

04, апрель 2016

УДК 621.452.22

Исследование рабочих процессов в ракетно-прямоточном двигателе на твёрдом топливе

Копытин И.Н., выпускник
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные двигатели»

Русский О.А., инженер
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»
Россия, г. Москва, ул. Онежская, д. 8

Научный руководитель: **Воронецкий А.В.**, д.т.н, профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Ракетные двигатели»,
voron@bmstu.ru

Современные ракетно-прямоточные двигатели (РПД) на твёрдом топливе (ТТ) имеют существенно большие значения удельного импульса по сравнению с ракетными двигателями на твердом топливе (РДТТ) благодаря использованию заборного воздуха в качестве окислителя. В связи с этим крайне важны исследования рабочих процессов таких двигателей. В частности, одним из основных на сегодняшний день направлений исследований в области проектирования РПД является повышение эффективности рабочих процессов, в частности за счет оптимизации схемных решений и геометрии двигателя.

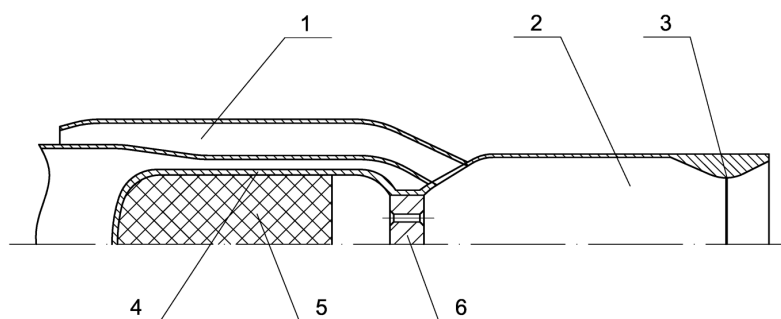


Рис. 1. Принципиальная схема РПД: 1 – воздухозаборное устройство;
2 – камера сгорания; 3– сопловой блок; 4 – газогенератор;

5 – заряд твёрдого топлива, 6 – сопловой блок газогенератора

Принципиальная схема РПД представлена на рис. 1. РПД включает в себя воздухозаборное устройство (1), камеру сгорания (2), сопловой блок (3), газогенератор (4), заряд твёрдого топлива (5), и сопловой блок газогенератора (6). Образующиеся в ГГ продукты неполного сгорания твердого топлива истекают через сопловой блок газогенератора (СБГГ) в камеру сгорания (КС). В КС они смешиваются и взаимодействуют с атмосферным воздухом, поступающим туда через воздухозаборное устройство (ВЗУ). Догоревшая смесь истекает из соплового блока (СБ), создавая реактивную силу.

Газодинамическая схема двигателя оказывает существенное влияние как на эффективность процессов в камере сгорания, так и на интегральные характеристики летательного аппарата в целом. В данной работе под газодинамической схемой двигателя будем понимать сочетание конфигурации ВЗУ с конфигурацией каналов СБГГ. При выборе газодинамической схемы РПД одним из базовых параметров является количество, расположение и форма воздухозаборных устройств. Ни одна из существующих в настоящее время конструкций ВЗУ не является универсальной. Выбор типа ВЗУ зависит от множества внешнебаллистических факторов и не является предметом анализа в данной работе.

Большое влияние на процессы, происходящие в камере сгорания, оказывает и геометрия соплового блока газогенератора. При этом наиболее важными являются такие конструктивные факторы, как количество и расположение каналов, по которым продукты газогенерации поступают в КС.

Стоит отметить, что методы расчёта рабочих процессов в узлах РПД, в настоящее время проработаны недостаточно. Современные алгоритмы проектирования, приведённые как в отечественной, так и в иностранной литературе, носят, часто, теоретический характер и не имеют эмпирических подтверждений. В то же время, за последнее десятилетие очень большое развитие получили пакеты численного моделирования газодинамических и термодинамических процессов. В данной работе для исследования внутрикамерных процессов РПД применён пакет численного моделирования газодинамических задач ANSYS Fluent.

В качестве объектов исследования рассмотрены две камеры сгорания малогабаритных РПД (рис. 2). Компоновка ВЗУ одинакова: применяются два ВЗУ, расположенные в нижней части корпуса ракеты симметрично относительно вертикальной

плоскости и с углом между их продольными плоскостями 90° . Цилиндрические КС имеют одинаковую длину.

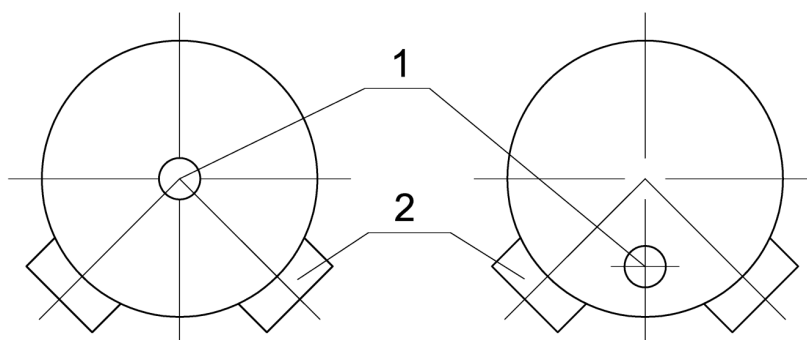


Рис. 2. Принципиальные схемы исследуемых камер сгорания РПД:

1 – сопло СБГГ; 2 – входы ВЗУ

Исследуемые РПД отличаются геометрией соплового блока ГГ. Оба сопловых блока имеют по одному каналу для истечения продуктов газогенерации. В первом варианте (условное обозначение «90-В») канал СБГГ расположен соосно с камерой сгорания. Во втором схемном решении (условное обозначение «90-Н») канал смещен вниз (рис. 2).

Для сравнения эффективности рассматриваемых компоновочных решений проведено моделирование рабочих процессов в камере сгорания. Значительную часть (до 60% массы) продуктов газогенерации современных РПД составляет конденсированные частицы горючего. Попадание частиц к-фазы в пристеночную зону КС может отрицательно сказаться на процессе их воспламенения и горения. Под действием поперечных потоков возможно высаживание этих частиц на стенках КС и даже их затухание. В связи с этим, для оценки эффективности рабочих процессов в КС необходимо в обязательном порядке проводить моделирование поведения конденсированных частиц.

Упрощенная расчётная схема РПД приведена на рис. 3. При расчётах использовались следующие допущения:

- сечение каналов СБГГ – круг;
- скорость потока продуктов газогенерации на входе в КС – сверхзвуковая;
- сечение камеры сгорания – круг;
- сечение каналов подачи воздуха – прямоугольник;
- скорость воздуха на входе в КС – дозвуковая.

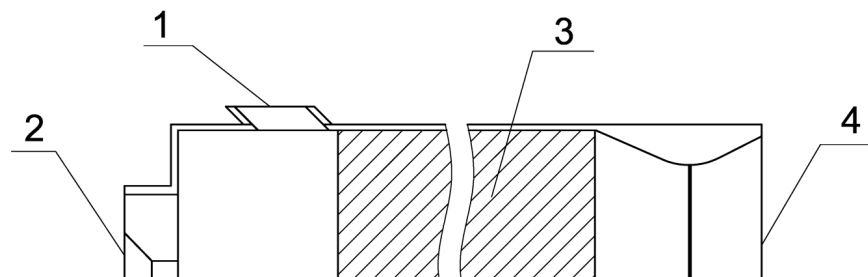


Рис. 3. Расчётная схема РПД: 1-сечение подачи воздуха; 2- сечение подачи газогенераторного газа; 3- зона распределённого теплоподвода; 4-выходное сечение (атмосфера)

В расчётах были приняты следующие условия и упрощения:

- в КС поступают 2 компонента: воздух и продукты газогенерации;
- воздух – идеальный газ;
- продукты газогенерации – равновесная смесь идеального газа и конденсированных частиц;
- химические реакции отсутствуют;
- для имитации горения в части пространства КС осуществляется объёмный теплоподвод, эквивалентный тепловому эффекту реакций горения Q (см. рис.3);
- истечение происходит в воздушную среду с давлением, эквивалентным давлению на высоте полёта;
- теплообмен со стенками отсутствует;
- модель турбулентности RSM (Reynolds Stress Model);
- влияние внешних факторов (гравитации и т.п.) – отсутствует.

Для получения характеристик газообразных продуктов газогенерации был произведён термодинамический расчёт процессов в газогенераторе для типового состава ТТ. Применительно к КС рассматривалось горение на режимах, близких к предполагаемым полётным режимам РПД данного класса. Массовое соотношение компонентов в КС принято равным 14-15 (согласно данным [1]), что соответствует коэффициенту избытка воздуха 2,5. Характеристики всех компонентов, используемые при моделировании, сведены в таблицу. При этом под рабочим телом понимается смесь двух идеальных газов: воздуха и газообразных продуктов газогенерации.

Компонент	Молярная масса, г/моль	Плотность	Теплоёмкость, Дж/кг*К	Коэффициент динамической вязкости, Па*с	Коэффициент теплопроводности, Вт/м*К
Газообразные продукты газогенерации (При условиях в ГГ: P=2 МПа, T=2020 К)	18	идеальный газ	2300 (const)	$5,7 \cdot 10^{-5}$	0,1
Воздух (При условиях в КС: P=0,5 МПа, T=1850 К)	28	идеальный газ	1300 (const)	$6,1 \cdot 10^{-5}$	0,1
Рабочее тело (смесь)	-	-	закон смешения по массовым долям	$6 \cdot 10^{-5}$ (const)	0,1 (const)

Одним из наиболее перспективных наполнителей для газогенераторных топлив на сегодняшний день является бор и его соединения. По материалам [1], частицы соединений бора при попадании на стенку камеры «прилипают» к ней и их горение прерывается. Исходя из этого, для получения максимальной полноты сгорания и, соответственно, эффективности РПД необходимо минимизировать вероятность контакта конденсированных частиц со стенкой КС.

По материалам [3], сгорание частиц бора диаметром 37мкм в сухом воздухе происходит приблизительно за 13-16 мс. При этом частицы диаметрами от 15 до 40 мкм имеют примерно одинаковый механизм химического взаимодействия с окружающим воздухом. Время их сгорания зависит от отношения массы к площади горения, что позволяет в первом приближении считать его пропорциональным диаметру. В данном исследовании моделировалось движение сферических частиц постоянного диаметра (24 мкм). Ориентировочное минимальное время пребывания подобных частиц в КС РПД, необходимое для обеспечения высокой полноты их сгорания, можно оценить как:

$$t_{24} = \frac{24}{32} \cdot t_{32} = \frac{24}{32} \cdot 13 = 9,75 \text{ с},$$

где t_{24} и t_{32} - времена горения частиц диаметрами 24 и 32 мкм соответственно.

По материалам [4], частицы конденсированной фазы оказывают влияние на поток газа в случае, если их объёмная доля превышает 5%. В исследуемых случаях даже при

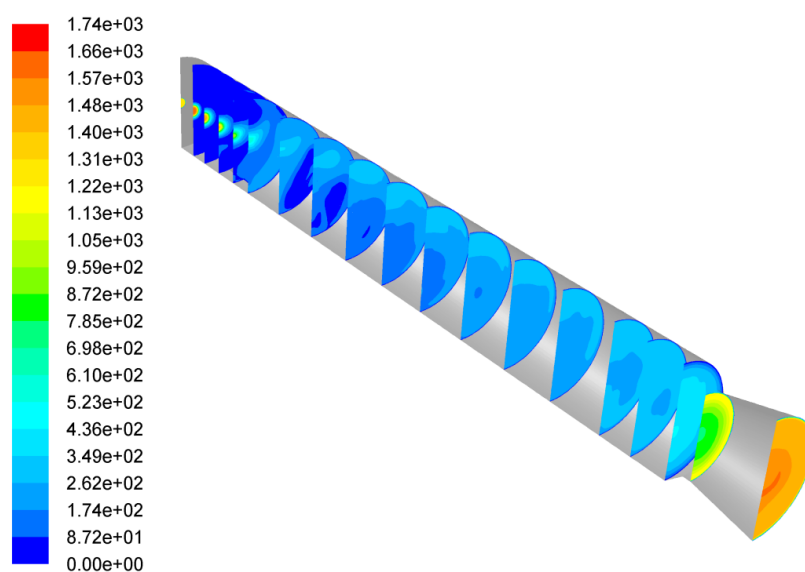
массовом содержании к-фазы более 60% (в продуктах газогенерации) её объёмная доля в камере сгорания значительно меньше 5%, что позволяет исключить из расчёта данный фактор. Такая постановка значительно упрощает модель, и позволяет анализировать поведение частиц после решения газовой задачи.

При моделировании поступления в КС частиц конденсированной фазы принимались следующие допущения:

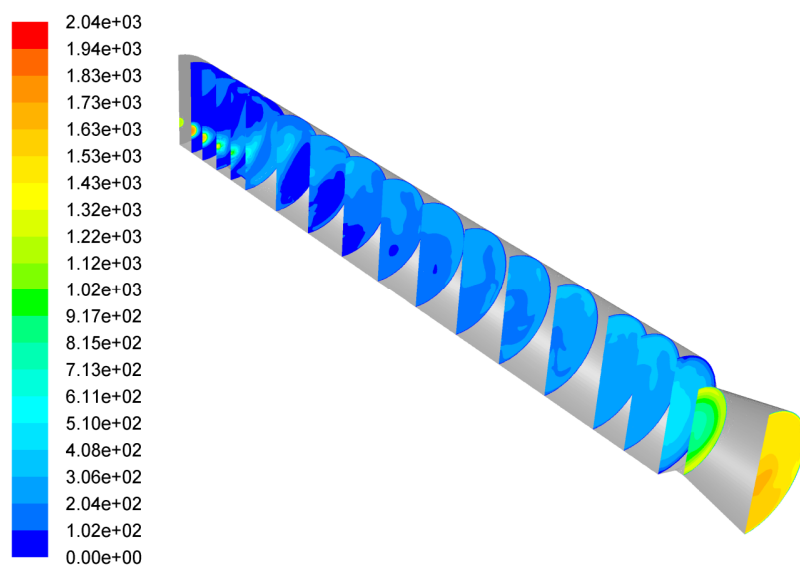
- частицы сферические с равными диаметрами;
- ввод частиц осуществляется в сечении подачи газогенераторного газа (эпюра скоростей равномерная);
- частицы инертны;
- частицы не взаимодействуют между собой;
- объёмная доля частиц мала;
- при попадании частицы на стенку КС происходит абсолютно неупругий удар (частица «прилипает»).

В результате моделирования были получены распределения основных параметров, приведённые на рисунках (рис. 4 ...7).

По распределениям скоростей (рис. 4) потока видно, что схема «90-Н» имеет меньшую, чем схема «90-В», равномерность потока в КС. В тоже время, на входе в сопло поток стабилизируется и практически равномерен в обеих схемах. Концентрация газообразных продуктов газогенерации (рис. 5) в каждой из схем значительно выше в верхней части КС, что объясняется «нижним» подводом воздуха. Данная особенность может отрицательно сказаться на процессах горения.

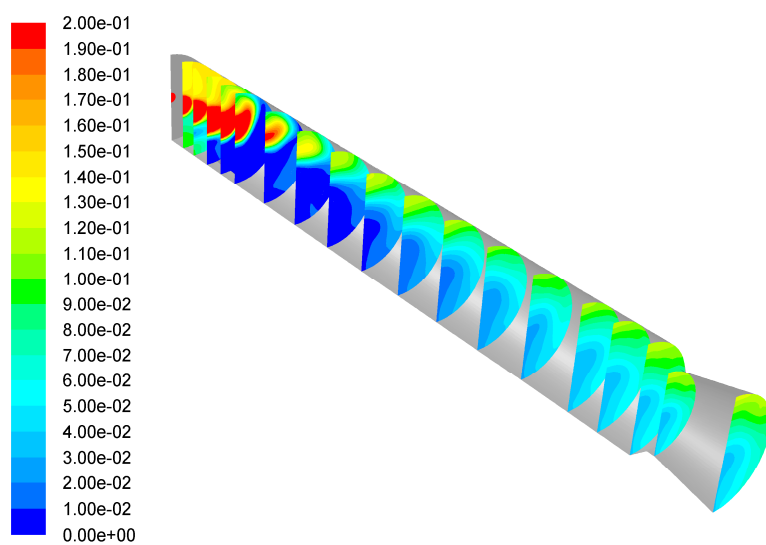


а)

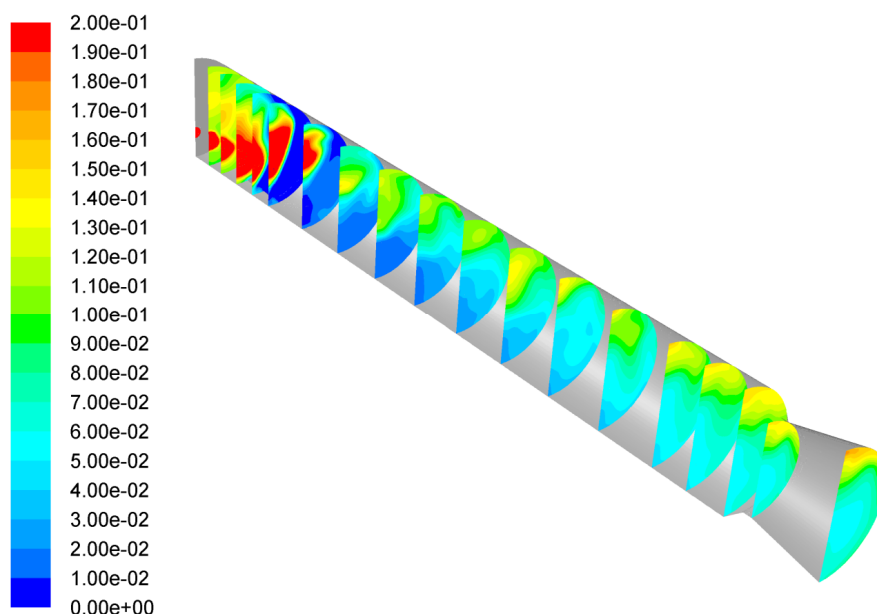


б)

Рис. 4. Распределения скоростей потока (м/с) по сечениям КС
для схем «90-В» (а) и «90-Н» (б)



а)



б)

Рис. 5. Распределения относительных массовых концентраций газообразных продуктов газогенерации для схем «90-В» (а) и «90-Н» (б)

Наиболее эффективно горение будет происходить в зонах, окрашенных в зеленый цвет (рис.5), где соотношение компонентов близко к стехиометрическому (концентрация продуктов газогенерации соответствующая стехиометрическому соотношению компонентов равна 0,125). Как видно по распределению, основная область горения газообразных веществ будет смещена в верхнюю часть КС при обеих схемах организации рабочего процесса. В тоже время, в камере сгорания «90-Н», зона горения будет более «размытой» по сечению. Кроме того, в двигателе, соответствующем схеме «90-В», область максимального тепловыделения будет находиться ближе к стенке КС, что может привести к увеличению теплового потока в конструкцию.

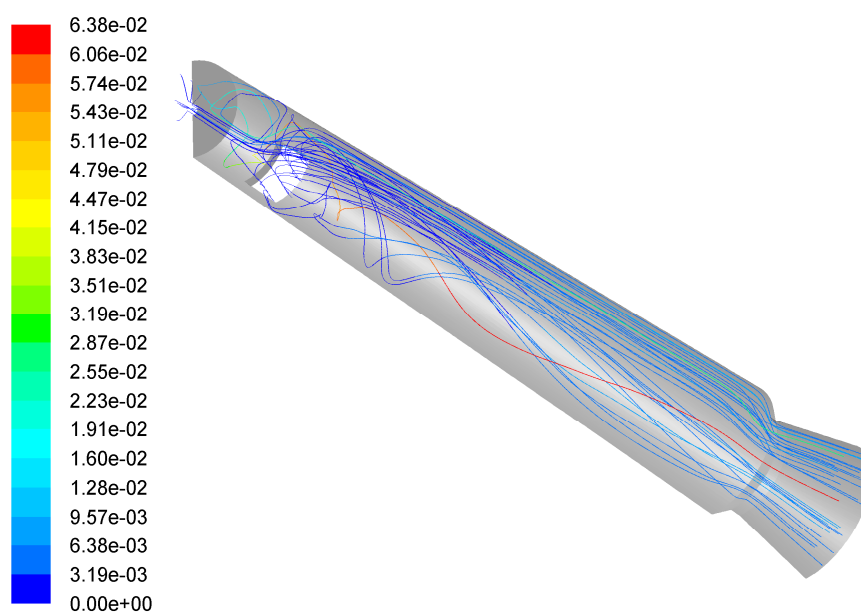
На рис. 6 представлена визуализация линий тока в КС двигателя. На данном рисунке вниз по потоку от выходных сечений ВЗУ наблюдается ярко выраженная вихревая структура. При использовании схемы «90-В» в нижней части КС образуются два парных вихря. Их характерный размер при этом составляет одну четверть от проходного сечения КС. В схеме «90-Н» образуются аналогичные вихри, но их размеры составляют уже половину от проходного сечения КС. Увеличение размеров вихревой структуры способствует улучшению смешения компонентов в КС. Кроме того, больший диаметр

вихря может несколько увеличить время пребывания реагирующей смеси в КС, что приведёт к увеличению полноты сгорания топлива.

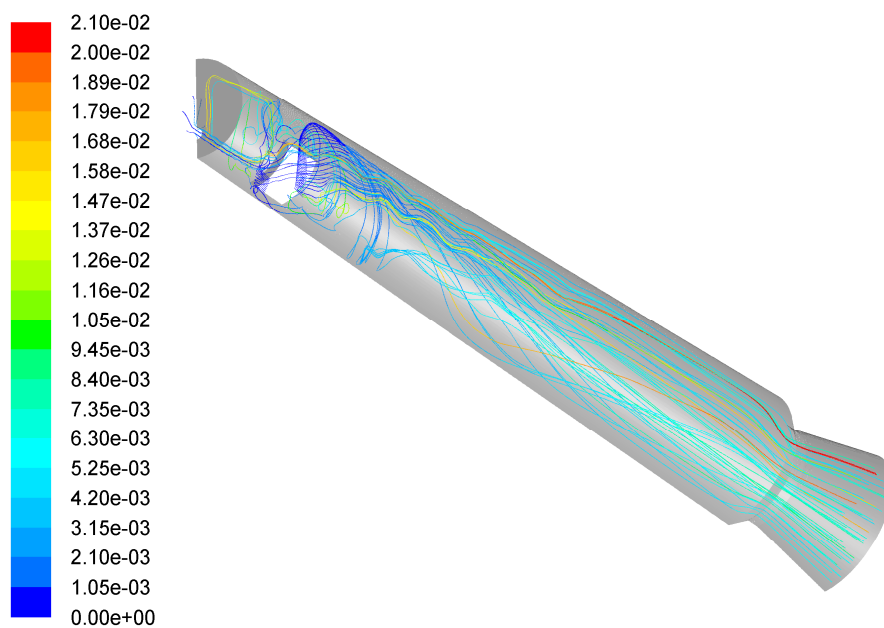
Кроме того, отчетливо прослеживается зона обратных токов над соплом СБГГ. В этой застойной зоне образуются вихревые токи, играющие существенную роль в теплообмене между газами внутри КС и поступающими в неё компонентами. В схеме «90-В» вихри имеют значительно меньший размер, в то время как в «90-Н» образуется один вихрь с осью перпендикулярной оси камеры, занимающий всё пространство застойной зоны.

По результатам моделирования движения конденсированной фазы (рис. 7) хорошо заметно, что при использовании рабочей схемы «90-В» поток частиц размывается плохо и фактически «прижимается» к верхней стенке КС. При этом на стенку попадает до 42% частиц. При использовании схемы «90-Н» поток смещается вниз и количество попадающих на стенку частиц снижается до 9% (более чем в 4 раза).

Среднее время пребывания частиц в КС составляет для обеих схем около 6-7 мс, что позволяет говорить о возможности обеспечения высокой полноты сгорания частиц диаметром 15...20 мкм.



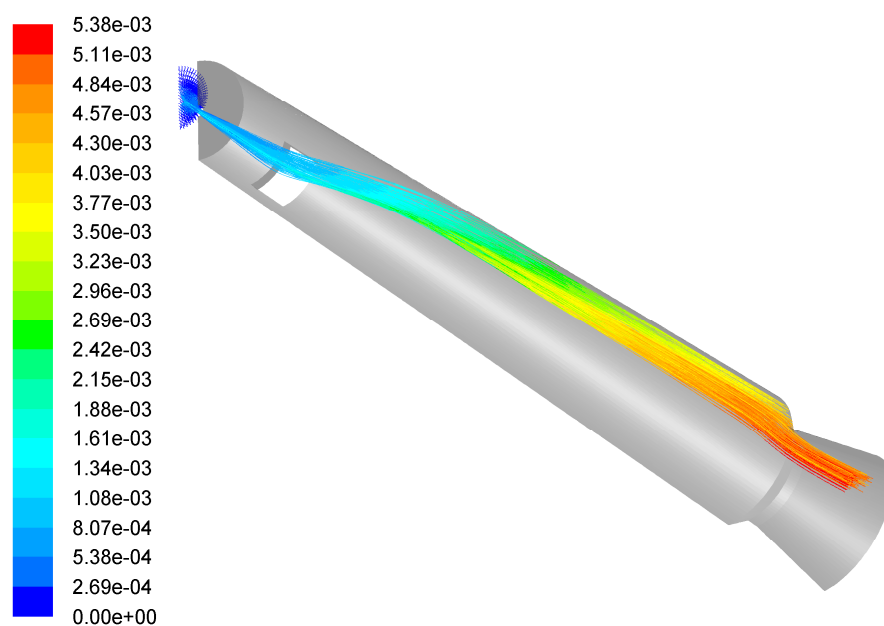
a)



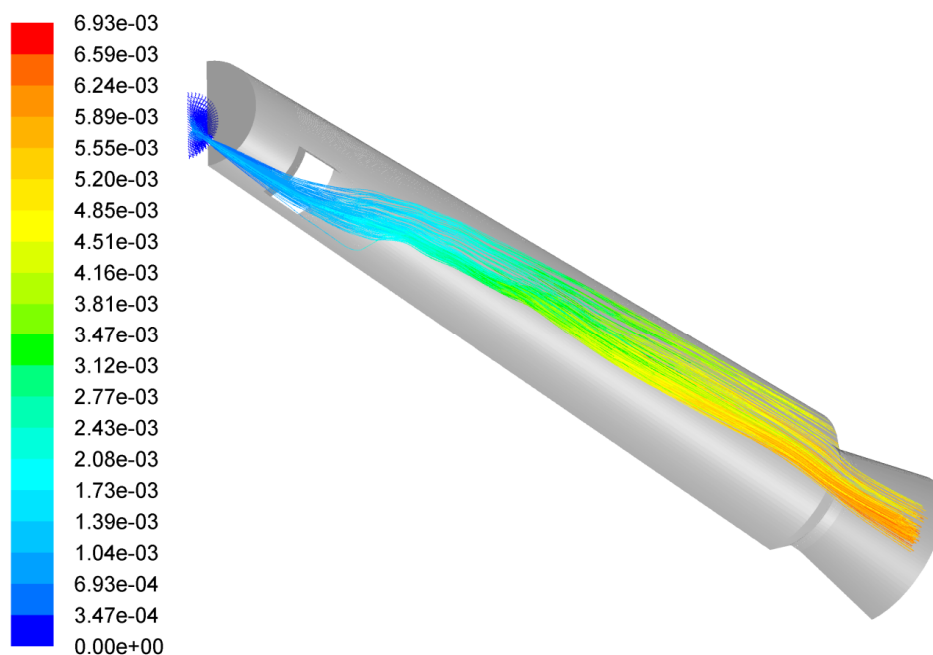
б)

Рис. 6. Линии тока для схем «90-В» (а) и «90-Н» (б).

Линии окрашены в соответствии с временем пребывания частиц (с)



а)



б)

Рис. 7. Треки конденсированных частиц диаметрами 24 мкм
для схем «90-В» (а) и «90-Н» (б).

Треки окрашены в соответствии с временем пребывания частиц (с)

Основная зона горения газообразных компонентов, как было показано ранее, смещена в верхнюю часть КС. Частицы конденсированной фазы, поступающие из ГГ, при горении создают существенный вклад в тепловыделение в КС и также попадают в верхнюю её половину. По совокупности двух приведённых факторов, основная зона тепловыделения будет располагаться выше оси КС, и иметь значительную протяженность.

Подводя итог всему вышесказанному, можно отметить, что численное моделирование показало некоторое преимущество схемы «90-Н» по сравнению со схемой «90-В». При достаточно высокой равномерности полей скоростей на входе в сопло схема «90-Н» обеспечивает более равномерное смешение компонентов. Более крупный вихрь в районе входа ВЗУ улучшает смешение и, потенциально, может повысить время пребывания смеси в КС, а, следовательно, и полноту сгорания. Зона, в которой достигается близкое к стехиометрическому соотношение компонентов, в обеих схемах смещена в верхнюю часть камеры, но в схеме «90-Н» зона горения более «размыта», что улучшает равномерность процессов в КС. Кроме того, в РПД, сконструированном по схеме «90-Н», более чем в 4 раза снижается количество конденсированных частиц, попадающих на стенку КС, что положительно сказывается на эффективности двигателя в целом.

Список литературы

- [1]. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Козлов В.А. Ракетно-прямоточные двигатели на твёрдых и пастообразных топливах. Основы проектирования и экспериментальной отработки. М.: Физматлит, 2010. 320 с.
- [2]. Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верховомов В.К. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета. М.:Академкнига, 2006. 344 с.
- [3]. Давидчук Е.Л., Димитров В.И., Рафалович М.Л., Тулупов Ю.И., Славинская Н.А. Кинетика горения бора в сухом воздухе // Физика горения и взрыва. 1991. №1. С. 45-52.
- [4]. Бахман Н.Н., Беляев А.Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967. 226 с.