

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ПОРОШКООБРАЗНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ГОРЮЧЕМ

©2011 А. Г. Егоров, А. С. Тизилов

Тольяттинский государственный университет

Рассмотрены перспективы создания двигательных установок на порошкообразном металлическом горючем.

Порошкообразное металлическое горючее, псевдожидкое топливо, алюминиево-воздушная смесь, двигательная установка, энергетическая установка, дисперсный алюминий.

Если до настоящего времени порошкообразные металлы успешно использовались в качестве добавок к горючему в гидрореагирующих и смесевых твердотопливных композициях для твердотопливных ракетных двигателей (РДТТ), гидрореагирующих двигателей (ГРД), ракетных прямоточных двигателей (РПД), прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД), то в скором будущем они могут быть использованы как основное горючее в прямоточных гидро- и воздушно-реактивных двигателях.

В течение нескольких последних десятилетий постоянно расширяется область практического использования металлов (алюминий, бор, магний и др.), с помощью которых можно повысить энергетические и улучшить эксплуатационные характеристики двигательных установок (ДУ), а также разработать новые технологические процессы высокого уровня. В качестве порошкообразного металлического горючего одним из наиболее доступных металлов является алюминий (Al).

Преимущество металлосодержащих топлив, заключающееся в их высокой температуре пламени и легкости хранения, предполагает применение порошкообразных металлов в качестве одного из компонентов псевдожидкого топлива для двигателей летательных аппаратов и специальных энергетических установок. Псевдожидкое топливо (или его компонент), состоящее из порошкообразных веществ, можно флюидизировать газом по методу кипящего слоя и подавать в камеру сгорания ракетного двигателя аналогично жидкому компоненту [1].

Обладая большой теплотой сгорания и высокой плотностью, порошкообразные металлы способны существенно увеличить такие важные характеристики двигательных установок и изделия в целом, как удельный импульс и коэффициент массового совершенства, а также обеспечить большую взрыво- и пожаробезопасность.

При одной и той же массе и габаритах прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД) на псевдожидком топливе при полете летательного аппарата (ЛА) на высоте 30 км со скоростью 5М позволит увеличить дальность полета по сравнению РДТТ в 25...50 раз, РПД на твердом топливе (ТРТ) - 5...15 раз [2].

На рис. 1 представлена диаграмма объемных импульсов тяги для разных типов двигателей и разных топлив.

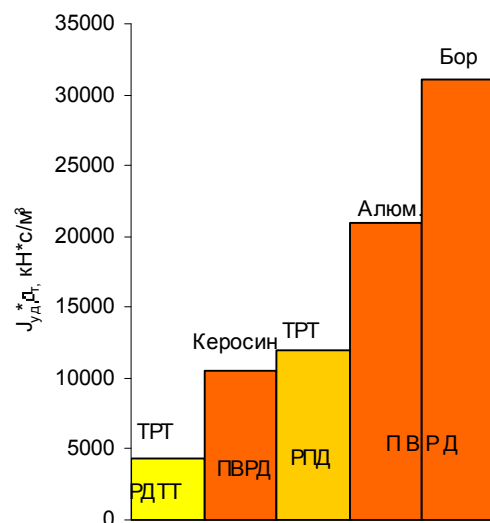


Рис. 1. Диаграмма объемных импульсов тяги для разных типов двигателей и разных топлив [2]

Применение порошкообразного алюминия в качестве основного горючего продолжает оставаться актуальным для широкого спектра отечественных и зарубежных ракетных двигателей. Отмечается возросший интерес к проблемам использования алюминия в качестве компонента ракетного топлива в связи с активизацией программ по освоению Луны и Марса и перехода их на качественно новый уровень.

На Международной конференции «Ракетные двигатели и проблемы их применения для освоения космического пространства» был сделан доклад и представлен аппарат для исследования Марса и спутников Юпитера. На рис. 2 показана схема ракетного двигателя на порошкообразном металлическом горючем (ПМГ) данного космического аппарата.

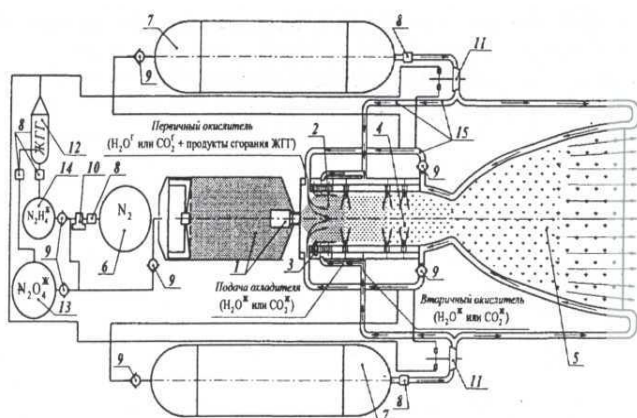


Рис. 2. Схема ракетного двигателя на ПМГ [3]:

- 1 – система подачи порошкообразного горючего;
- 2 – форкамера; 3 – воспламенитель; 4 – камера сгорания; 5 – сопло; 6 – газовый баллон; 7 – бак окислителя; 8 – пускоотсечный клапан; 9 – обратный клапан; 10 – редуктор давления; 11 – турбонасосный агрегат; 12 – двухкомпонентный жидкостный газогенератор (ЖГГ); 13 – бак окислителя ЖГГ;
- 14 – бак горючего; 15 – трубопроводы

Двигательная установка (ДУ) на топливе Al – CO₂ может использоваться на первой ступени и ДУ на транспортируемом с Земли топливе – на второй ступени. Оснащение посадочных ступеней межпланетных ЛА двигателями такого типа даст возможность увеличить объем научных исследований без существенного увеличения экономических затрат по сравнению с двигателями, все топливо для которых транспортируется с Земли [3].

Реализация проектов по созданию новых высокоэффективных двигательных установок во многом зависит от успешного решения задачи организации рабочего процесса в камере сгорания. Применение порошкообразного металлического горючего в камерах сгорания реактивных двигательных и энергетических установок неизбежно ведет к усложнению процесса гетерогенного горения конденсированных частиц металла в потоке оживающего агента. Это в конечном счете потребует расширения знаний о процессах воспламенения, горения и стабилизации пламени порошкообразных металлов в высокоскоростном турбулентном потоке окислителя и решения практических инженерных задач, заключающихся в создании топливных систем, получении высокотемпературных материалов и т.д. Все это стимулирует постановку научных изысканий, охватывающих целый комплекс проблем, касающихся исследования основных закономерностей процессов воспламенения, горения и стабилизации пламени в турбулентном потоке псевдожидкого топлива.

Создание двигательных и энергетических установок, в которых порошкообразные металлы являются источниками энергии, связано с разработкой надежных систем топливоподачи и организацией устойчивого рабочего процесса в камере сгорания.

По аналогии с жидким горючим, смесеобразование диспергированного твердого горючего в потоке газообразного окислителя является исходным процессом, который развивается во входном участке камеры. Его назначение – создавать горючую смесь при соответствующем распределении твердой и газовой фаз по сечению камеры.

Смесеобразование должно удовлетворять ряду требований. Основные из них – обеспечение высокого значения удельного импульса и устойчивой работы двигателя. Для этих целей необходимо, с одной стороны, обеспечить достаточно однородную смесь компонентов топлива по соотношению и расходонапряженности по площади камеры сгорания при требуемом качестве распыливания. Эти факторы способствуют высокой полноте сгорания топлива, однородности

и стабильности поля температур продуктов сгорания.

Увлекаемые потоком частицы должны по возможности равномерно распределяться по заданному объему камеры (иногда стараются создавать большее обогащение или обеднение горючим отдельных зон потока). Процессы смесеобразования развиваются в «холодном» участке камеры протяженностью 100...600 мм (для разных систем организации сгорания). Время пребывания частиц диспергированного твердого горючего на «холодном» участке невелико (5...20 мс) и недостаточно для завершения полного перемешивания горючего с воздухом.

В настоящее время накоплен большой теоретический и практический материал по теории распыла и смесеобразования жидких топлив. Однако в отличие от жидких топлив в настоящее время не существует полноценных теорий по распылу металловоздушных факелов и расчету форсунок для подачи псевдожидких топлив. Поэтому наверняка многим специалистам в области горения порошкообразных металлов приходилось сталкиваться с серьезными теоретическими и конструктивными проблемами при разработке системы подачи, которая бы удовлетворяла необходимым требованиям.

Один из вариантов надежной и регулируемой подачи ПМГ в камеру сгорания двигательной установки представлен в [3].

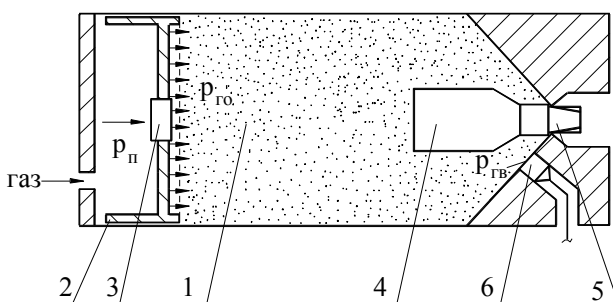


Рис. 3. Схема организации регулируемой подачи металлического порошка [3]:

- 1 – ёмкость с порошком, 2 – проницаемый для газа поршень, 3 – перепускной клапан, 4 – привод, 5 – запорно-регулирующий клапан, 6 – датчик давления газа перед выпускным отверстием

Сгорание псевдожидкого топлива, поступающего в камеру ПВРД или РПД, в общем случае будет определяться, с одной стороны, условиями диффузионного перемеши-

вания порошка с воздухом, а с другой – кинетическими характеристиками горения частиц металла. Для подавляющего большинства случаев при сгорании псевдожидкого топлива в камерах сгорания ПВРД и РПД процесс дожига в воздухе в основном будет определяться диффузионным перемешиванием топливной струи с воздухом. Поэтому при разработке двигательных установок для летательных аппаратов на псевдожидком топливе необходимо уделять особое внимание процессу смешения ПМГ с воздухом для достижения максимальной полноты сгорания при ограниченных геометрических параметрах камеры.

Установление закономерностей процессов топливоподачи, смешения, воспламенения, стабилизации горения и сгорания металловоздушных смесей с учетом всех факторов, влияющих на эти процессы - многоплановая и, пожалуй, наиболее сложная задача в теории прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей.

Новые виды двигательных и энергетических установок на ПМГ отличаются широким диапазоном изменения режимных параметров, например давления, соотношения компонентов в камере сгорания, дисперсности частиц металла и т.д. Их влияние на основные характеристики рабочего процесса необходимо знать для максимальной реализации преимуществ ПМГ. В [4] представлен научно-информационный комплекс характеристик воспламенения и горения порошкообразных металлических горючих для проектирования и отработки реактивных двигательных установок и технологических процессов.

Большую практическую значимость имеет решение проблемы изменения свойств самого металла, поскольку существуют ограничения (связанные с большими значениями температур плавления и кипения металлов, например *Al* и *B*, а также с наличием на их поверхности защитной оксидной пленки), не позволяющие в максимальной степени реализовать энергетический потенциал ПМГ.

Модификация ПМГ дает возможность существенно интенсифицировать рабочий процесс в двигательных установках, однако проводимые в этом направлении работы ну-

ждаются в надежном теоретическом обосновании и оптимизации характеристик модифицированных ПМГ применительно к конкретным условиям их применения. Результаты экспериментов показали [4], что капсулирование частиц ПМГ никелем приводит к увеличению значений скорости распространения пламени в 2-3,5 раза в диапазоне изменения коэффициента избытка окислителя 0,2-0,54.

Поскольку с уменьшением радиуса частиц уменьшается период индукции воспламенения, применение мелкодисперсного ПМГ на основе АСД-4 по сравнению с АСД-1 приводит к увеличению значений скорости распространения пламени в аэровзвесах как исходных частиц алюминия, так и капсулированных.

К концу XX века в военно-промышленном комплексе (ВПК) накоплен большой практический опыт по разработке технологий высокого уровня. Широкое внедрение последних достижений ВПК в гражданские отрасли производства является логически необходимым с точки зрения макроэкономических задач. В качестве примера можно привести разработку средств пожаротушения мелкодисперсным аэрозолем и ингибирующими компонентами, генерируемыми при горении твердого топлива; устройств сверхзвуковой резки; установок сверхзвукового напыления защитных и восстанавливающих покрытий; синтез ультрадисперсных оксидов металлов.

Многие металлы (алюминий, магний, цирконий, титан и др.) при горении в активных газах (кислороде, азоте, диоксиде углерода или их смесях) образуют конденсированные продукты сгорания (оксиды, нитриды, карбиды). Если горение этих металлов происходит в виде газозвеси металлических частиц, то продукты их сгорания получают в газодисперсной форме. Изменяя условия горения (давление, температуру, состав газовой фазы, концентрацию дисперсной фазы), дисперсный и химический состав исходных порошков металлов, можно влиять на форму и структуру частиц продуктов сгорания, их размер, химический и фазовый состав. Обеспечив высокую химическую чистоту исходного порошкообразного металла и газообразного окислителя, можно обеспечить вы-

сокую химическую чистоту конечного продукта. Таким образом, сжигая распыленные в активном газе порошкообразные металлы, в технологической установке можно синтезировать новые порошковые материалы с заданными свойствами. Процессы горения металлов являются сильноэкзотермическими, протекают при высокой температуре и с большими скоростями. При этом для осуществления процессов не требуется дополнительная энергия. Такие технологии являются перспективными, экономически выгодными и позволяют получить продукты высокого качества при высокой производительности. На рис. 4 приведена схема устройства для синтеза нанодисперсных порошков.

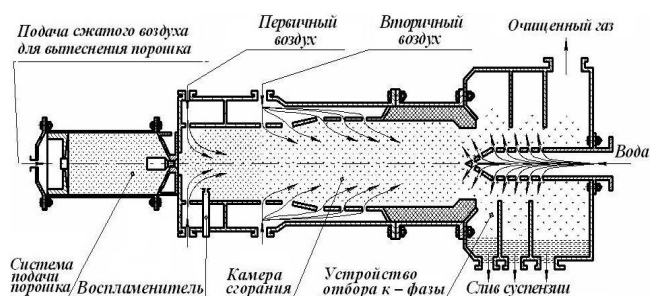


Рис. 4. Схема устройства для синтеза нанодисперсных порошков [3]

особенностью данной технологии является высокая производительность при низких затратах энергии, а также высокая степень дисперсности синтезируемых порошков. На рис. 5 приведен график дифференциального распределения частиц по размерам на примере исходного порошка алюминия [3].

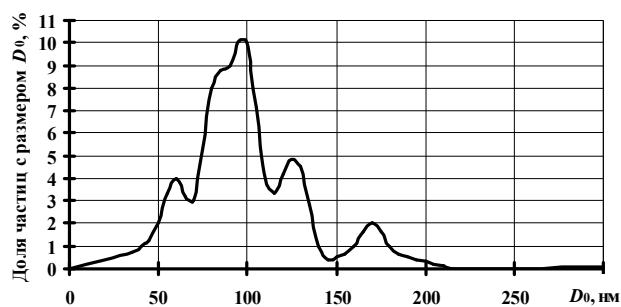


Рис. 5. Дифференциальное распределение частиц по размерам

В настоящее время выявлены основные параметры, определяющие совершенство рабочего процесса в двигателях и энергетических установках на порошкообразном алюминии (Al), а именно: скорость распростра-

нения пламени, температура воспламенения, а также время и полнота сгорания частиц алюминия. Тем не менее созданные на сегодняшний день научно-информационные комплексы характеристик воспламенения и горения порошкообразного Al для проектирования и отработки реактивных двигателей и энергетических установок нельзя считать исчерпывающими [5].

Схемы организации рабочих процессов в камерах сгорания реактивных двигателей и энергетических установок на псевдожидком топливе должны проектироваться с учетом физико-химических свойств металлов, используемых в качестве порошкообразных металлических горючих (ПМГ). Соответственно, для оптимизации внутрикамерных процессов необходимо создание математических моделей с учетом свойств металлов, рециркуляции, образования большого числа вероятных продуктов реакции, температурной, скоростной и химической неравновесности, реально отражающих процессы в прямоточных камерах сгорания. Также требуются эффективные методы и средства управления процессами тепло- и массообмена, горения и стабилизации пламени в потоке псевдожидкого топлива.

Библиографический список

1. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин - М.: Машиностроение, 1980. - 533 с.
2. Петренко, В.И. ПВРД порошкообразных металлических горючих - перспективное направление улучшения баллистических характеристик управляемых ракет [Текст] / В.И. Петренко, В.И. Малинин // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: материалы III Всерос. науч. конф. - Томск: ТГУ, 2002. - С. 94 - 98.
3. Малинин, В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих [Текст] / В.И. Малинин - Екатеринбург-Пермь: Изд-во УО РАН, 2006.- 262с.
4. Ягодников, Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов [Текст] / Д.А. Ягодников - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.- 432 с.
5. Егоров, А.Г. Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах реактивных двигательных установок [Текст] / А.Г. Егоров - Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2004.- 375 с.

PROSPECTS AND PROBLEMS OF MOVEMENT AND POWER PLANTS IN POWDER METAL FUEL

©2011 A. G. Egorov, A. S. Tizilov

Togliatti State University

The possibility of improving the energy characteristics of missile systems by the use of powdered metal powder as the main fuel in a ramjet engine and their basic dignity.

Powdered metal fuel, pseudoliquid fuel, aluminum-air mixture, propulsion, power plant, dispersed aluminum.

Информация об авторах

Егоров Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор Тольяттинского государственного университета. Тел.: (8482) 54-64-37. E-mail: eag@tltsu.ru. Область научных интересов: ракетные двигатели.

Тизилев Андрей Сергеевич, аспирант Тольяттинского государственного университета. Тел.: (8482) 53-93-29. E-mail: andrewtizilov@mail.ru. Область научных интересов: ракетные двигатели.

Egorov Alexander Grigorevich, doktor of technical sciences, professor of Togliatti State University. Phone: (8482) 54-64-37. E mail: eag@tltsu.ru. Area of research: Rocket Engine.

Tizilov Andrei Sergeevich, postgraduate of Togliatti State University. Phone: (8482) 53-93-29. E -mail: andrewtizilov@mail.ru. Area of research: Rocket Engine.