

Исследование влияния способа подачи струй в камеру на эффективность смешения и горения топливо-воздушной смеси

Борисов А.Д.

Унитарное предприятие «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша»,

Онежская ул., 8, Москва, 125438, Россия

e-mail: a-d-borisov@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматриваются способы подачи газогенераторного газа в основную камеру сгорания воздушно-реактивных двигателей комбинированных схем. Рассмотрены различные варианты соплового блока газогенератора при осевой подаче. Выбран оптимальный вариант с точки зрения коэффициента полноты сгорания. Исследована зависимость эффективности смешения от угла вдува при подаче со стенки камеры сгорания. Результаты сопоставлены с эмпирическими формулами для траектории струи в поперечном потоке. Показана необходимость учета спектра конденсированных частиц при изучении вдува двухфазного газогенераторного газа.

Ключевые слова: струйная система стабилизации, газогенератор, эффективность смешения, конденсированные частицы.

Введение

Достоинством комбинированных схем воздушно-реактивных двигателей, в контуре которых размещен газогенератор (ГГ), является лучшая устойчивость

рабочего процесса в силу относительной независимости процессов в газогенераторе и основной камере сгорания (КС). В ГГ происходит газификация и частичное разложение топлива (с небольшой долей окислителя) в результате реакций пиролиза и/или горения. Полученный газ смешивается с воздухом и дожигается в основной КС. Высокая температура газогенераторной струи должна обеспечить самовоспламенение и стабилизацию пламени. Важной задачей является организация эффективного смешения двухфазного газогенераторного газа с основным потоком. Характер распределения и смешения топлива и окислителя по сечениям камеры оказывает значительное влияние на эффективность рабочего процесса в камере сгорания. Для обеспечения эффективного смешения необходимо произвести расчет распространения вдуваемой струи в сносящем потоке с целью определения оптимального угла вдува.

Течение в струе, развивающейся в поперечном потоке, значительно отличается от течения в обычной затопленной струе или в струе в спутном потоке. На передней стороне вдуваемой струи набегающий поток тормозится, создавая повышенное давление, а на задней стороне возникает разрежение. Перепад давлений создаёт силу, под действием которой происходит искривление и деформация струи [1].

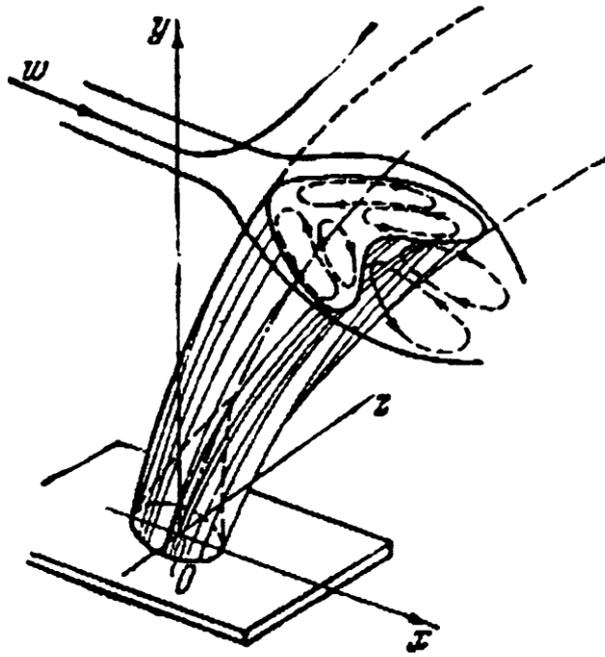


Рисунок 1. Струя в боковом сносящем потоке [2]

Сразу после выхода струи из соплового отверстия вследствие интенсивного перемешивания со сносящим потоком образуется турбулентный слой смешения. Периферийные частицы струи имеют меньшую по сравнению с потенциальным ядром скорость и поэтому сильнее отклоняются сносящим потоком от первоначального направления и движутся по более изогнутым траекториям, что и приводит к образованию подковообразной формы сечения (рисунок 1).

Для определения формы оси круглой струи в поперечном потоке был предложен ряд эмпирических, полуэмпирических и аналитических (для идеальной жидкости) формул (см. [1-3]). Используя результаты [1] и вводя безразмерные координаты $X = x / d_0$, $Y = y / d_0$ в уравнение, получаем следующее выражение для траектории струи:

$$X = \operatorname{ctg} \alpha_0 \cdot Y + \frac{m^2}{2 \sin^4 \alpha_0} Y^2 + 1.904 m^3 Y^3 \quad (1)$$

Данная формула даёт лучшее согласование с опытом, чем аналогичная формула из работы [3], и рекомендуется для расчёта струй несжимаемой жидкости при $\alpha_0 = 30 \dots 150^\circ$. Формула (1) остаётся верной и для траектории струи переменной плотности, если вместо отношения скоростей подставить корень из отношения скоростных напоров струи и потока:

$$m = \frac{1}{\sqrt{q}}, q = \frac{\rho_0 u_0^2}{\rho_\infty u_\infty^2} \quad (2)$$

где индекс ∞ относится к параметрам сносящего потока, а 0 – к начальным параметрам струи.

Следует отметить, что в приведённых выше формулах не принимается во внимание конечность поперечного размера канала, в который происходит вдув струи. Чтобы учесть данное обстоятельство, необходимо заменить скорость сносящего потока u_∞ на среднюю скорость, получающуюся при смешении струи с потоком газа [3]. Для детального определения параметров при вдуве двухфазных струй необходимо проведение численных расчетов.

Моделирование вдува двухфазного газогенераторного газа.

В ряде случаев продукты сгорания газогенераторных топлив содержат конденсированные частицы (Al, Mg, В и др.). Частицы этих металлов при сгорании образуют твердые или жидкие окислы – конденсированную фазу (к-фазу). Продукты сгорания газогенераторных топлив могут также содержать значительное количество частиц углерода. Массовая доля к-фазы в струе, истекающей из газогенератора, может достигать значительной величины (70%, а в некоторых случаях и больше), поэтому процессы турбулентного смешения и горения в камере сгорания имеют

существенно гетерогенный характер, что значительно осложняет их математическое моделирование [4].

Для исследования распространения газогенераторной струи в основной КС в первом приближении примем модель двухфазного потока, основанную на следующих допущениях:

- скорости и температуры газа и частиц в каждом сечении одинаковы, т.е. фазы находятся в динамическом и термическом равновесии между собой;
- объём частиц по отношению к газовой фазой пренебрежимо мал.

В этом случае двухфазный поток можно рассматривать как псевдогаз, свойства которого подбираются так, чтобы он имел те же плотность и теплоёмкость, что и смесь, при одинаковых температуре и давлении. Параметры термодинамического равновесия продуктов разложения с известным составом и энтальпией образования можно определить с помощью соответствующих методик и программ [5].

Численное моделирование течений и процессов в камере сгорания проводилось с помощью программного комплекса для расчёта смесеобразования и горения [6]. Используемая в программном комплексе математическая модель основана на системе уравнений Навье-Стокса для химически реагирующей смеси совершенных газов и включает модели термодинамики [7], коэффициентов молекулярного переноса и газофазных химических реакций. Решение полученной системы осуществляется методом крупных частиц.

Результаты расчётов

Первая из рассматриваемых задач связана с моделированием истечения одной или нескольких газогенераторных струй вдоль или под небольшими углами к оси основного сверхзвукового потока при осевом расположении ГГ. Рассматривались следующие варианты (рисунок 2):

- а. одна центральная звуковая струя, вдуваемая по оси КС;
- б. одна центральная струя и четыре, расположенных по окружности;
- в. одна центральная струя и шесть, расположенных по окружности;

Все отверстия цилиндрические, суммарная площадь проходных сечений во всех трёх случаях одинакова. Оси струй, расположенных по кругу, составляют с осью камеры угол в 6° .

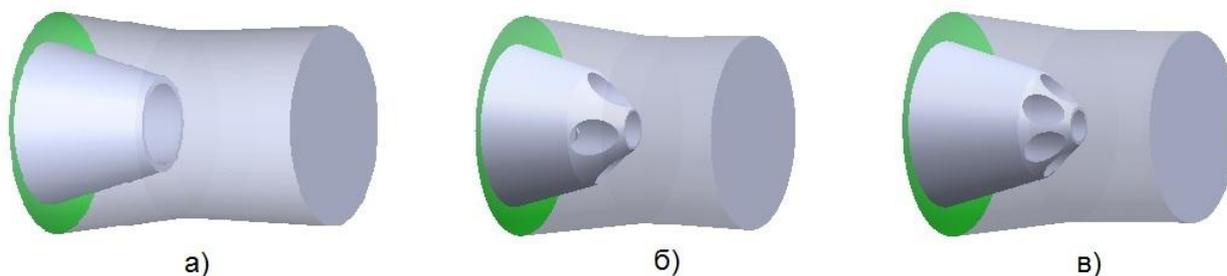
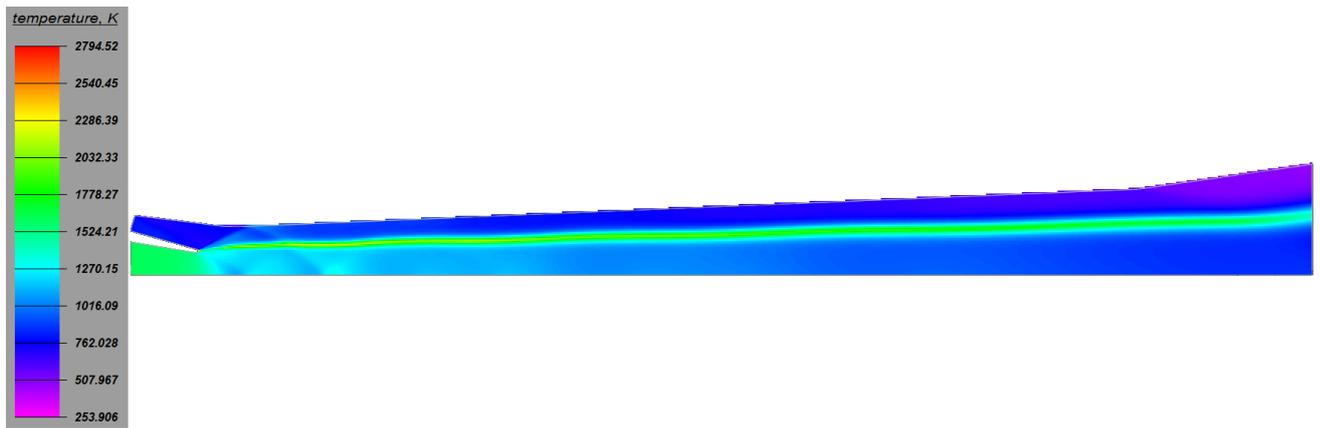
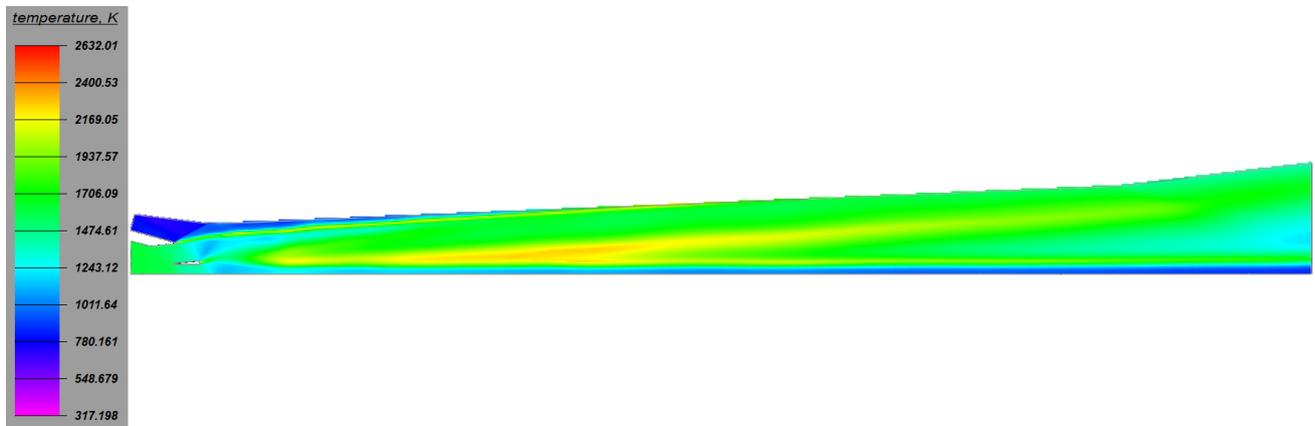


Рисунок 2. Варианты соплового блока

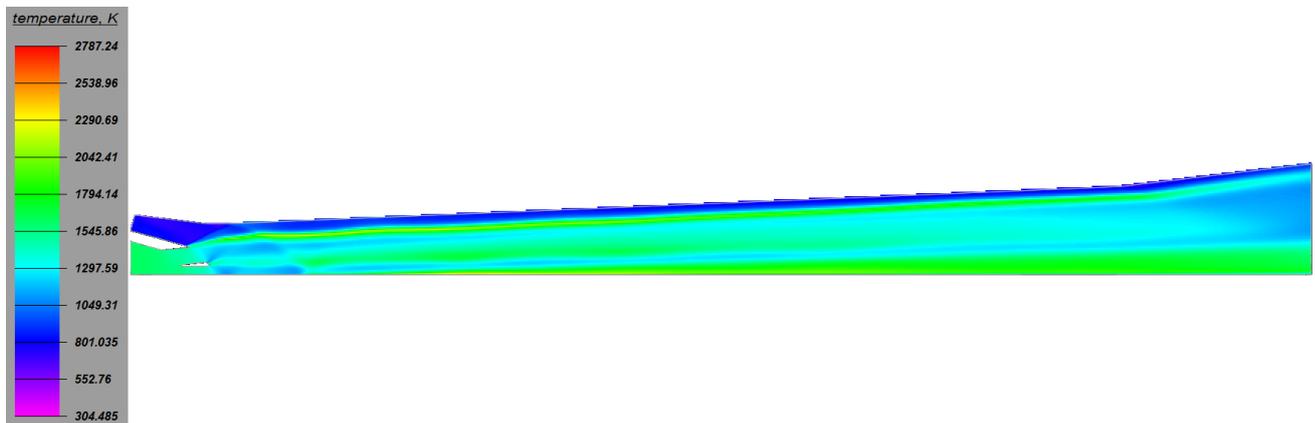
Были получены распределения температуры и числа Маха в камере сгорания для трёх рассматриваемых вариантов соплового блока при различных начальных условиях ($M_\infty = 4-6$). На рисунке 3 представлены распределения температуры в плоскости симметрии камеры при условиях, соответствующих внешнему числу Маха $M_\infty = 6$.



а) Одна центральная струя



б) Четыре струи по кругу и одна в центре



в) Шесть струй по кругу и одна в центре

Рисунок 3. Распределение температуры в плоскости симметрии КС при $M_\infty = 6$

По данным, полученным в ходе расчётов, были построены распределения коэффициента полноты сгорания топлива вдоль оси камеры (на рисунке 4 для

$M_\infty = 6$). Отсчёт координаты вдоль оси x идёт от начала цилиндрического участка, а нулевому значению полноты соответствует состояние потока до смешения.

Смешение двух спутных сверхзвуковых потоков идёт с очень низкой интенсивностью, и, как следствие, горение происходит в очень тонком слое – коэффициент полноты сгорания 0,08 при $M_\infty = 4,5$ и 0,1 при $M_\infty = 6$. При использовании соплового блока газогенератора с несколькими струями смешение интенсифицируется. Сверхзвуковой поток дополнительно тормозится в косых скачках, возникающих при вдуве струй под углом к оси камеры. Всё это приводит к увеличению полноты сгорания.

Из рисунка 4 видно, что эффективность сгорания топлива для конфигурации с шестью струями, расположенными по кругу, и одной центральной значительно ниже, чем в случае с четырьмя струями. Это объясняется тем, что в варианте с шестью струями отверстия имеют меньший диаметр и, следовательно, расположены ближе друг к другу. В результате струи сливаются, ухудшая смешение с основным потоком (см. рисунок 5).

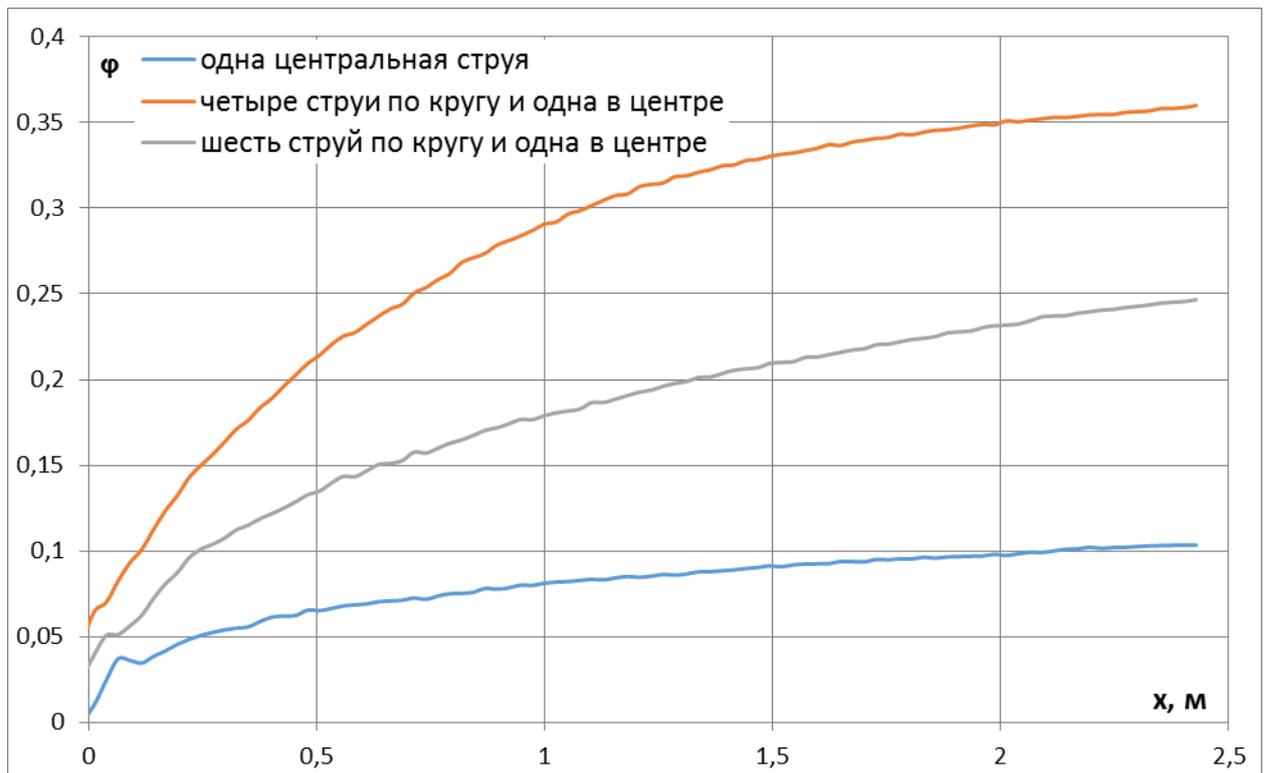


Рисунок 4. Распределение коэффициента полноты сгорания вдоль оси камеры при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 6$

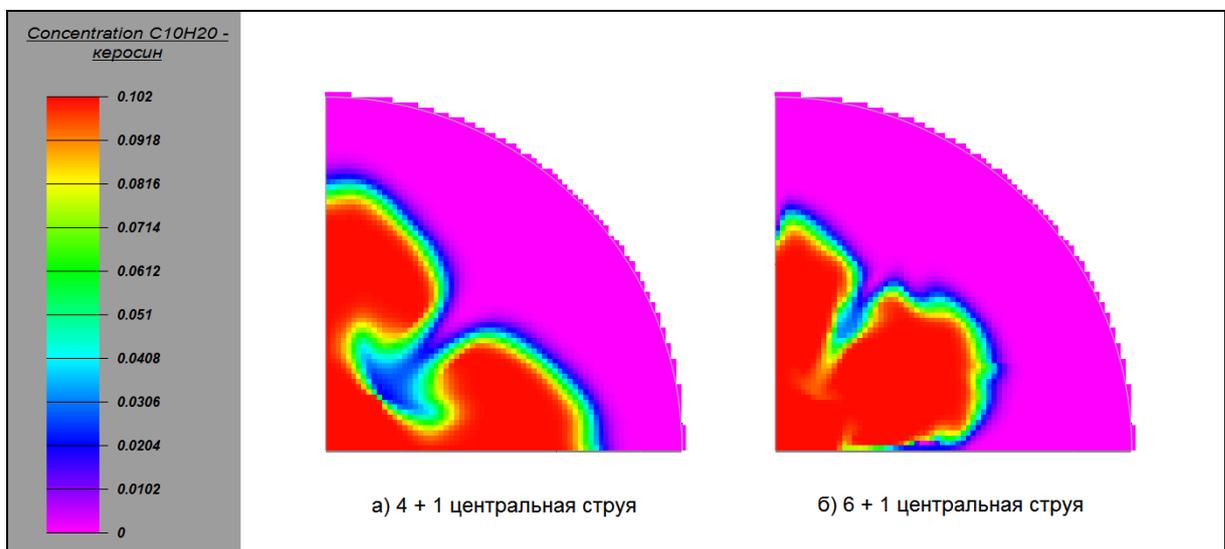


Рисунок 5. Распределение концентрации керосина за сопловым блоком газогенератора

Вторая решаемая задача – расчёт распространения и смешения струи псевдогаза в сносящем потоке при вдуве со стенки под различными углами (30°, 60°, 75°, 90°, 120°, 135° и 150°). Моделировалось течение вязкого турбулентного нереагирующего двухкомпонентного потока в цилиндрическом канале диаметром 0,18 м и длиной 0,5 м (температура торможения обоих потоков – около 1850 К, расходы 1 и 0,07 кг/с, давление торможения 0,186 и 1 МПа соответственно, показатель адиабаты для псевдогаза 1,073).

Для оценки эффективности смешения газогенераторной струи с основным потоком были взяты следующие параметры. Во-первых, это количество «несгоревшего» топлива в выходном сечении канала. Реально процесс горения не моделировался, и «несгоревшим» в данной точке считается количество топлива, превосходящее стехиометрическое значение относительно количества воздуха в этой же точке. Данный параметр позволяет грубо оценить процесс смешения. Более точно характеризовать равномерность распределения топлива по сечению камеры можно с помощью параметра $\overline{(\alpha^{-1} - 1/2)^2}$, где α – локальный коэффициент избытка воздуха (взята обратная величина, так как α может обращаться в бесконечность в точках, где отсутствует топливо), 2 – заданный коэффициент избытка воздуха.

Как видно из рисунка 6, равномерность распределения вдуваемых продуктов газогенерации по сечению камеры сгорания улучшается с увеличением угла вдува, за исключением последней точки (150°), где струя (как и при 30°) «прилипает» к стенке камеры. Примеры картины течения приведены на рисунках 7-12. Относительная концентрация топлива невелика (стехиометрическое соотношение

$L_0 = 7,16$, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2$), поэтому на рисунках для выходного сечения приведена также шкала от минимального до максимального значения концентрации псевдогаза в данном сечении. Красной линией на рисунках с изолиниями скоростей отмечена траектория струи, рассчитанная по формуле (1). Совпадение с полученными результатами хорошее при угле вдува 90° и ухудшается при отклонении угла от 90° .

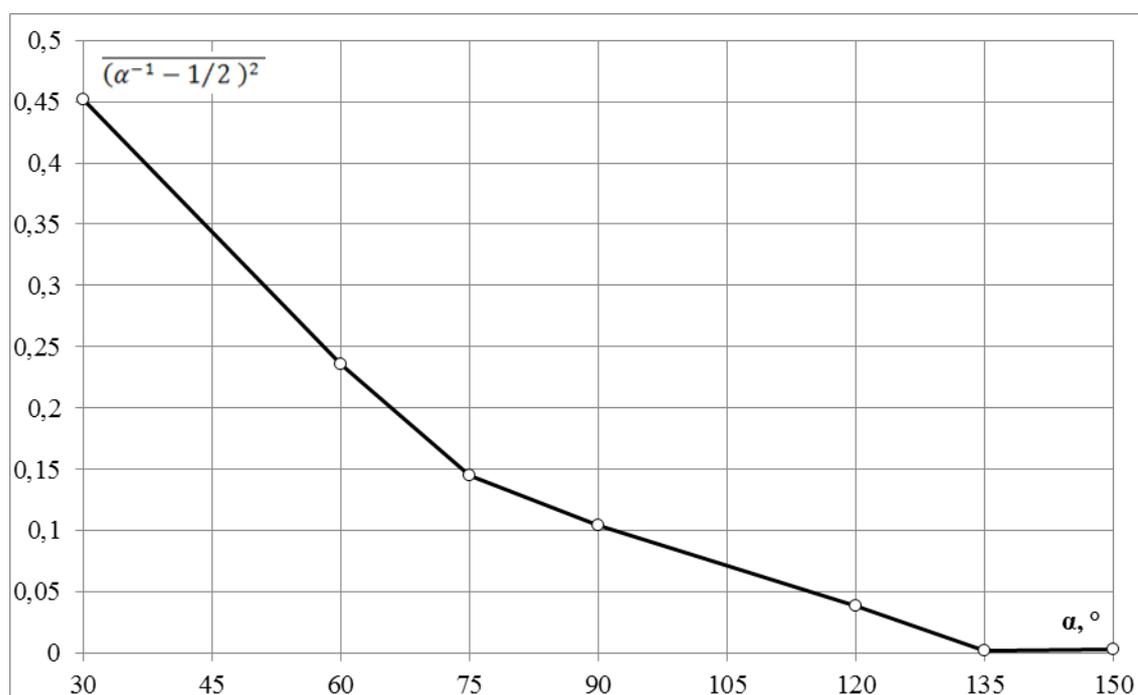


Рисунок 6. Значение параметра $\overline{(\alpha^{-1} - 1/2)^2}$ в сечении на расстоянии 0,2 м от среза сопла ГГ в зависимости от угла вдува

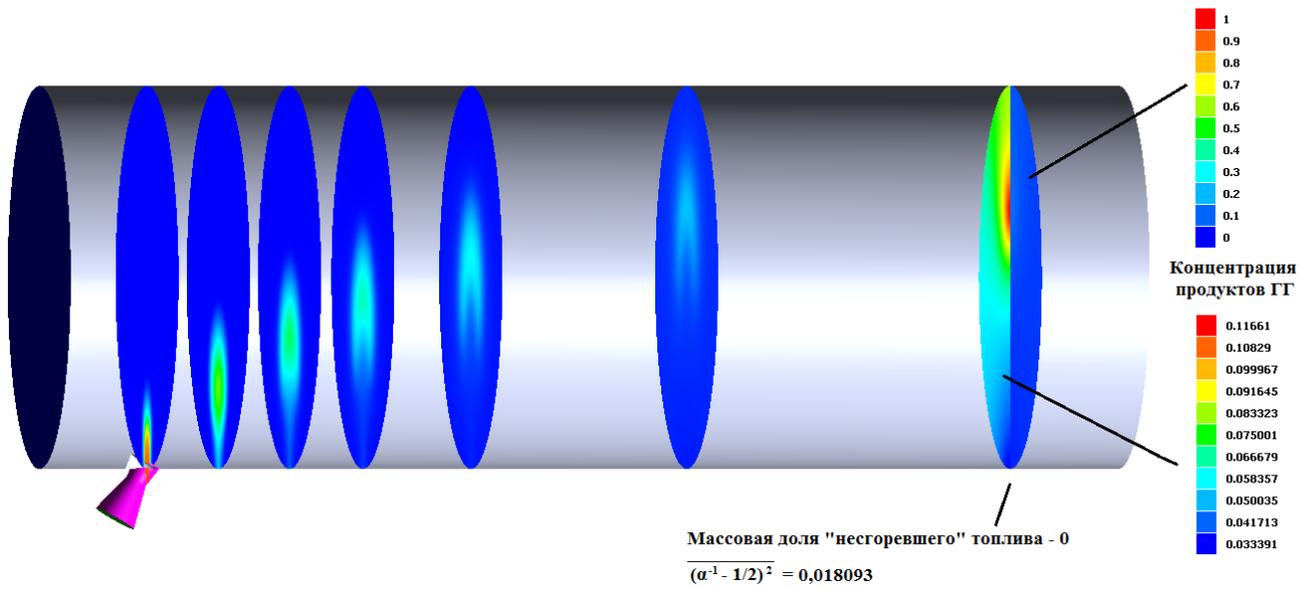


Рисунок 7. Распределение концентрации продуктов газогенерации по КС при угле вдува $\alpha = 60^\circ$.

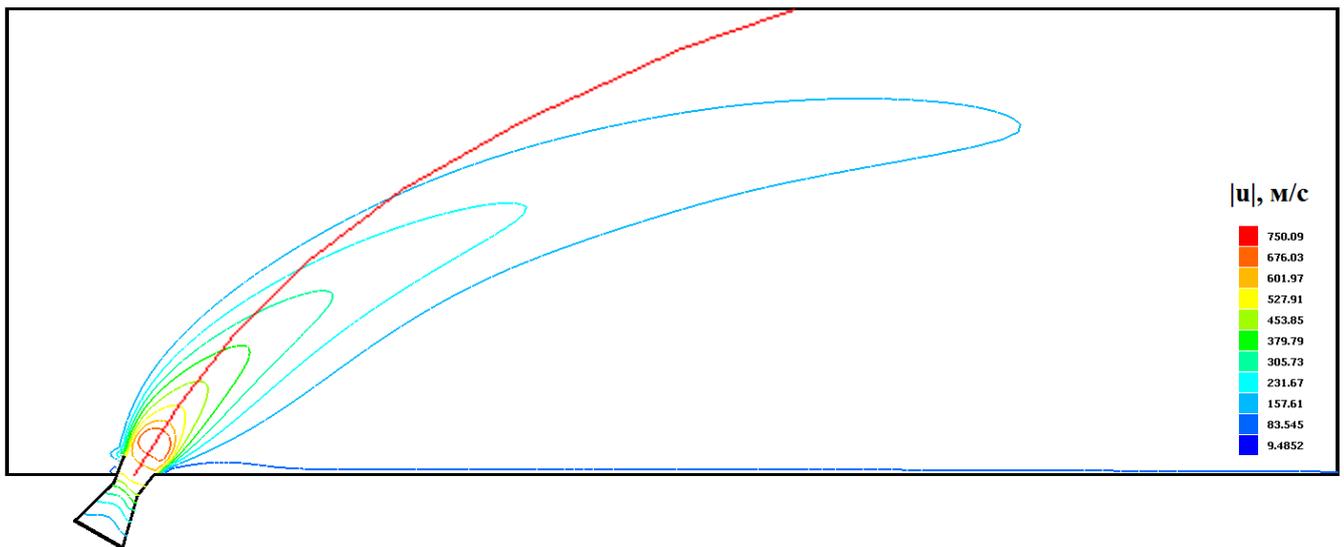


Рисунок 8. Изолинии модуля скорости в продольном сечении КС при угле вдува $\alpha = 60^\circ$.

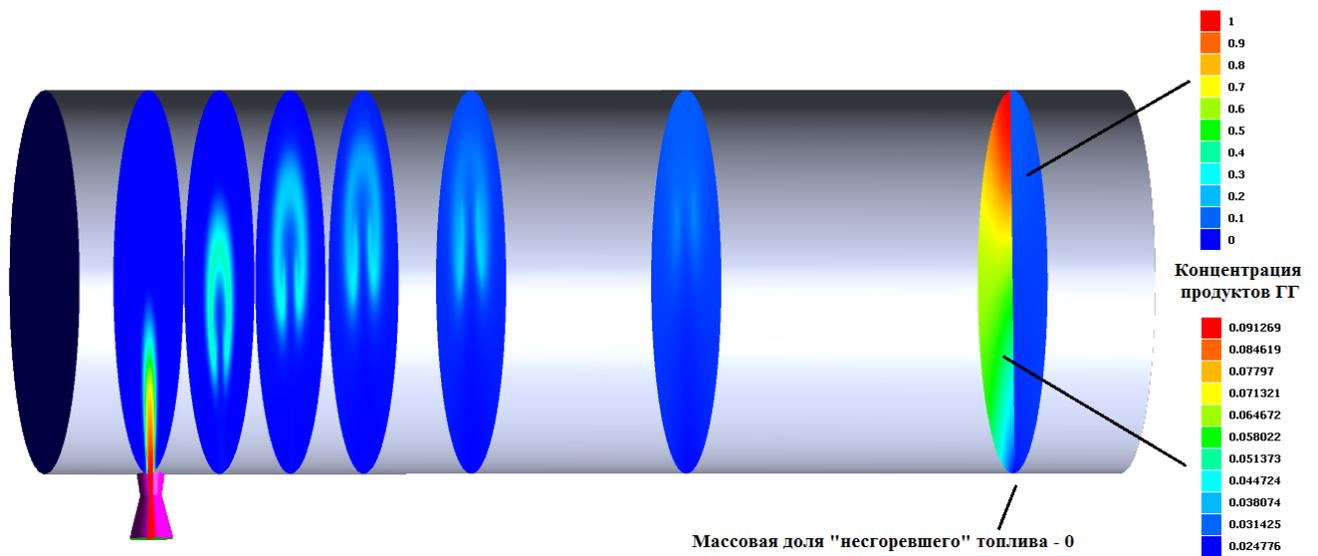


Рисунок 9. Распределение концентрации продуктов газогенерации по КС при угле вдува $\alpha = 90^\circ$.

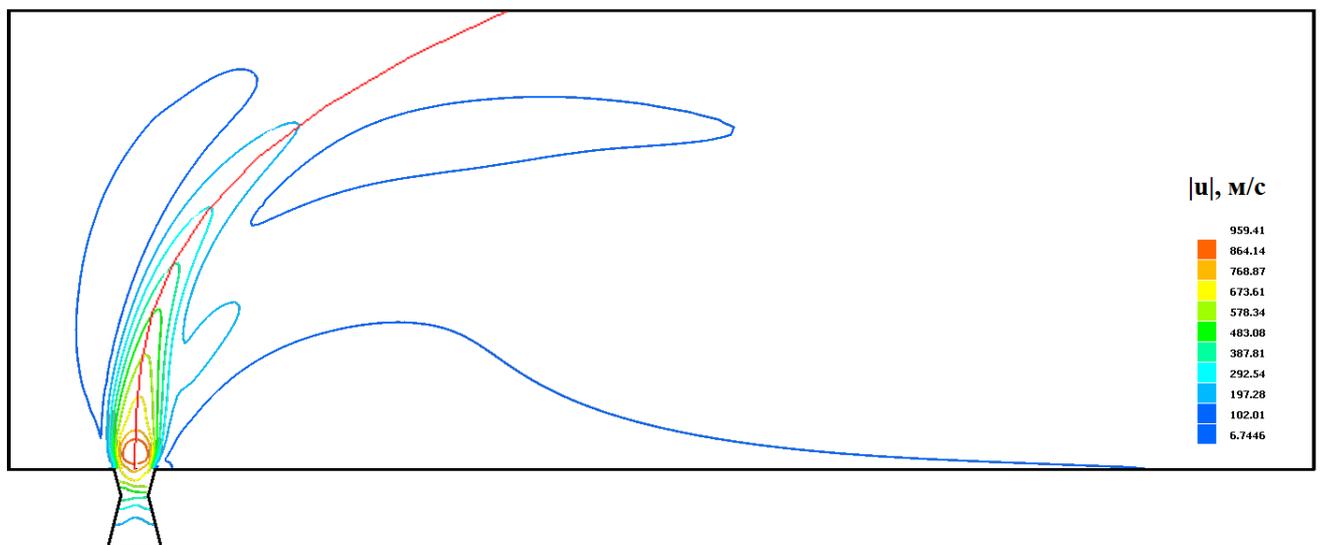


Рисунок 10. Изолинии модуля скорости в продольном сечении КС при угле вдува $\alpha = 90^\circ$.

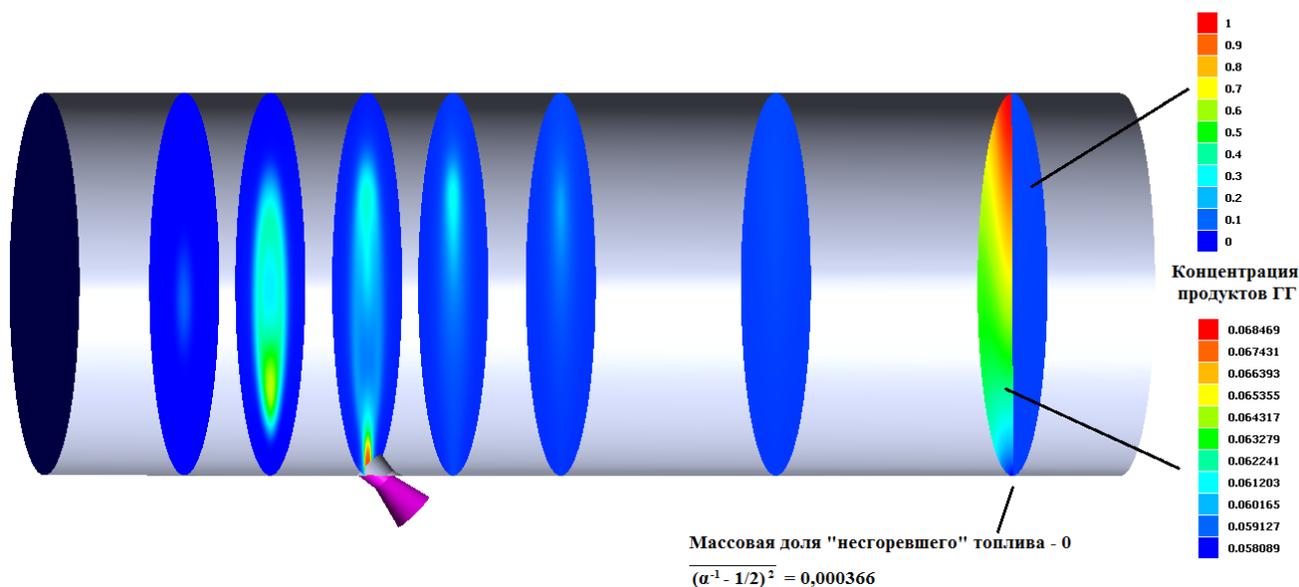


Рисунок 11. Распределение концентрации продуктов газогенерации по КС при угле вдува $\alpha = 135^\circ$

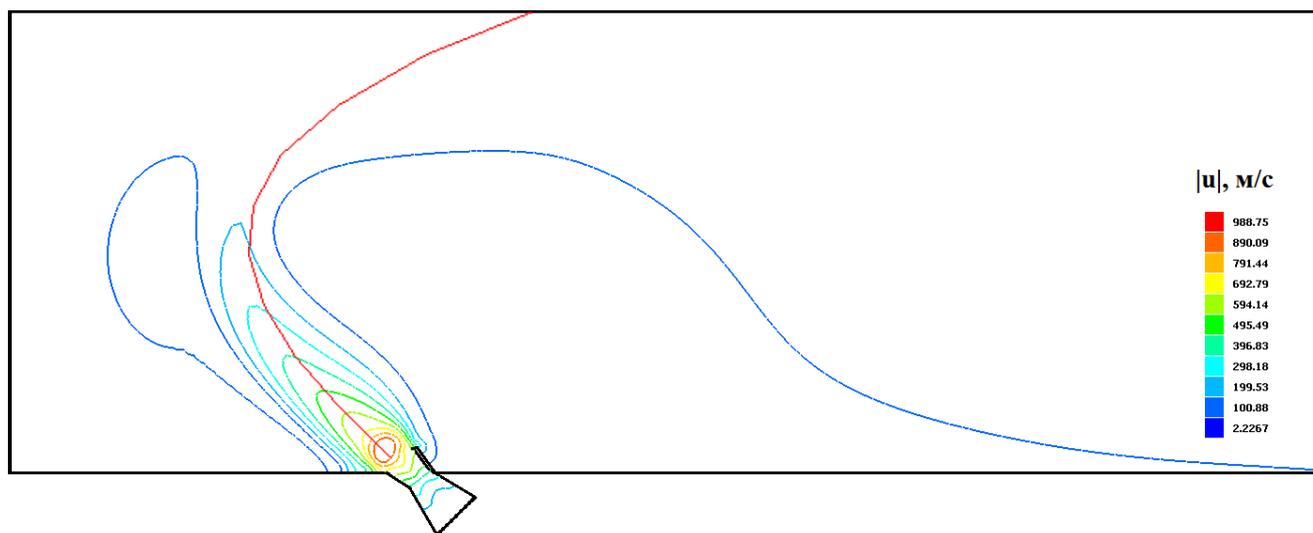


Рисунок 12. Изолинии модуля скорости в продольном сечении КС при угле вдува $\alpha = 135^\circ$.

Исследование движения частиц

Выше предполагалось, что частицы движутся с той же скоростью, что и газ.

Было получено, что наиболее равномерное распределение вдуваемого газа

получается при угле $\alpha = 135^\circ$. На самом деле траектории частиц могут отличаться от линий тока в большей или меньшей степени в зависимости от различных факторов (размера частиц, кривизны траектории и др.). При больших углах вдува частицы могут попадать на противоположную стенку КС. В результате значительно снижается эффективность рабочего процесса в основной камере сгорания, так как именно сгорание твёрдых частиц обеспечивает значительную долю тепловыделения в ней. Осаждение частиц может привести к прогару стенки КС.

Проведен трехмерный расчет движения частиц [8]. Частицы бора, добавляемые в состав в виде порошка, имеет высокую температуру плавления и практически не участвует в реакциях, происходящих в камере газогенератора. Поэтому при расчёте параметров термодинамического равновесия в газогенераторе концентрация бора фиксировалась.

Результаты расчёта поля концентраций вдуваемого компонента при угле подачи $\alpha = 120^\circ$ и траектории движения частиц бора, имеющих размер 1 мкм, изображены на рисунке 13. Твёрдые частицы увлекаются газовым потоком, хотя, несмотря на достаточно равномерное по сечению распределение продуктов газогенерации в конце КС, весь поток частиц бора сосредоточен в нижней половине камеры. Для сравнения на рисунке 14 приведён аналогичный расчёт в случае аксиальной подачи газогенераторного газа, демонстрирующий слабый разлёт твёрдых частиц.

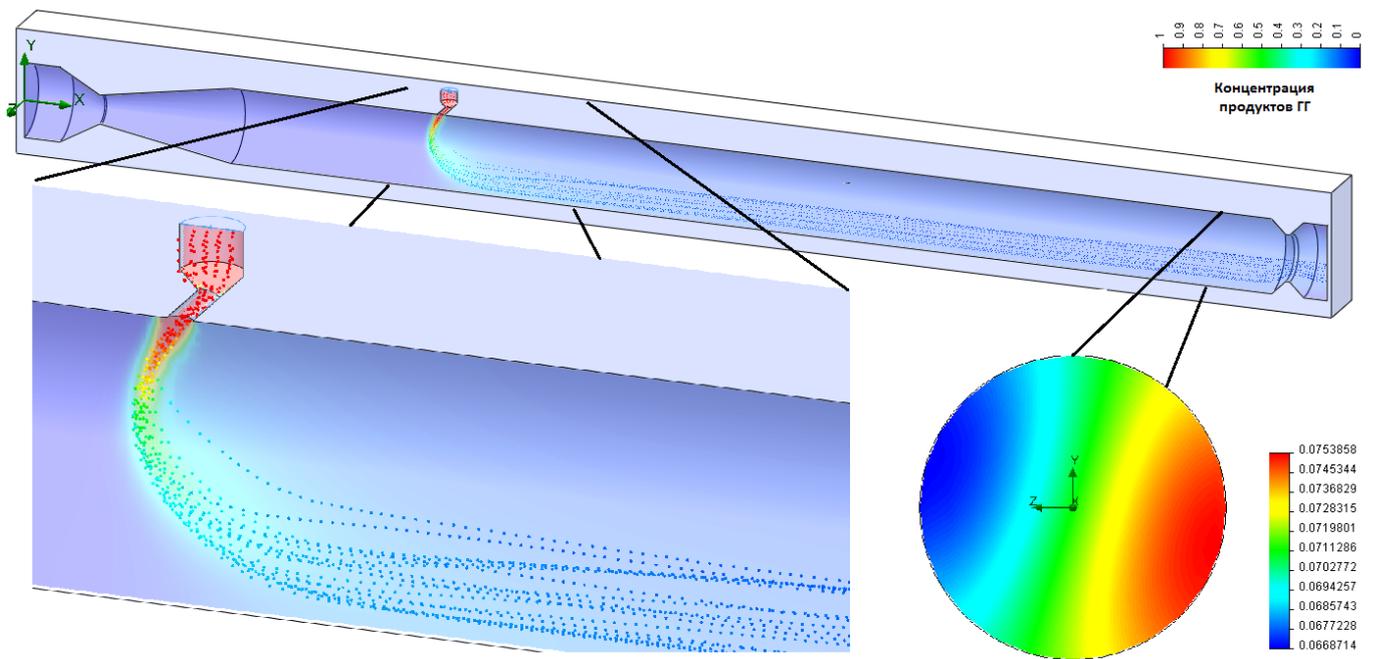


Рисунок 13. Распределение концентрации продуктов газогенерации и частиц (1 мкм) в КС при угле вдува 120°.

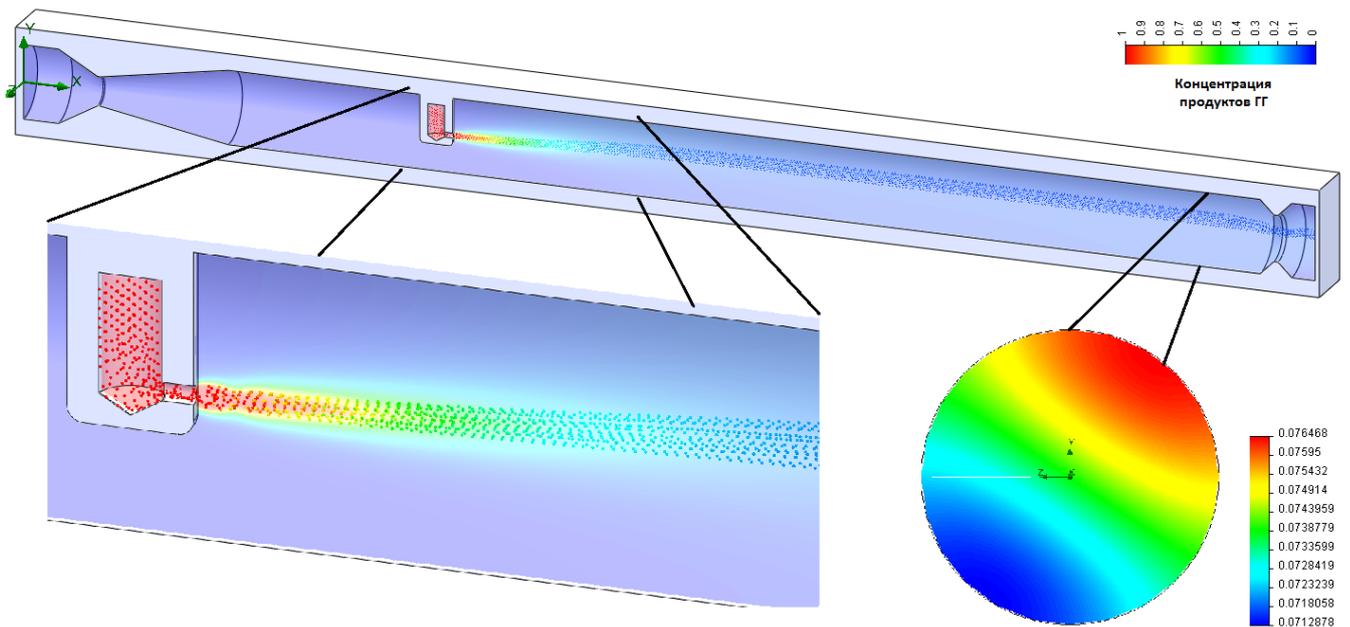


Рисунок 14. Распределение концентрации продуктов газогенерации и частиц (1 мкм) в КС при аксиальной подаче

Картина радикально меняется уже при размере частиц бора в 10 мкм (рисунок 15). Газовая фаза оказывает гораздо меньшее влияние на траекторию движения

твёрдых частиц, в результате они не успевают развернуться в направлении основного потока и попадают на противоположную стенку камеры сгорания. В этом случае аксиальная подача выглядит предпочтительнее.

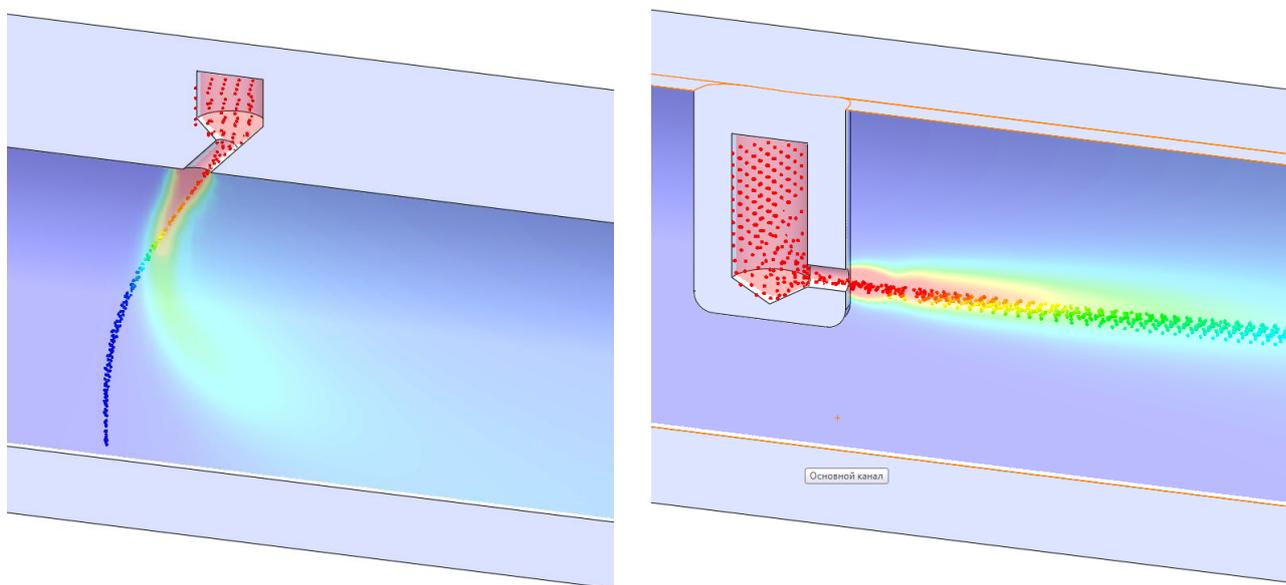


Рисунок 15. Траектория движения частиц (10 мкм) при угле вдува струи 120° и при аксиальной подаче.

Для выбора наиболее эффективного способа подачи газогенераторного газа в основную камеру сгорания необходимо иметь информацию о спектре твёрдых частиц, образующихся при газификации твёрдого топлива в камере газогенератора.

Выводы

При использовании соплового блока газогенератора с несколькими струями смешение интенсифицируется, что приводит к увеличению полноты сгорания. Эффективность сгорания топлива для конфигурации с шестью струями, расположенными по кругу, и одной центральной значительно ниже, чем в случае с четырьмя струями. В варианте с шестью струями отверстия имеют меньший

диаметр и, следовательно, расположены ближе друг к другу. Струи сливаются, ухудшая смешение с основным потоком.

При исследовании вдува продуктов газогенерации со стенки под различными углами было получено, что наиболее равномерное распределение вдуваемого газа обеспечивается при угле $\alpha = 135^\circ$. Траектории и осаждение конденсированных частиц определяются их размером. Мелкие частицы (диаметром порядка 1 мкм) равномерно и практически равномерно распределяются по основному потоку. Более крупные частицы существенно отстают от газа, что способствует снижению полноты сгорания, а также могут осаждаться на стенку камеры, приводя к ее деформации. В этом случае аксиальная подача выглядит предпочтительнее. Полученные результаты использованы при разработке комбинированных установок, использующих атмосферный воздух.

Библиографический список

1. Гиршович Т.А. Турбулентные струи в поперечном потоке. – М.: Машиностроение, 1993. – 256 с.
2. Шандоров Г.С. Истечение из канала в неподвижную и движущуюся среду // Журнал технической физики. 1957. Т. 27. № 1. С. 156-179.
3. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Физматгиз, 1960. - 720 с.
4. Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верховоломов В.К. и др. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твёрдых топливах. Основы теории и расчёта / Под ред. Л.С. Яновского. – М.: Академкнига, 2006. - 343 с.

5. Трусов Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий. // Труды XIV Международной конференции по химической термодинамике, Санкт-Петербург, 2002. - 483 с.
6. Ананьев А.В., Борисов Д.М., Васютин А.С. и др. Численное моделирование пространственных смешанных двухфазных течений с химическими превращениями применительно к воздушно-реактивным двигателям // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 2. С. 131-140.
7. Гидаспов В.Ю. Численное моделирование одномерного стационарного равновесного течения в детонационном двигателе // Труды МАИ, 2015, № 83: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=61826>
8. Гидаспов В.Ю. Численное моделирование стационарных волн горения и детонации в смеси частиц магния с воздухом // Труды МАИ, 2013, № 66: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40233>