

# Аэрокосмический научный журнал

Сетевое научное издание  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
<http://aerospjournal.ru>

Ссылка на статью:

// Аэрокосмический научный журнал.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015.  
№ 05. С. 12–25.  
DOI: **10.7463/aersp.0515.0821899**

Представлена в редакцию: 12.08.2015  
Исправлена: 26.08.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.455

## Численное исследование рабочего процесса в восстановительном газогенераторе кислород – метанового ЖРД разгонного блока

Ягодников Д. А.<sup>1,\*</sup>, Чертков К. О.<sup>2</sup>,

\* [daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)

Антонов Ю. В.<sup>1</sup>, Новиков А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения, Королев, Россия

---

Рассмотрены практические вопросы использования в качестве ракетного топлива жидкостного ракетного двигателя жидких кислорода и метана, обеспечивающих повышение надежности и многообразности использования двигателей как силовых установок средств выведения космических летательных аппаратов. Приведены результаты математического моделирования рабочего процесса в восстановительном газогенераторе жидкостного ракетного двигателя разгонного блока, работающем на компонентах топлива жидкий метан + жидкий кислород. Расчеты выполнены с использованием пакетов Ansys CFX, Fluent и программ авторской разработки. Получены и проанализированы распределения давления, скорости, температуры, концентраций реагентов и продуктов сгорания в характерных сечениях рабочего объема газогенератора, на основании которых сделаны рекомендации по выбору длины последнего.

**Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, восстановительный газогенератор, метан, численное моделирование

---

### Введение

Перспективным направлением развития двигательных установок (ДУ) с ЖРД является создание экологически чистых ракетных комплексов космического назначения с использованием горючего на основе метана (сжиженного природного газа), экологически чистого, коррозионно пассивного, обладающего лучшими охлаждающими свойствами и большими энергетическими характеристиками по сравнению с керосином в камерах с регенеративным охлаждением, а также являющегося предпочтительным для ЖРД многократного включения и использования [1 - 3]. В общем случае требованиям экологической безопасности отвечают и кислород – керосиновые ЖРД, однако подавляющее большинство таких ДУ ввиду особенностей организации рабочего процесса, а именно повышенного сажеобразования при существенном избытке горючего, выполнены по схеме с дожигани-

ем окислительного генераторного газа в камере сгорания (КС). Данные ЖРД не удовлетворяют требованиям по минимальной стоимости и максимальной безопасности эксплуатации, поскольку их газовые тракты имеют повышенную склонность к возгоранию в средах со значительным окислительным потенциалом. Переход на кислород – метановые ЖРД позволит комплексно решить указанные выше проблемы, а также перейти на схему с дожиганием восстановительного генераторного газа, имеющую лучшие эксплуатационные характеристики по сравнению с окислительными ДУ без дожигания.

Расчетные исследования, а также численная оптимизация внешнего облика и рабочих полостей сложных энергетических систем является в настоящее время неотъемлемым этапом их создания. К таким системам относится и ракетная двигательная установка, в состав которой, кроме собственно камеры двигателя входят также баки, турбонасосный агрегат, магистрали подачи компонентов, газогенератор (ГГ) и др. При этом качество организации рабочего процесса, протекающего во внутреннем объеме газогенератора во многом обуславливает эффективность работы турбины, стабильность подачи компонентов топлива в камеру сгорания и в общем итоге совершенство всей ДУ.

Сложный комплекс процессов, протекающих в объеме камеры газогенератора ЖРД разгонного блока, должен быть организован таким образом, чтобы в выходном его сечении значения температуры и скорости потока укладывались в заданные диапазоны. В продуктах газогенерации не допускается наличие конденсированной фазы (сажи, неиспарившихся капель компонентов топлива). При этом максимальное значение температуры продуктов газогенерации, как правило, лимитируется стойкостью лопаток турбины и обычно не превышает  $\sim 1200$  К для восстановительного и  $\sim 800$  К для окислительного газа. Равномерность поля температуры и скорости в выходном сечении газогенератора определяется газодинамической картиной течения рабочего тела в его объеме, которая в свою очередь зависит от схемы смесеобразования, скорости подачи компонентов топлива, интенсивности конвективного и турбулентного перемешивания компонентов, распределения окислителя и горючего, собственно горения. Эти стадии рабочего процесса протекают одновременно и оказывают существенное влияние друг на друга.

Газогенераторы ЖРД, как правило, работают на компонентах в жидком состоянии, поэтому при численном исследовании и составлении математической модели рабочего процесса необходимо учитывать конечное время фазового перехода веществ в газообразное состояние. Также необходимо принимать во внимание более низкий уровень температуры продуктов сгорания в газогенераторе по сравнению с камерой сгорания, что в свою очередь сказывается на скорости протекания химических реакций и, как следствие, на процессе горения, который может протекать в области диффузионно-кинетического режима.

Целью настоящей работы является математическое моделирование и расчет эффективности рабочего процесса, а также изучение газодинамической структуры потока в проточном тракте ГГ. Объект исследования – газогенератор ЖРД разгонного блока, работающий по восстановительной схеме на компонентах топлива сжиженный метан + жид-

кий кислород. При этом считается, что в камеру ГГ метан может подаваться газообразным, поскольку он используется в качестве охлаждающего компонента огневых стенок камеры сгорания и газогенератора, в охлаждающем тракте которых он газифицируется.

Предлагаемый в работе подход дает возможность проследить влияние на рабочий процесс, протекающий в ГГ, таких параметров как давления, коэффициента избытка окислителя, тонкости распыления компонентов топлива, скорости подачи компонентов топлива, геометрии и места расположения форсунок и отверстий подачи компонентов и др., а также учесть возможность возникновения в исследуемой области радиальных градиентов температуры, плотности рабочего тела, концентрации компонентов смеси и т.д.

## Основная часть

Существующие методы решения прикладных задач газовой динамики многофазных реагирующих потоков опираются на интерпретацию свойств течения по Эйлеру и по Лагранжу. Возможно совместное использование указанных подходов в качестве единого процесса, лишь условно разделяемого по этапам проведения вычислительного эксперимента на алгоритмическом уровне.

Для описания течений в камере ГГ используются уравнения, записанные в двумерной цилиндрической системе координат. В рассматриваемом случае при описании течения двухфазного турбулентного потока использовался комбинированный подход Лагранжа – Эйлера с изначальным предположением о неравновесности по скорости и температуре дискретной и непрерывной фаз. В частности, моделирование течения конденсированной (дискретной) фазы осуществлялось с использованием координат Лагранжа. Движение газовой (непрерывной) фазы рассматривается в подходе Эйлера. Основные особенности математической модели, за исключением приводимых ниже уточнений, отражены в работах [4, 5].

Остановимся подробнее на конструкции газогенератора (см. рисунок 1) и особенностях смесеобразования.

Рабочий процесс, протекающий во внутреннем объеме газогенератора, можно представить в следующем виде. Горючее, пройдя рубашку тракта охлаждения (А, см. рисунок 1) поступает в предфорсуночную область (Б), откуда через систему из 7 форсунок подается в рабочий объем ГГ. Горючее также инжектируется в осевом направлении через кольцевую щель в стенке камеры (В), расположенную на конечном участке тракта охлаждения. Подача окислителя осуществляется через систему из 6 отверстий диаметром 1 мм (Г) в каждом из коллекторов горючего. Истечение продуктов газогенерации осуществляется через выходное сечение (Д).

Отметим, что для точного описания процессов в ГГ следует использовать численное моделирование в трехмерной постановке. Однако ввиду осевой симметрии схемы смесе-

образования для оценки совершенства рабочего процесса и особенностей его протекания в исследуемом ГГ целесообразно ограничиться моделированием в пространственном угловом секторе, задав по границам условия симметрии.

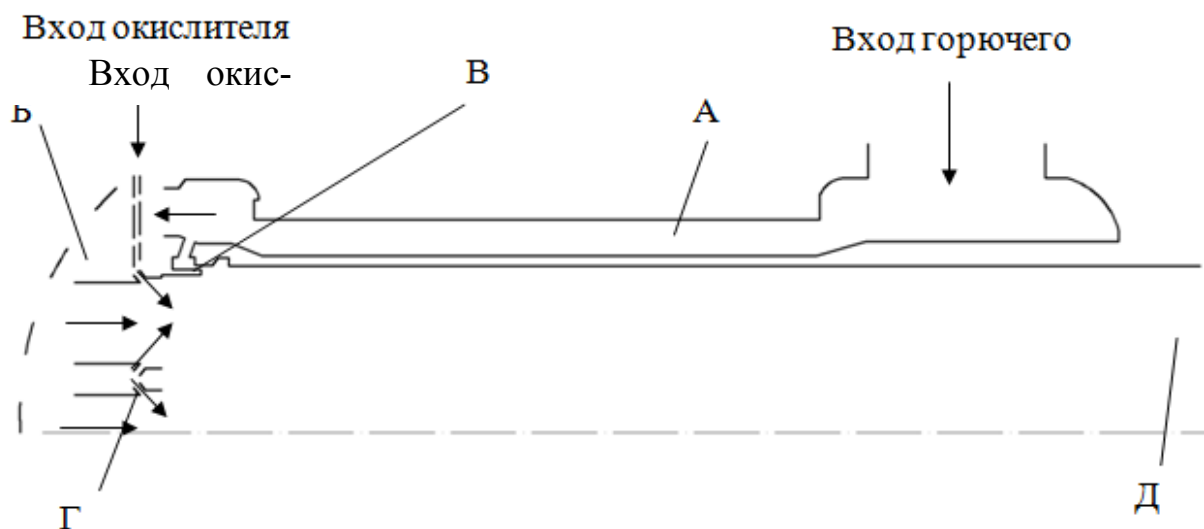


Рисунок 1 – Схема организации рабочего процесса в газогенераторе

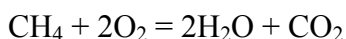
Учитывая приведенные выше обстоятельства, применительно к математической модели рабочего процесса можно сформулировать следующие основные допущения, некоторые из которых общепринятые.

1. Камера газогенератора считается изобарической.
2. Форма капель жидкой фазы принимается сферической.
3. Источники тепла за счёт вязкой диссипации и излучения в потоке существенно меньше конвективных и диффузионных составляющих (эффективные турбулентные числа Прандтля и Шмидта близки к единице).

4. В уравнениях движения капли не учитываются сила Бассета и эффект присоединённой массы (данные члены несущественны при движении частиц с формой, близкой к сферической, плотность которых значительно превышает плотность окружающего газа) [6].

5. Газ является идеальным и подчиняется закону Менделеева – Клайперона.

6. Реакция между горючим и окислителем протекает в одну стадию и имеет следующий вид



Учитывая реальные значения давлений и температур в газогенераторе, а также то обстоятельство, что горючее и окислитель являются криогенными компонентами представляется целесообразным рассматривать только газофазную реакцию физико-химического взаимодействия между ними.

Система уравнений математической модели включает в себя дифференциальные уравнения сохранения для непрерывной и дискретной (дисперсной) фаз, а также алгебраические соотношения, характеризующие свойства смеси и граничные условия. Непрерывная фаза включает в себя газообразные реагенты и продукты реакции. Дисперсная фаза состоит из капель горючего и окислителя, подаваемых через форсунки или щелевые отверстия. Зависимость скорости химической реакции от температуры аппроксимируется уравнением Аррениуса.

Численные исследования проводились на платформах Ansys CFX [7] и Fluent [8], с привлечением пакетов и скриптов авторской разработки. Основные характеристики расчетной сетки приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Геометрия расчетной сетки

<b>Число узлов</b>	170829
<b>Число элементов</b>	966613
<b>Минимальный размер элемента, мм</b>	0,0025
<b>Максимальный размер элемента, мм</b>	2
<b>Геометрия ячейки</b>	тетраэдр

Здесь и далее вычисление номинального (среднего) значения параметра по сечению выполнялось в соответствии со следующим алгоритмом.

- исследуемое сечение разбивается на конечное число участков;
- каждый из участков ограничивается двумя замкнутыми контурами, таким образом, что один из них вписан в другой (при этом контур образуется изолинией рассматриваемого параметра);
- в пределах конкретного участка значение параметра остается постоянным.

Учитывая приведенные выше обстоятельства, искомое среднее значение вычислялось в соответствии с формулой

$$N_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i N_i)}{S_{\text{сум}}},$$

где  $N_{\text{ср}}$  – среднее значение параметра по сечению;  $S_{\text{сум}}$  – площадь сечения,  $i$  – порядковый номер участка, в пределах которого, значение параметра считается постоянным;  $n$  – общее количество участков разбиения (совпадает с количеством контуров);  $S_i$  – площадь  $i$ -ого участка;  $N_i$  – значение параметра на  $i$ -ом участке.

Моделировалось два режима работы газогенератора, соответствующие двум различным коэффициентам избытка окислителя. При этом анализ полей выполнялся в двух продольных плоскостях. Начальные и граничные условия расчета приведены в таблице 2. Расчет адиабатической температуры продуктов газогенерации осуществлялся в программе Terra [9].

Таблица 2 – Начальные и граничные условия расчета рабочего процесса

Параметр	Значение
1	2
<b>Режим №1</b>	
Суммарный расход	6,2 кг/с
Давление в газогенераторе	8,07 МПа
Коэффициент избытка окислителя в первой зоне ( $\alpha_1$ )	0,58
Суммарный коэффициент избытка окислителя ( $\alpha_\Sigma$ )	0,15
Адиабатическая температура продуктов газогенерации ( $T_{гг}^*$ ) при $\alpha_\Sigma$	1200 К
Температура подачи компонентов топлива:	
метан	105 К
кислород	80 К
<b>Режим №2</b>	
Суммарный расход	6,2 кг/с
Давление в газогенераторе	8,07 МПа
Коэффициент избытка окислителя в первой зоне ( $\alpha_1$ )	0,775
Суммарный коэффициент избытка окислителя ( $\alpha_\Sigma$ )	0,25
Адиабатическая температура продуктов газогенерации ( $T_{гг}^*$ ) при $\alpha_\Sigma$	1395 К
Температура подачи компонентов топлива:	
метан	105 К
кислород	80 К

На рисунках 2, 3 приведены расчетные поля давления и скорости для режимов №1 и №2. Следует отметить схожесть структуры потока, полученной в настоящем случае и при изотермическом расчете. В тоже время имеется и принципиальная особенность, связанная с отсутствием высокоскоростных зон, сосредоточенных вдоль осей коллекторов подвода основного горючего. Данное обстоятельство обуславливает практически полное выравнивание поля скорости на 2/3 длины газогенератора. Среднее по выходному сечению значение модуля вектора скорости составляет 13 м/с.

На рисунке 4 показано температурное поле продуктов газогенерации в двух сечениях расчетного объема. Анализируя градиенты последнего можно сделать вывод о том, что основная зона химических реакций располагается в непосредственной близости у форсуночной головки газогенератора (максимальное значение температуры продуктов сгорания в первой зоне равно 3541 К). По мере удаления от плоскости подачи компонентов температура рабочего тела падает, поле выравнивается и в выходном сечении разброс значений последнего относительно среднего 1063 К составляет не более 10 %. Заметим, что значение средней температуры меньше равновесной термодинамической  $T_{гг}^*=1200$  К, что мо-

жет быть обусловлено ограниченным временем пребывания продуктов газогенерации в ГГ.

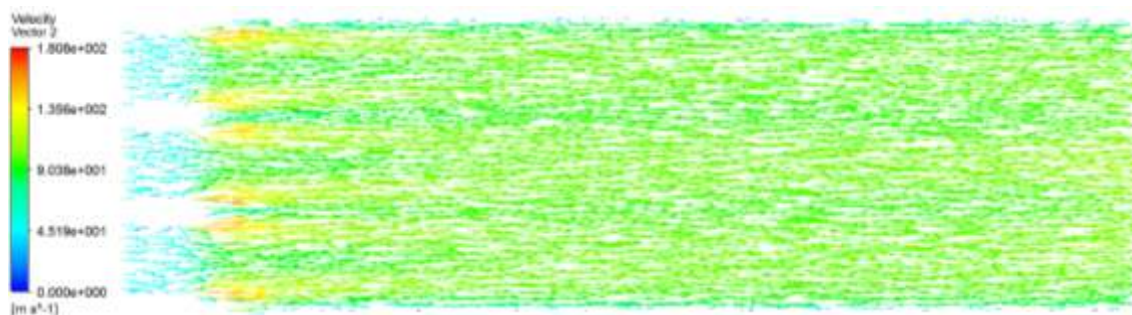


а) режим № 1

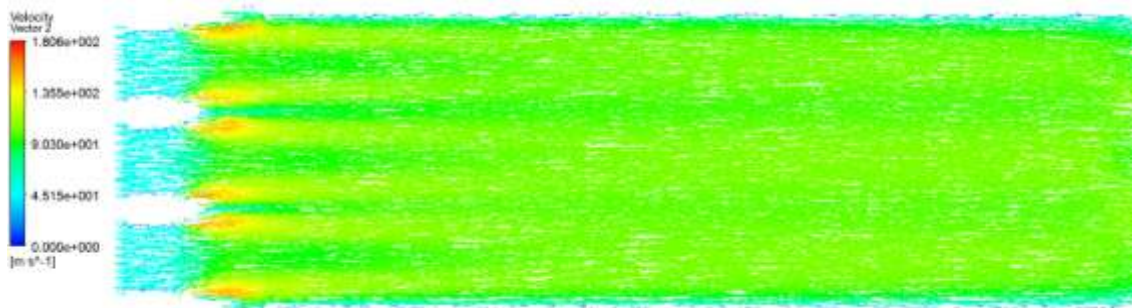


б) режим № 2

Рисунок 2 – Поле давлений в объеме ГГ

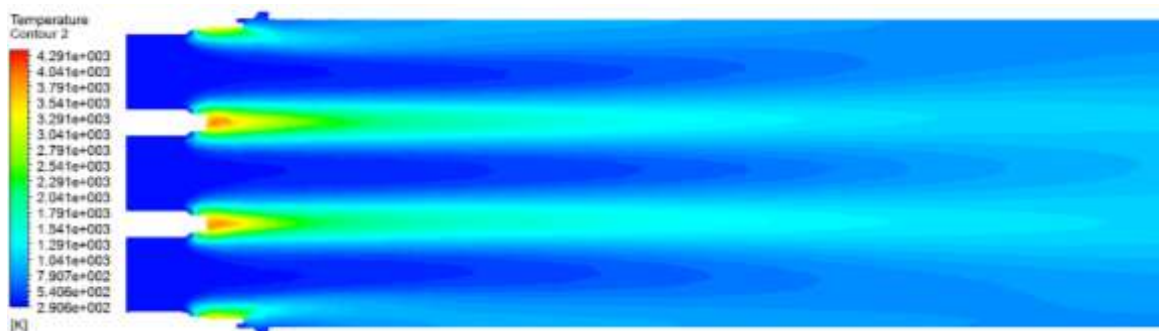


а) режим № 1

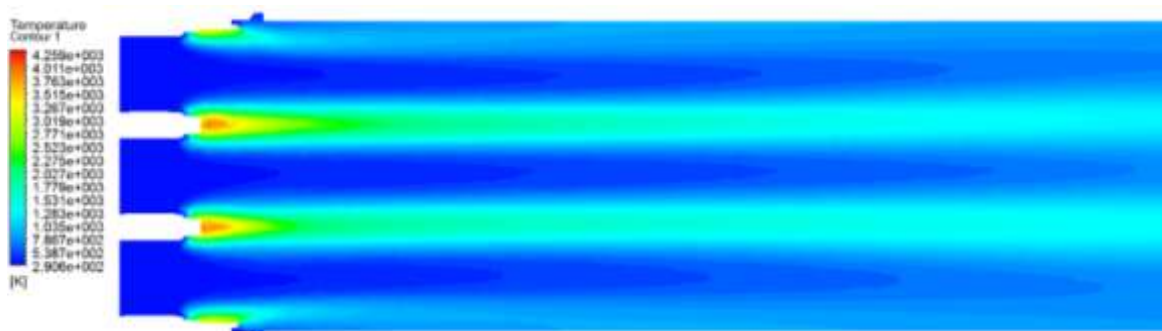


б) режим № 2

Рисунок 3 – Поле скоростей в объеме ГГ



а) режим № 1



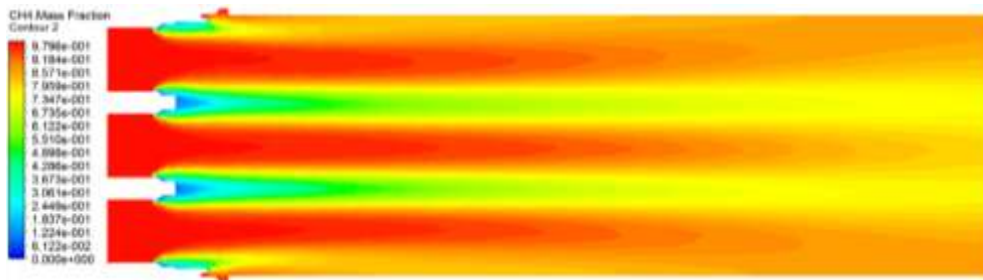
б) режим № 2

**Рисунок 4** – Поле температуры продуктов газогенерации в объеме ГГ

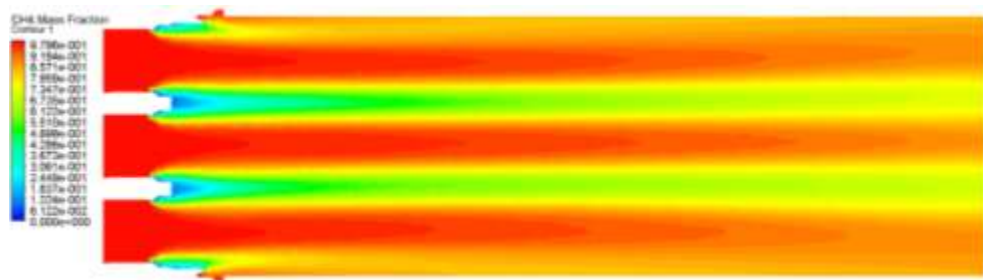
На рисунках 5 – 8 приведены результаты расчета полей концентраций исходных реагентов и продуктов сгорания в двух плоскостях расчетного объема газогенератора. Их анализ позволяет сделать следующие выводы.

Локализация градиента концентраций углекислого газа и паров воды у смесительной головки подтверждает сделанный ранее вывод о том, что в указанной области формируется фронт пламени. Основным фактор, который лимитирует скорость протекания рабочего процесса и температуру продуктов газогенерации, в данном случае - соотношение между горючим и окислителем (об этом же свидетельствуют распределения параметров (см. рисунки 5, б – 8, б), полученные для режима № 2). Учитывая восстановительную схему газогенератора, превалирующим компонентом рабочей смеси является метан - об этом свидетельствуют и поля, представленные на рисунке 5. Массовая доля метана в выходном сечении составляет величину  $\sim 60\%$  с разбросом  $\pm 10\%$ . Номинальные значения массовой доли углекислого газа и воды в этом же сечении равны  $18\%$  и  $13\%$  с отклонением от номинала  $10\%$  и  $12\%$  соответственно. В целом следует отметить, что несмотря на то, что выравнивание поля скорости достигается на  $2/3$  длины газогенератора, этого же расстояния недостаточно для выравнивания распределения температуры продуктов газогенерации и их концентрации. В качестве возможной меры по сокращению габаритов рабочей области можно предложить двухзонную схему смесеобразования с отдельной подачей горючего в первую и вторую зоны. Значение коэффициента расходного комплекса для режима № 1 близко к единице и составляет  $0,995$ .





а) режим № 1



б) режим № 2

Рисунок 5 – Поле концентрации горючего в объеме ГГ

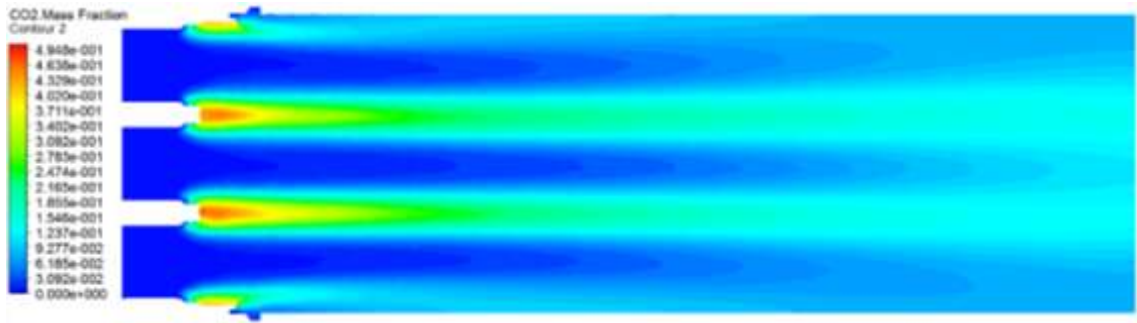


а) режим № 1

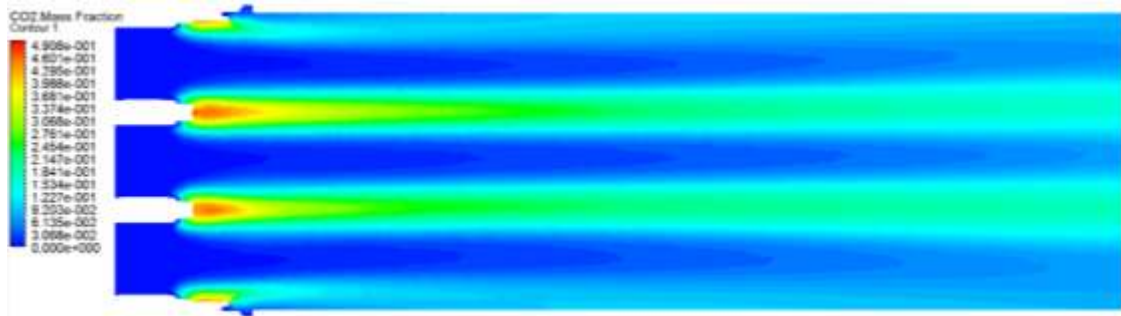


б) режим № 2

Рисунок 6 – Поле концентрации окислителя в объеме ГГ

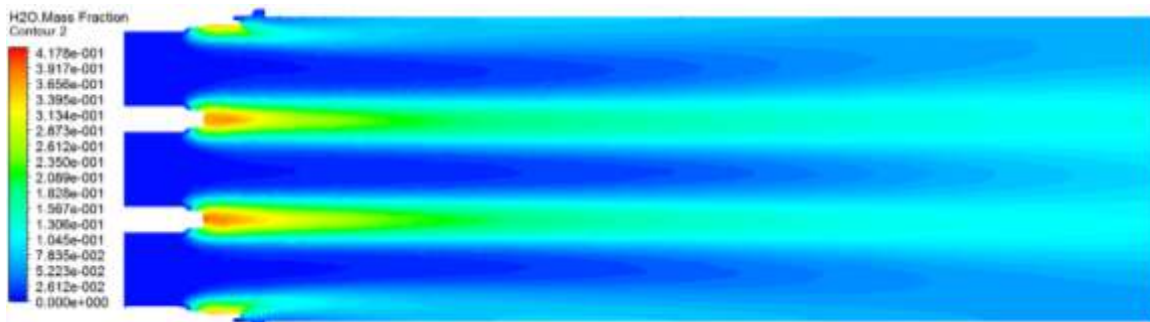


а) режим № 1

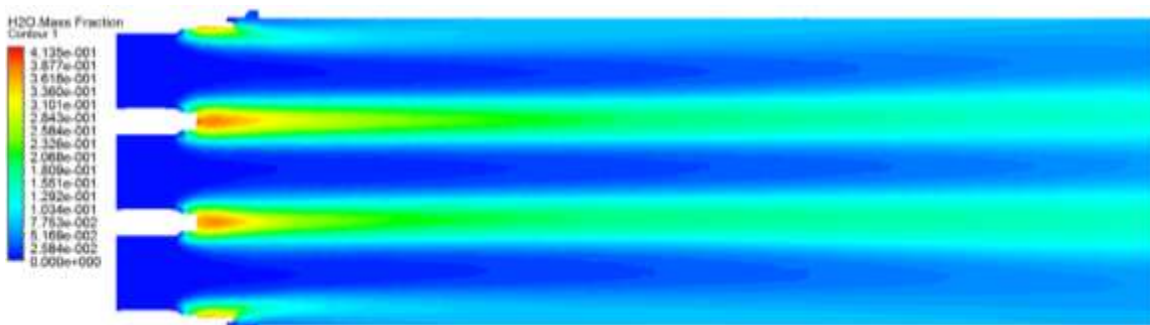


б) режим № 2

Рисунок 7 – Поле концентрации углекислого газа в объеме ГГ



а) режим № 1



б) режим № 2

Рисунок 8 – Поле концентрации паров воды в объеме ГГ

Общий вид полей концентраций реагентов и продуктов сгорания, а также распределений скорости и давления в объеме газогенератора для режима № 2 в целом подобен режиму № 1. Некоторые отличия наблюдаются в степени равномерности полей параметров в выходном сечении (величина разброса относительно среднего увеличилась), а также в их абсолютных значениях (максимальное значение температуры продуктов сгорания равно 3763 К). Отмеченные изменения можно объяснить следующим образом. Увеличение коэффициента избытка окислителя ( $\alpha_1=0,775$ ) обеспечивается ростом секундного массового расхода кислорода, что в свою очередь обуславливает повышенные значения скорости и расходонапряженности потока, выходящего из предкамер, и прямо влияет на распределение параметров течения в выходном сечении ГГ.

Существенным моментом с точки зрения обеспечения заданного уровня надежности ДУ ЖРД является окислительная способность продуктов газогенерации [10], учитывая повышенную склонность к возгоранию элементов конструкции двигателя, выполненных из металлов, при контакте с окислительными средами представляется целесообразным переход на восстановительный генераторный газ. Анализ полей концентрации окислителя для режимов №1 и 2 в объеме натурального ГГ свидетельствует об отсутствии свободного кислорода в составе продуктов сгорания, что указывает на высокое качество организации рабочего процесса в ГГ.

## Заключение

Подводя итог расчетным исследованиям можно сделать следующие выводы.

1. Рассмотрение процессов горения и тепломассообмена во внутреннем объеме газогенератора в контексте диффузионно-кинетической модели является обоснованным, учитывая уровень температуры продуктов сгорания, и позволяет получить отличные (в сторону увеличения степени неравномерности) от диффузионной модели распределения параметров в характерных сечениях.

2. Анализ газодинамической структуры потока восстановительного газогенератора свидетельствует о полном выравнивании поля скорости на  $2/3$  длины газогенератора, однако этого же расстояния недостаточно для выравнивания распределения температуры продуктов газогенерации и их концентрации по радиусу.

3. При увеличении суммарного коэффициента избытка окислителя в ГГ от 0,15 до 0,25 разброс параметров в выходном сечении газогенератора возрастает на величину  $\sim 13 \div 17 \%$ , что обусловлено ростом расходонапряженностей струй, выходящих из предкамер, за счет увеличения суммарного массового расхода окислителя.

В качестве рекомендации по сокращению габаритов рабочей области можно предложить двухзонную схему смесеобразования с отдельной подачей горючего в первую и вторую зоны.

## Список литературы

1. Клепиков И.А., Лихванцев А.А., Прокофьев В.Г., Фатуев И.Ю. Выбор принципиальной схемы и параметров маршевого многоразового ЖРД на топливе кислород-метан для возвращаемой первой ступени перспективного носителя // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2012. Т.29. С. 224–239.
2. Воронков А.Ф., Гребенюк Д.А., Иванов В.А., Клепиков И.А., Лихванцев А.А. Двигатель РД196 для системного демонстратора многоразовой I ступени МРКС-1 на топливе кислород и метан // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2013. Т.30. С. 243–259.
3. Иванов Н.Г., Кандоба Л.Н., Кашапов М.А., Клепиков И.А., Старков В.К., Федоров В.В. Выбор схемы охлаждения камеры многоразовых ЖРД на топливе кислород-метан для перспективного носителя // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2012. Т.29. С. 70 – 85.
4. Буркальцев В.А., Лапицкий В.И., Новиков А.В., Ягодников Д.А. Математическая модель и расчёт характеристик рабочего процесса в камере сгорания ЖРД малой тяги на компонентах топлива метан-кислород // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 2004. Специальный выпуск "Теория и практика современного двигателестроения". С. 8-17.
5. Ягодников Д.А., Антонов Ю.В., Власов Ю.Н. Моделирование испарения полидисперсной совокупности капель воды в камере сгорания гидрореактивного двигателя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №4. С. 71-82.
6. Лебединский Е.В., Калмыков Г.П, Мосолов С.В. и др. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование / ред. А.С. Коротеев. М.: Машиностроение, 2008. 512 с.
7. Ansys CFX-Solver Modeling Guide, Release 12.0. Ansys UK Ltd, 2009. 486 p.
8. Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, Release 12.0. Ansys Inc, 2009. 816 p.
9. Trusov B.G. Program system TERRA for simulation phase and chemical equilibrium // Proc. of the XIV Intern. Symp. on Chemical Thermodynamics, St-Petersburg, Russia. 2002. P. 483-484.
10. Клепиков И. А. Выбор энергомассовых характеристик маршевых многоразовых ЖРД на сжиженном природном газе: дис. ... доктора техн. наук. Москва, 2005. 292 с.

## Numerical Study of the Working Process in the Reducing Gas Generator of the Upper Stage Oxygen - Methane Engine

D.M. Yagodnikov<sup>1,\*</sup>, K.O. Chertkov<sup>2</sup>,

\*[daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)

Yu.V. Antonov<sup>1</sup>, Новиков А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Central Research Institute of Machine Building, Korolev, Russia

---

**Keywords:** liquid rocket engine, reducing gas generator, methane, numerical simulation

---

This article deals with the problems of creating a reducing gas generator of the liquid rocket engine (LRE) of upper stage using advanced fuel components, namely oxygen + liquid natural gas. Relevance of the work is justified by the need to create and develop of environmentally friendly missile systems for space applications using methane-based fuel (liquid natural gas). As compared to the currently used unsymmetrical dimethyl-hydrazine and kerosene, this fuel is environmentally safe, passive to corrosion, has better cooling properties and high energy characteristics in the re-generatively cooled chambers, as well as is advantageous for LRE of multiple start and use.

The purpose of this work is a mathematical modeling, calculation of the working process efficiency, as well as study of gas-dynamic structure of the flow in the gas generator flow path. The object of study is the upper stage LRE gas generator, which uses the reducing scheme on the liquid propellants: oxygen + liquid methane. Research methods are based on numerical simulation.

Computational studies allowed us to receive the velocity, temperatures, and concentrations of reactants and combustion products in the longitudinal section of gas generator. Analysis of the gas-dynamic structure of flow shows a complete equalization of the velocity field by 2/3 of the gas generator length. Thus, the same distance is not enough to equalize the temperature distribution of the gasification products and their concentrations in radius. Increasing the total excess oxidant ratio from 0.15 to 0.25 leads to a greater spread of the parameters at the exit of the gas generator by  $\sim 13 \div 17\%$ . As a recommendation to reduce the size of the working area, is proposed a dual-zone gas generator-mixing scheme with fuel separately supplied to the first and second zones.

## References

1. Klepikov I.A., Likhvantsev A.A., Prokofev V.G., Fatuev I.Yu. The choice of concept and the parameters of a reusable rocket engine propulsion fuel oxygen-methane for the return of the first stage is promising media. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko* [Proceedings of NPO Energomash them. of academician V. P. Glushko]. 2012. Vol.29, pp.224-239. (in Russian).
2. Voronkov A.F., Grebenyuk D.A., Ivanov V.A., Klepikov I.A., Likhvantsev A.A. The engine ПД196 for the system demonstrator of a reusable stage I MRKS-1 fuel, oxygen and methane. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko* [Proceedings of NPO Energomash them. of academician V. P. Glushko]. 2013. Vol.30, pp.243-259. (in Russian).
3. Ivanov N.G., Kandoba L.N., Kashapov M.A., Klepikov I.A., Starkov V.K., Fedorov V.V. The choice of the circuit of the cooling chamber reusable rocket engine fuel oxygen-methane for advanced media. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko* [Proceedings of NPO Energomash them. of academician V. P. Glushko]. 2012. Vol.29, pp.70-85. (in Russian).
4. Burkal'tsev V.A., Lapitskii V.I., Novikov A.V., Yagodnikov D.A. Mathematical model and calculation of characteristics of the working process in the combustion chamber LRE of small thrust on the components of the fuel methane-oxygen. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2014, Special edition. pp. 8-17. (in Russian).
5. Yagodnikov D.A., Antonov Yu.V., Vlasov Yu.N. Simulation of Evaporation of Polydisperse Aggregate of Water Drops in Combustion Chamber of Hydro-Jet Engine. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2014, no.4. pp.71-82. (in Russian).
6. Lebedinskii E.V., Kalmykov G.P, Mosolov S.V. et al. *Rabochie protsessy v zhidkostnom raketnom dvigatele i ikh modelirovanie* [Working processes in liquid-propellant rocket engine and their simulation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 512 p.
7. Ansys CFX-Solver Modeling Guide, Release 12.0. Ansys UK Ltd, 2009. 486 p.
8. Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, Release 12.0. Ansys Inc, 2009. 816 p.
9. Trusov B.G. Program system TERRA for simulation phase and chemical equilibrium. *Proc. of the XIV Intern. Symp. on Chemical Thermodynamics*, Russia, St-Petersburg, 2002, pp. 483-484.
10. Klepikov I. A. Vybory energomassovykh kharakteristik marshevykh mnogorazovykh ZhRD na szhizhennom prirodnom gaze : diss. ... doktora tekhn. nauk [Choice energy-and-mass characteristics of the propulsion of a reusable rocket engine on compressed natural gas. Cand. diss.]. Moscow, 2005, 292 p.