

УДК: 629.735.33.016

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ В ПРЯМОТОЧНОМ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Л. Л. Картовицкий, В. М. Левин, А. А. Яковлев

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993 Москва
vadimlevin@yahoo.com

Обсуждается способ повышения эффективности систем смесеобразования в прямооточном воздушно-реактивном двигателе. Трехмерное моделирование подтверждает преимущества предложенного решения, основанного на применении нормальной подачи продуктов неполного сгорания пастообразного топлива в следовую зону за плохообтекаемым телом, установленным в сносящем потоке воздуха.

Ключевые слова: ракетно-прямоточный двигатель, смесеобразование, эффективность, камера дожигания.

DOI 10.15372/FGV20150305

ВВЕДЕНИЕ

В двигателях ракетно-прямоточных схем реализуется процесс дожигания продуктов неполного сгорания или первичного разложения горючего, поступающего в камеру сгорания из газогенератора. Продукты сгорания пастообразного или твердого топлива представляют собой двухфазную газожидкостную смесь. При этом кинетика реакций в догорающих продуктах оказывает слабое влияние на рабочий процесс. Можно утверждать, что используемая в расчетах модель квазигазового диффузионного факела, предложенная в [1, с. 79] для определения длины камеры сгорания ракетно-прямоточного двигателя, применима также при изучении смесеобразования в таких двигателях, работающих на пастообразном топливе.

Обзор и анализ методов смешения компонентов в камере дожигания прямооточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) на твердом топливе показывают, что для достижения приемлемой полноты сгорания топлива (>0.8) необходима большая относительная длина камеры дожигания ($7 \div 14$ калибров).

Низкая эффективность рабочего процесса связана с тем, что смешение реализуется при подаче сверхзвуковых струй газогенератора в дозвуковой поток воздуха с вектором, направленным вдоль оси камеры дожигания, спутно воздушному потоку. При этом для достижения

высокой полноты сгорания требуется использование длинных каналов.

Любая схема подачи имеет недостатки и достоинства. Дозвуковой вдув генераторного газа в ракетно-прямоточный двигатель характеризуется низким уровнем потерь давления и сопровождается интенсивным осаждением конденсированной фазы в инжекторных отверстиях, что порождает проблему управления расходом топлива. Сверхзвуковая подача характеризуется повышенными потерями давления и неудовлетворительными характеристиками смешения.

С целью оценки эффективности способов интенсификации смешения рассмотрены два способа смесеобразования, построенные на принципе вдува до- или сверхзвуковой струи топлива нормально сносящему потоку воздуха. С позиций организации смесеобразования, и особенно в каналах с большим проходным сечением, вдув струй со стенок канала неэффективен [2], вне зависимости от режима истечения — дозвуковой или сверхзвуковой, а также от агрегатного состояния вдуваемого потока (жидкость, газ или двухфазная смесь). Глубина проникновения струй зависит от многих факторов и, как правило, составляет несколько калибров сопла вдуваемого газа [3].

Рассматриваемое в данной работе устройство, позволяющее повысить эффективность смесеобразования, подобно способу стабилизации в ПВРД с горением в дозвуковом потоке. Вдув генераторного газа осуществляется вслед за плохообтекаемым телом. В работе [4] эффек-

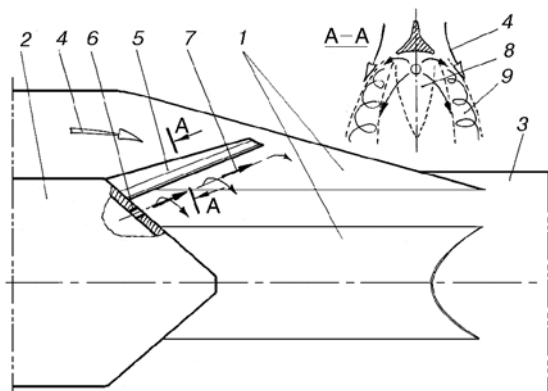


Рис. 1. Схема воздухозаборного устройства с дозвуковым поперечным вдувом генераторного газа:

1 — воздухозаборное устройство, 2 — центральное тело, 3 — камера дожигания, 4 — воздушный поток, 5 — стойка, 6 — инжектор, 7 — вектор подачи струи, 8 — зона обратных токов, 9 — вихревой след

тивность способа подтверждена при вдуве газа в сносящий сверхзвуковой поток.

На рис. 1 приведена схема устройства для исследования эффективности дозвуковой поперечной подачи газогенераторного топлива.

В работе рассматриваются схемы с двумя воздухозаборными устройствами 1 (ВЗУ), размещенными в корпусе ПВРД под углом 90° (на рис. 1 приведена несимметричная схема). Несимметричность размещения каналов ВЗУ на корпусе ПВРД обуславливает формирование сложной структуры парных вихрей в канале камеры, что способствует интенсификации смесеобразования.

Из выходного канала ВЗУ воздушный поток 4 поворачивает в камеру дожигания 3, где на конусе центрального тела 2 нормально или с незначительным отклонением по потоку установлены стойки 5 треугольного сечения. Отверстия для инжекции газа генератора 6 размещены у основания стоек в их следовой зоне, здесь вектор подачи 7 направлен вдоль оси соседней стойки. Со стороны торцевой поверхности стоек, т. е. в зоне обратных токов, скорость воздушного потока в осевом направлении равна нулю. Поэтому для вывода компонента в следовую зону потока давление подачи может быть снижено до минимального значения, струя топлива будет беспрепятственно распространяться вдоль ее торцевой поверхности практически при любом давлении вдува.

На рис. 1 приведено поперечное сечение

стойки А–А и картина ее пространственного обтекания потоком воздуха. Решение задачи заключается в организации равномерного слива генераторного газа из зоны обратных токов 8 в воздушный поток. Газ сносится воздухом с боковых кромок стоек и активно смешивается с воздухом в вихревом следе 9. Эффективность способа зависит от ряда конструктивных и газодинамических параметров: формы и количества стоек, количества и расположения инжекторов и направления векторов подачи.

В центральном теле размещены генератор газа и регулятор расхода. Суммарная площадь отверстий обеспечивает режим истечения топлива с дозвуковой скоростью во всем диапазоне расходов газогенератора. Наклонное расположение стойки в зоне поворота воздушного потока в основную камеру (зона расширения канала) обеспечивает снижение потерь давления при обтекании стоек.

Цель задачи — выравнять поля концентраций на ранней стадии взаимодействия компонентов. Перенос места подачи топлива в выходную зону канала ВЗУ ведет к увеличению времени пребывания смеси в проточной части, а наличие вихревого следа обеспечивает интенсификацию массообмена и способствует раннему смесеобразованию компонентов — все это ведет к укорочению пути смешения и росту эффективности рабочего процесса.

При оценке эффективности процесса смешения в проточном тракте может быть сформулирована задача оптимизации с целью минимизировать габариты проточной части и потери давления в устройстве, а также исключить нежелательный контакт продуктов горения со стенками конструкции тракта. Основной целью оптимизации является достижение удовлетворительной равномерности массовой концентрации топливовоздушной смеси в поперечных сечениях проточного тракта и особенно в области, прилежащей к зоне вдува топлива, при минимальных потерях полного давления.

Для решения задачи используется пакет ANSYS CFX. В качестве модели турбулентности выбрана модель Ментера SST. Параметры генераторного газа (при температуре 2280 К и давлении 100 атм): молярная масса — 16 кг/(К·моль), удельная теплоемкость газа при постоянном давлении — 2210 Дж/(кг·К), удельный импульс — $11.1 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с), теплопроводность — $343 \cdot 10^{-4}$ В/(м·К).

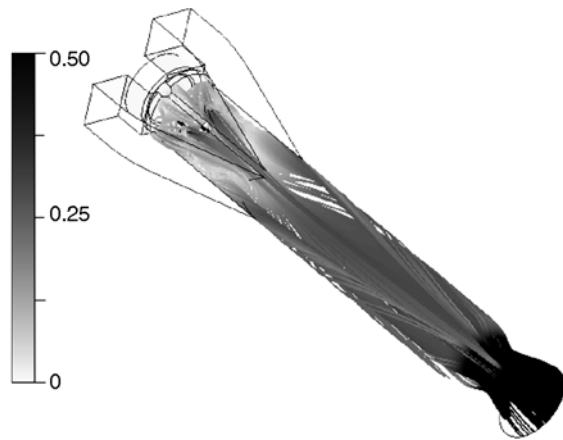


Рис. 2. Скорость движения газа генератора по линиям тока в камере дожигания при соосном сверхзвуковом вдуве

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительно был проведен анализ работы устройства со сверхзвуковой подачей горючего из инжекторов, размещенных на центральном теле, с вдувом топлива, направленным по оси камеры сгорания. Расчет выполнен в предположении отсутствия стоек и подачи топлива через девять инжекторов, размещенных также на конической поверхности. На рис. 2 показаны траектории линий тока газа генератора, а также изменение скорости газа в канале камеры с двумя воздуховодами ВЗУ (в пространственном изображении). Движение газа, поданного со сверхзвуковой скоростью, начинается от центрального тела. В начальной зоне идет интенсивное закручивание потока газа генератора по сложным траекториям. Наблюдается развитие парных вихрей вдоль канала. Их возникновение, как и неравномерность линий тока в начальной зоне камеры (имеются пустоты, где отсутствует топливо) и на срезе сопла, определены несимметричностью размещения ВЗУ и воздухопроводов. Такая геометрия приводит к образованию двух потоков топливовоздушной смеси, движущихся навстречу друг другу по винтовым линиям вдоль цилиндрического канала. Их перемешивание происходит только в хвостовой части камеры сгорания.

Недостаточная эффективность данного способа смешения компонентов подтверждается результатами расчета распределения массовых концентраций компонентов в проточном тракте, приведенными на рис. 3.

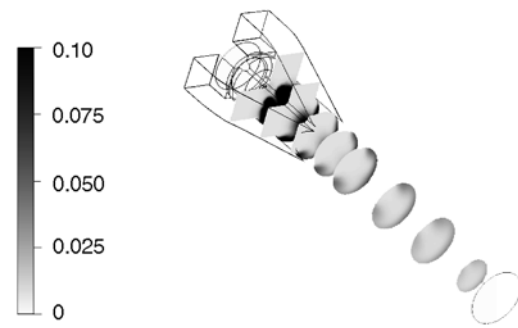


Рис. 3. Массовая концентрация газа генератора в канале с несимметричным расположением ВЗУ при сверхзвуковом осевом вдуве

Расчет демонстрирует явно несимметричную картину плотности концентрации топлива во входном сечении камеры дожигания.

Целью анализа является определение конструктивных параметров, существенно влияющих на смесеобразование, что позволит выявить способы эффективного управления процессом. При исследовании эффективности схем с поперечным вдувом выполнен анализ вариантов, характеризующихся следующими параметрами, предположительно оказывающими основное влияние на процесс смешения:

- форма и количество газодинамических стоек;
- диаметр, число и расположение отверстий подачи генераторного газа;
- угол наклона отверстий подачи генераторного газа (направление вектора инжекции) относительно продольной оси стабилизаторов.

Во всех расчетах, где варьируется количество инжекторных отверстий, с целью сохранения постоянства расхода генераторного газа, суммарная площадь отверстий принимается постоянной. Заданное значение обеспечивает режим истечения топлива с дозвуковой скоростью во всем диапазоне расходов газогенератора.

НОРМАЛЬНАЯ ДОЗВУКОВАЯ ПОДАЧА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

Для моделей несимметричной схемы (см. рис. 1) проведено около 25 расчетов. Ниже представлен результат расчета, полученный методом подбора вышеобозначенных конструктивных и газодинамических параметров. В данном численном эксперименте в каждой зоне выхода воздуха из воздушных каналов уста-

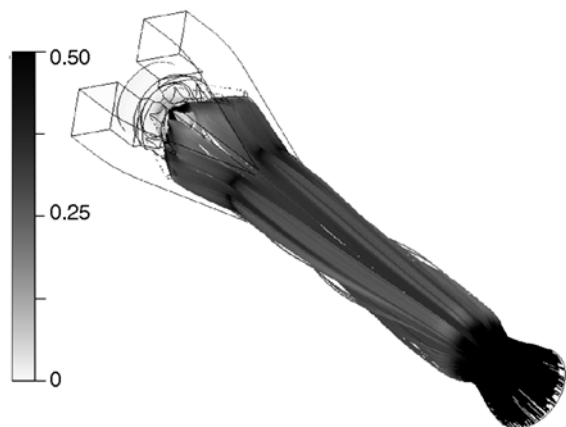


Рис. 4. Скорость движения газа генератора по линиям тока в камере дожигания при нормальном дозвуковом вдуве

новлено по две стойки. Торцевая поверхность стоек плоская. В следе каждой стойки имеется два инжекторных отверстия с вектором подачи, параллельным оси соседней стойки.

На рис. 4 приведены результаты расчета чисел Маха по линиям тока генераторного газа в сносящем воздушном потоке в канале. Картина распределения компонентов вполне удовлетворительная. Можно считать, что в соответствии с плотностью линий тока на входе в камеру дожигания и в средней зоне топливо распределено достаточно равномерно.

Эффективность данного способа организации смешения компонентов подтверждается результатами расчета распределения массовых концентраций компонентов в проточном тракте, приведенными на рис. 5. Расчет демонстрирует удовлетворительную картину распределения плотности концентрации топлива во входном сечении камеры дожигания.

Сравнение полученного результата с ва-

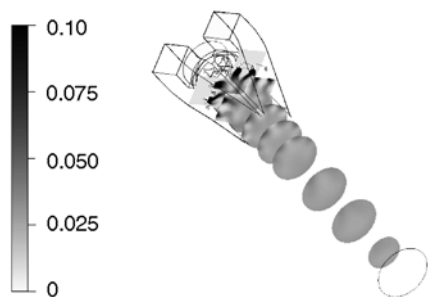


Рис. 5. Массовая концентрация газа генератора в канале с несимметричным расположением ВЗУ при нормальном дозвуковом вдуве

риантом использования осевой подачи газа со сверхзвуковой скоростью свидетельствует о преимуществе устройства дозвукового вдува и подтверждает наше представление о факторах, оказывающих доминирующее воздействие на процесс смесеобразования.

НОРМАЛЬНАЯ СВЕРХЗВУКОВАЯ ПОДАЧА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

Интерес к увеличению скорости истечения рабочего газа связан с нежелательным эффектом шлакообразования в отверстиях топливоподачи при малых скоростях инъекции, а также со стремлением к упрощению устройства.

Схема смесеобразования при симметричном расположении ВЗУ (с углом установки 180°) и сверхзвуковом вдуве топлива показана на рис. 6.

Трехмерное моделирование выполнено для двух вариантов исполнения стоек: прямой (2, показано ниже оси) или скругленной формы (3 изображено выше оси), установленных с наклоном на конусе центрального тела 1. Рассмотрено также влияние расположения ВЗУ на корпусе ПВД.

Нормальная подача газа 4 в воздушный поток 5 со сверхкритическим перепадом давления реализуется непосредственно в центральном теле. В отличие от дозвуковой подачи, здесь сверхзвуковая струя направлена под углом в стойку, что приводит к потере ее потенциальной энергии и растеканию струи по тор-

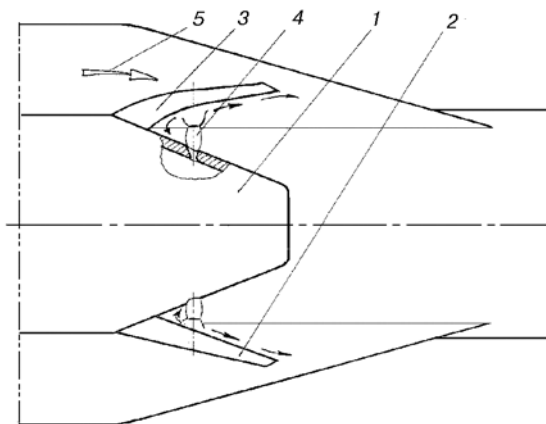


Рис. 6. Схема устройства с поперечной сверхзвуковой подачей горючего:

1 — центральное тело прямой (2) или скругленной формы (3), 4 — нормальная подача газа, 5 — воздушный поток

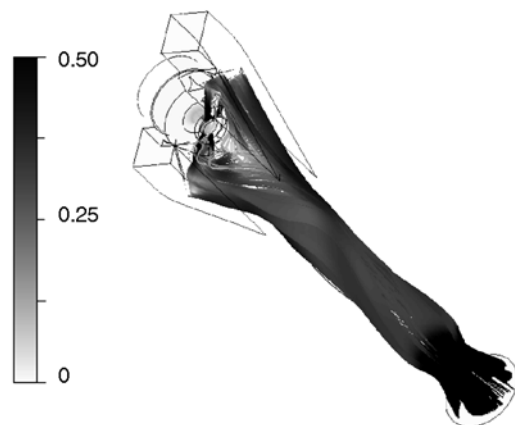


Рис. 7. Скорость движения газа генератора по линиям тока в камере дожигания при нормальном сверхзвуковом вдуве

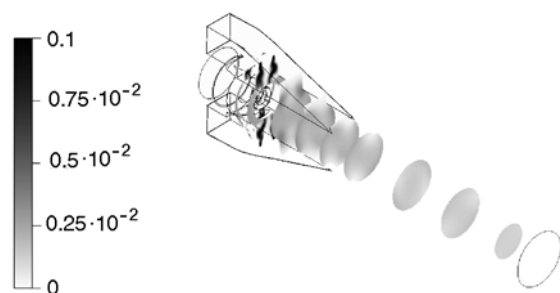


Рис. 8. Массовая концентрация газа генератора в канале с симметричным расположением ВЗУ при нормальном сверхзвуковом вдуве

цевой поверхности с дозвуковой скоростью.

Результаты расчета устройства симметричной схемы расположения ВЗУ на корпусе ПВРД с криволинейными стойками представлены на рис. 7 и 8. Сложное вихревое течение (см. рис. 7) приводит к сильному уплотнению линий тока газа генератора на входе в камеру дожигания и в средней зоне. Получена вполне удовлетворительная картина смешения.

Эффективность данного способа организации смешения компонентов подтверждается результатами расчета распределения массовых концентраций компонентов в проточном тракте, приведенными на рис. 8.

Результаты расчета устройства с прямыми стойками при симметричном расположении ВЗУ на корпусе ПВРД показали, что смешение не улучшилось.

Расчет смешения при вдуве газа под криволинейный пилон при несимметричной схеме подачи дал следующий результат: качество смешения, особенно на начальном участке, ухудшилось. В рамках данной работы и на уровне предварительного анализа можно предположить, что смешение при симметричном расположении ВЗУ обеспечивается встречным лобовым взаимодействием скрещивающихся воздушных потоков в начальной зоне камеры, в результате чего генерируется сложная вихревая газодинамическая структура. По-видимому, эта схема течения имеет преимущество в сравнении с несимметричной схемой, с характерным образованием парных воздушных вихрей.

ВЫВОДЫ

При организации эффективного смешения компонентов в камере сгорания имеет значение схема расположения ВЗУ, симметричность размещения воздухопроводов обеспечивает определенный выигрыш.

Способ сверхзвуковой нормальной подачи топлива способствует реализации эффективного смешения и в сравнении с дозвуковым вдувом демонстрирует определенное преимущество.

Форма пилона слабо влияет на эффективность смешения компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В. Н. и др. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. — М.: Академкнига, 2006.
2. Schetz J. Injection and mixing in turbulent flow. — Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics, 1980.
3. Аврашков В. Н. и др. Особенности методологии экспериментальных исследований рабочего процесса в камерах сгорания ПВРД в МАИ // Тр. XX науч. чтений по космонавтике. — М.: ИИЕТ РАН, 1996.
4. Vinogradov V. A. et al. Research of methane burning in high speed subsonic airflow at different fuel injection schemes // ISABE 2003-1152. — 2003.

Поступила в редакцию 18/XI 2013 г.,
в окончательном варианте — 16/VI 2014 г.