПД имеют высокие значения удельного импульса в широком диа-

пазоне высот и скоростей полета. Применение твердотопливных ПВРД позволяет за счет использования забортного воздуха в качестве основного окислителя и рабочего тела увеличить дальность полета ракет и снарядов в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными ракетными двигателями твердого топлива (РДТТ) при тех же габаритно-массовых характеристиках.

РПД с регулируемым режимом работы позволяют управлять тяговыми характеристиками и вектором движения ракет. Тем самым обеспечивается эффективность применения ракет, для которых предполагается маневрирование по траектории полета, а также многоразовость запуска и выключения РПД. РПД отличаются от ПВРД тем, что являются двухконтурными. Первый контур — это газогенератор (ГГ), работающий на газогенерирующем твердом топливе (ГТТ) с большим избытком горючего ($\alpha = 0,1 \div 0,2$). Второй контур — это камера дожигания (КД), где поступающие из первого контура продукты неполного сгорания взаимодействуют с воздухом и затем истекают через основное сопло двигателя, создавая тягу.

Для повышения энерговооруженности в таких двигателях применяются ГТТ с высоким содержанием (до 50–70%) металлических горючих, вводимых в его состав в виде тонкодисперсных порошков. На ранних этапах развития РПД в ГТТ использовались магний и алюминий, современные же топливные композиции с повышенной энергетической эффективностью создаются на базе бора и его соединений (например, с использованием диборидов алюминия, полиборидов магния) [5–7].

Энергетический потенциал твердого топлива для РПД характеризуется: удельной массовой теплотой сгорания (H_u), плотностью топлива (ρ_r), удельным импульсом продуктов сгорания ($I_{уд}$). Бор характеризуется высокой массовой и объемной теплотами сгорания — $H_u = 58953$ кДж/кг, $H_v = 129697$ кДж/дм³, соответственно. Однако у бора имеется серьезный недостаток — его продукты неполного сгорания склонны к процессу шлакообразования в камере газогенератора, что не позволяет полностью реализовать энергетический потенциал топлива, так как не обеспечивается достаточно полный вынос продуктов неполного сгорания из камеры газогенератора [8–10]. Масса шлаковых остатков может составлять до

60 % от массы топлива [8]. Это обстоятельство требует поиска специальных «активаторов» горения или конструктивных решений. Возможные варианты активации бора — использование соединений бора, а именно сплавов (таких как бориды титана, алюминия, магния). Кроме того, по материалам исследований [7], частицы соединений бора при попадании на стенку камеры сгорания «прилипают» к ней и их горение прерывается. Исходя из этого, для обеспечения максимальной полноты сгорания и, соответственно, эффективности РПД необходимо минимизировать вероятность контакта конденсированных частиц со стенкой камеры сгорания (КС). Кроме того, частичная замена бора на его сплавы (полибориды металлов) как правило, снижает теплоту сгорания. Повышение полноты сгорания металлических горючих может быть обеспечено путем их объемного или поверхностного модифицирования, частично снижающего качество металлических горючих и повышая их стоимостные показатели [11, 12]. Иными словами, повышение полноты сгорания за счет активации бора, приводит к снижению энергетики топлива, что требует оптимизации рецептуры топлива и поиска альтернативных конструктивных решений.

Следует отметить, что конкурирующими, с одной стороны, и дополняющими друг друга, с другой стороны, являются ГТТ на основе пиротехнических и смесевых твердых топлив (ПТТ и СТТ) для РПД с пониженным коэффициентом обеспеченности окислительными элементами [13–17]. Учитывая, что оба типа топлив должны содержать в качестве высокотеплотворного горючего бор или его соединения, их недостатки, обусловленные недогоранием горючего, имеют одну и ту же природу.

В то же время, анализ существующих и перспективных образцов ракетно-артиллерийского вооружения, функционирующих в экстремальных условиях повышенных перегрузок [18, 19], свидетельствует о возросшем интересе как у нас в стране, так и за рубежом к комбинированным двигательным установкам на основе РПД, на пастообразных топливных композициях (ПТК) для артиллерийских боеприпасов и ракет с внутриатмосферной зоной эксплуатации, обладающих повышенной баллистической эффективностью [20, 21].

ПТК, представляющие собой седиментационно устойчивые высококонцентрированные эмульсии, обладающие тиксотропными свойствами и сохраняющие физико-химическую стабильность и вязкотекучее состояние в заданном температурном диапазоне эксплуатации, на сегодняшний день не нашли применения в изделиях военной техники. Вместе с тем, их использование позволяет решать целый ряд практических задач для обеспечения повышенных тактико-технических характеристик, например, ракетных прямооточных или прямооточных воздушно-реактивных двигателей и ракетно-артиллерийских систем вооружения [22]. Использование ПТК в ракетных двигателях и газогенераторах позволяет управлять тяговыми характеристиками и вектором движения ракет [22–24], осуществлять многократное изменение (до 80 раз) энергетических параметров при регулировании [25].

Такие топлива допускают достаточно широкий диапазон изменения соотношения компонентов состава, что позволяет эффективно решать задачи создания рецептур топлив, обеспечивающих высокий удельный импульс тяги РПД с очень высокой или очень малой скоростью горения. Благодаря этому можно снизить габариты двигателя в рамках поставленной задачи или увеличить полный импульс тяги в тех же габаритах, в сравнении с твердым ракетным топливом (РТ), у которого присутствуют определенные ограничения, связанные с использованием отвержденных зарядов с регламентируемыми массогабаритными характеристиками.

ПТК могут заполнять и принимать любую форму камеры сгорания (КС), в процессе изготовления условных «зарядов» из них не требуются процедуры отверждения и прессования под давлением, что снижает затраты на производство и повышает его безопасность [26].

Следует отметить, что в современной научно-технической и патентной литературе приводится целый ряд технических решений, касающихся конструкции ракетных двигателей и артиллерийских снарядов различного назначения с использованием ПТК [27–33]. Это свидетельствует о широком спектре областей использования ПТК (рисунок)

В тоже время, публикаций по рецептурному построению ПТК и способам регулирования их основных характеристик крайне мало. Первые попытки создания рецептур ПТК относятся к 60-м годам прошлого века в Государственном институте прикладной химии, но широкого распространения они не получили в связи с малой изученностью их свойств и недостаточной востребованностью таких разработок. В последующем делался целый ряд попыток рецептурного построения ПТК [22, 24]. При этом основное внимание уделялось обеспечению реологических характеристик и повышению седиментационной устойчивости ПТК.

Наиболее успешными следует признать работы ФГУП «СКТБ «Технолог», где были разработаны составы ПТК на основе хлорнокислого связующего, проведены их обширные исследования по влиянию компонентной базы с различными металлами на процесс горения. Получены законы скорости горения топлив с помощью установки высокого давления и произведено их уточнение на модельном ракетном двигателе. Получены скорости горения ПТК от 17 до 130 мм/с при давлении 10 МПа. К числу достаточно совершенных рецептур также следует отнести рецептуру, описанную в работе, содержащую порошок бора или смесь порошков боридов алюминия с содержанием 34–62 % алюминия, при этом средний размер частиц порошков составляет 60–350 нм. В качестве дисперсионной

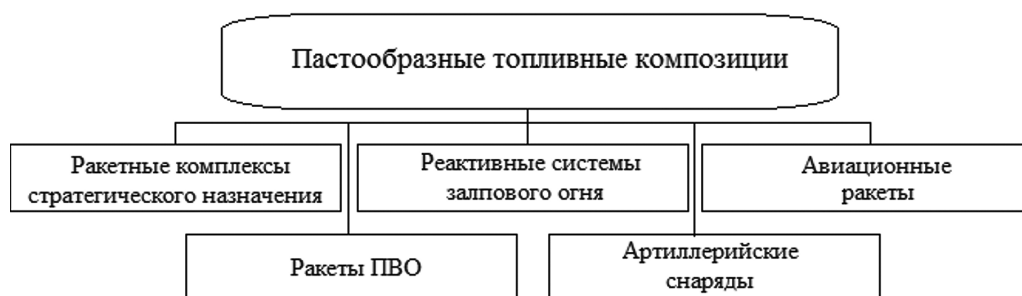


Рис. Области применения ПТК в ВВСТ

фазы использовался растворитель децилин общей формулы $C_{10}H_{16}$, загущенный полиэтиленом в количестве 2–10 %. В качестве окислителя использовался перхлорат аммония в количестве 15–35 %.

В рамках существующей методологии разработки энергетических конденсированных систем до настоящего времени отсутствовала строгая система взглядов на рецептурное построение ПТК в целом и, в частности, на унификацию компонентной базы и физико-химические принципы управления процессом горения ПТК на основе ультра- и нанодисперсных компонентов, включая регулирование скорости горения, её зависимости от давления и полноты диспергирования первичных продуктов горения.

В основу научно-технического обоснования направлений формирования перспективных рецептур ПТК предложены концептуальные положения, включающие необходимость использования при формировании рецептур ПТК относительно дешевых и доступных компонентов, имеющих отечественную производственную и сырьевую базу, обеспечивающих повышение энергомассовых и эффективное регулирование баллистических характеристик ПТК.

При выборе основных компонентов для формирования ПТК различного функционального назначения необходимо руководствоваться как общими требованиями к ним, так и возможностями обеспечения ряда специальных свойств ПТК, в том числе седиментационной устойчивости, тиксотропности, пониженной летучести пластификаторов, термической стабильности, пониженной чувствительности к внешним воздействиям, экономичности. В этих целях при формировании пастообразных рецептур для РПД значимым является содержание жидковязкого связующего (ЖВС) в пределах от 15 до 25 %, позволяющее совместно с ультра- и нанодисперсными горючими (УНДГ), в качестве которых применяют порошки бора, смесь порошков боридов алюминия (средний размер частиц порошков составляет 60–350 нм), полученные методом переконденсации в плазменном электродуговом реакторе, и сажи (средний размер частиц 3–5 нм), полученные методом пиролиза углеводородов, обеспечить седиментационную устойчивость ПТК и тиксотропные свойства. При использовании окислителя следует

ограничиться его содержанием 20–35 % в ПТК, поскольку при более высоком его содержании значительно снижаются энергомассовые характеристики, а при более низком не обеспечиваются воспламенение и устойчивое горение.

Установлено, что на уровень скорости горения ПТК во всём исследованном диапазоне давлений значительное влияние оказывает природа твердофазного горючего. Наибольшей устойчивостью горения в широком диапазоне скоростей характеризуются образцы ПТК, содержащие ультрадисперсный алюминий. При этом наибольшее влияние на скорость горения оказывает ферроценсодержащий модификатор горения, снижающий температуру начала интенсивного разложения окислителя.

Максимальный эффект в регулировании показателя ν в законе горения ПТК и полноты диспергирования обеспечивается путем использования комбинации управляющих факторов, состоящей, как минимум, из двух «регуляторов». Один из них должен активировать процесс термолитического разложения окислителя в сторону снижения температуры начала его интенсивного разложения. Другим «регулятором» выступает уровень реакционной активности горючих, способных вступать во взаимодействие с продуктами термолитического разложения окислителя в конденсированной фазе волны горения со значительным тепловыделением и газообразованием.

При выборе способа регулирования скорости горения ПТК определяющим является коэффициент обеспеченности окислительными элементами α , а также природа и дисперсность окислителя и твердофазного горючего.

Предложена феноменологическая модель горения ПТК, объясняющая влияние продуктов термолитического разложения окислителя на процессы тепловыделения в конденсированной фазе и диспергирования первичных продуктов горения во вторичную камеру РПД. Суть модели заключается в том, что стационарное горение поддерживается суммарно экзотермическими реакциями в конденсированной фазе при отсутствии тепловых потоков из зоны первичных продуктов горения ПТК, при этом взаимодействие продуктов разложения окислителя с компонентами топлива определяется реакционной активностью твердофазного горючего и продуктов пиролиза компонентов ЖВС с образованием газообразных и конденса-

рованных первичных продуктов взаимодействия окислителя и горючего, и выходом первичных продуктов горения во вторичную камеру с доокислением кислородом воздуха. Наличие модификаторов в ПТК приводит к интенсификации процесса термоллиза окислителя и взаимодействия продуктов его разложения с горючими в конденсированной фазе за счёт увеличения поверхности контакта.

Выбор комбинации регулирующих факторов, обеспечивающих требуемые значения уровня скорости горения и ее относительной чувствительности к давлению, следует проводить по показателю максимальной баллистической эффективности при выполнении требований к другим характеристикам разрабатываемых ПТК.

Сформулированные направления формирования перспективных рецептур ПТК позволяют формировать рецептуры ПТК с высокими энергомассовыми и требуемыми баллистическими характеристиками.

Кроме того, такие ПТК содержат минимальное количество токсичных, легко испаряющихся компонентов и не обладают высокой коррозионной активностью. Указанные положительные свойства ПТК делают их наиболее предпочтительными для использования в регулируемых РПД широкого спектра назначения.

В качестве примера в таблице приведены характеристики предлагаемого варианта состава ПТК на основе полиальфаолефина, загущенного полиизобутиленом с нанодисперсным диборидом алюминия по сравнению с ранее предлагавшимся наиболее совершенным составом.

Немаловажной является проблема сохранения качества горючих порошков с размером частиц менее 1 микрона и разрушения агломератов при смешении твердофазных компонентов рецептуры при применении в качестве дисперсионных сред компонентов связующих, входящих в состав ЖВС, и достижения максимальной степени наполнения коллоидных паст дисперс-

ной фазой. Это обусловлено склонностью частиц УНДГ к агломерации и коагуляции (слипанию и укрупнению частиц), что препятствует их равномерному распределению в структуре полимерной матрицы энергетических конденсированных систем (ЭКС). Экспериментальные исследования показали, что данная проблема решается созданием диффузионного барьера, препятствующего окислению активного металла на этапе получения порошков и подготовки их к применению.

Вместе с тем, в силу определенных свойств ПТК, двигатель на пастообразном топливе имеет и ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании РПД:

- ПТК обладает определенной текучестью, и заряд склонен к изменению формы и растеканию под действием гравитационных и других сил. Это обуславливает необходимость обеспечения капсуляции заряда ПТК до начала горения;

- пастообразное топливо имеет коэффициент объемного расширения, в 5–10 раз превышающий его значения для смесевых ТРТ. Учитывая то, что ПТК должно находиться в герметизированном объеме, необходимо обеспечить возможность как расширения массы ПТК при нагревании, так и безотрывную его усадку при охлаждении. В последнем случае необходимо создать в массе ПТК постоянные внутренние напряжения, обеспечивающие неразрывность среды. Для отслеживания «зеркала» массы ПТК необходимо иметь «подвижную» стенку в оболочке заряда. Для создания сжимающих усилий в ПТК может использоваться компенсатор температурных усадок, совмещающий «подвижную» стенку и силовой элемент.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что ПТК могут рассматриваться как потенциальные энергетические материалы для повышения энергомассовых характеристик широкого спектра систем ракетного и артиллерийского вооружения, так как позволяют обеспечить

Таблица

Характеристики составов ПТК

Характеристики	Значения характеристик	
	прототип	предлагаемая ПТК
Плотность, кг/дм ³	1,499	1,640
Объемная теплота сгорания, ккал/дм ³	12000	17100

высокое содержание энергоёмких компонентов, регулирование расходно-тяговых характеристик, повысить полноту сгорания компонентов, улучшить диспергируемость конденсированных продуктов сгорания в камере дожигания и высокую плотность. Немаловажным достоинством ПТК является возможность использования только отечественной компонентной базы, обеспечивающей относительно низкую стоимость зарядов по сравнению с другими типами топливных композиций. Это позволяет считать разработку ПТК перспективным направлением совершенствования энергоёмких газогенерирующих топлив путём повышения степени реализации энергоёмких и оптимизации энергобаллистических характеристик составов.

При этом следует учитывать, что на сегодняшний день объём проведенных, преимущественно инициативных, исследований в рамках формирования научно-технического задела представляется недостаточным для постановки работ по использованию ПТК в конкретных системах вооружения. Это обуславливает необходимость проведения комплекса исследований за счет финансирования из государственного бюджета и, вследствие объективного риска, в рамках долгосрочных федеральных программ.

Литература

1. Дулепов Н.П., Котенков Г.К., Яновский Л.С. Методология проектирования малообъемных прямоточных двигателей с регулируемым расходом и составом твердых топлив // Вестник Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. 1999. Вып. 4. С. 86–91.

2. Сорокин В.А. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах / В.А. Сорокин, Л.С. Яновский, Е.В. Суриков и др. — М.: Физматлит. 2010. 320 с.

3. Александров В.Н. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах / В.Н. Александров, В.М. Быцкевич и др. — М.: Академкнига. 2006. 343 с.

4. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Ягодников Д.А. и др. Проектирование и отработка ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе: учебное пособие. Под общей редакцией В.А. Сорокина. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. 317 с.

5. Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верховоломов В.К., Граменицкий М.Д., Дулепов Н.П., Скибин В.А., Суриков Е.В., Хилькевич В.Я., Яновский Л.С. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах (Основы теории и расчета) / под ред. Л.С. Яновского. — М.: ИКЦ «Академкнига». 2006. 343 с.

6. Обносков Б.В., Сорокин В.А., Яновский Л.С., Ягодников Д.А., Францкевич В.П., Животов Н.П., Суриков Е.В., Кобко Г.Г., Тихомиров М.А., Шаров М.С. Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе / под ред. В.А. Сорокина. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. 303 с.

7. Воронежский А.В. Метод сравнительной оценки эффективности горения мелкодисперсного конденсированного горючего в камерах РПД произвольной геометрии // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 01. С. 10–37.

8. Федорычев А.В., Жестерев Д.В., Гусев С.А., Мишкин И.Р. Исследование шлакообразования в камере газогенератора ракетно-прямоточного двигателя. Труды ФЦДТ «Союз». 2018. № 3. С. 205–207.

9. Мееров Д.Б. Исследование процесса агломерации при горении борсодержащих составов / Мееров Д.Б., Моногаров К.А., Брагин А.А., Фролов Ю.В., Пивкина А.Н., Шишов Н.И., Бестужева Т.А. Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН. ФГУП ФЦДТ «Союз» // Горение и взрыв. 2015. Т. 8. № 2. С. 211–217.

10. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение пиротехнических составов на основе микро- и наночастиц диборида алюминия в воздушном потоке в двухзонной камере сгорания / Ягодников Д.А., Воронежский А.В., Сарабьев В.И. // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 3. С. 51–58.

11. Белов Е.Г., Бурдикова Т.В., Коробков А.М. Анализ методов модификации твердых веществ для энергонасыщенных материалов / Научная сессия. Аннотации сообщений. — Казань. Издательство КНИТУ. 2017. С. 281–281.

12. Гусев С.А., Милехин Ю.М., Матвеев А.А. Научно-методический подход к выбору модификаторов горения для топлив с быстрогорящими окислителями. Материалы Всерос. конф. по ЭКС. 2000. С. 19–26.

13. Пиротехнические газогенерирующие составы и генераторы низкотемпературных газов / В.И. Сарабьев, С.Н. Вагонов, И.В. Тартынов, А.И. Шабунин // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2005. № 3 (44). С. 38–45.
14. Шабунин А.И., Сарабьев В.И., Емельянов В.Н. Исследование пиротехнических систем для твердотопливных низкотемпературных газогенераторов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Теория и практика современного ракетного двигателестроения. 2004. С. 130–136.
15. Шабунин А.И. Исследование характеристик первичного горения модельных пиротехнических композиций на основе комбинированного горючего для ракетно-прямоточных двигателей / Шабунин А.И., Хрисанов М.В., Емельянов В.Н., Сарабьев В.И., Калинин С.В., Валяев В.А. // Сб. трудов восьмой Всероссийской конференции «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOS 2014)». 2014. С. 311–317.
16. Ерохин Б.Т. Обоснование выбора топлива для гибридного ракетно-прямоточного воздушно-реактивного двигателя / Ерохин Б.Т., Шаталин Д.Ю. // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2011. № 1. С. 41–48.
17. Синдицкий В.П. Исследование горения топлив на основе перхлората аммония с низким коэффициентом избытка окислителя / Синдицкий В.П., Чёрный А.Н., Марченков Д.А. // Химическая физика и мезоскопия. 2012. Т. 14. № 4. С. 519–524.
18. Павловец Г.Я., Мелешко В.Ю., Бурдикова Т.В., Константинова М.А., Булавский А.С. Направления формирования энергоёмких композиций, функционирующих в условиях перегрузок. Материалы Всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий», МЦАИ РАН. 2018. С. 371–377.
19. Кэрт Б.Э., Знаменский Е.А., Кравцов В.О., Панченко А.В., Чубасов В.А. Расчетная оценка баллистических возможностей артиллерийских снарядов с ракетно-прямоточными двигателями // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 2 (117). С. 125–133.
20. Павловец Г.Я., Мелешко В.Ю., Бурдикова Т.В., Константинова М.А., Булавский А.С. Перспективы разработки пастообразных энергоёмких композитов для средств поражения // Сб. трудов XXII научно-практ. конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Том 1. Вооружение и военная техника. НПО СМ — РАРАН. — Санкт Петербург. 2019. С. 117–121.
21. Буренок В.М., Чижевский О.Т., Иванов К.М., Кэрт Б.Э., Знаменский Е.А., Чубасов В.А. // Некоторые перспективные направления развития боеприпасов и выстрелов. Часть I. Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1 (116). С. 82–93.
22. Устименко Е.Б., Шиман Л.Н., Подкаменная Л.И. Высокоэнергетические композиции для ракетных двигателей и газогенераторов с регулируемым режимом работы. Системы озброєння і військова техніка. 2010. № 2 (22). С. 170–173.
23. Иванченко А.Н. Состояние разработки дросселируемых ракетных двигательных установок на унитарном пастообразном топливе / А.Н. Иванченко, С.Г. Бондаренко // Проблемы высокотемпературной техники. 2007. С. 40–50.
24. Ахтырский М.В., Бабук В.А., Нарыжный С.Ю., Фоменко В.В. Ускорение процесса горения пастообразного ракетного топлива // В сборнике: Молодежь. Техника. Космос. Труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции. Вестник БГТУ Военмех. 2018. № 49. С. 35–39.
25. Иванченко А.М. Особливості ракетної рушійної установки на пастоподібному паливі / А.М. Иванченко // Косм. наука і технологія. 1999. Т. 5. № 4. С. 3–10.
26. Авдиенко А.А., Григорьян С.С., Фингин А.Е. Рабочие процессы и проектирование ракетных двигателей на пастообразном топливе. СВВКИУ ракетных войск им. А.И. Лизюкова. — Саратов. 1996. 124 с.
27. RU № 2418971 C1. 2011.
28. RU № 2526000 C1. 2014.
29. RU № 187256 U1. 2019.
30. RU № 187258 U1. 2019.
31. RU № 193992 U1. 2019.
32. RU № 124730 U1. 2013.
33. RU № 151217 U1. 2015.