

УДК 532.516:662.61

В. И. ТИМОШЕНКО, А. Е. ДЕШКО*Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, Украина*

К ВОПРОСУ О РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ И ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПВРД

В рамках моделей «узкого канала» и «вязкого слоя» проведены численные исследования процессов смешения, воспламенения и горения дозвуковых и сверхзвуковых турбулентных струй, содержащих водород или углеводородное топливо, истекающих в спутный поток воздуха с целью определения рациональных параметров неравновесного течения. Приводятся результаты исследования влияния температурного режима, массового соотношения окислителя и горючего и положения сечения поджига на интенсивность и протяженность области горения. Показано, что выбор оптимальной температуры окислителя при самовоспламенении и рациональном расположении сечения поджига позволяет уменьшить протяженность области горения. Для уменьшения протяженности области горения сверхзвуковой струи, истекающей при заданном числе Маха, необходимо уменьшать температуру струи и задавать оптимальный для рассмотренных параметров на входе массовый состав топливной струи.

Ключевые слова: численное моделирование, упрощенные уравнения Навье-Стокса, неравновесные течения, кинетика горения, газообразные углеводородные топлива.

Введение

При отработке камеры сгорания ПВРД изучаются различные возможные способы сокращения области смешения и воспламенения, стабилизации и интенсификации процесса горения, увеличения полноты сгорания топлива [1 – 3]. Принципиальной задачей при выборе параметров камеры сгорания является стабилизация процесса горения и создание условий для сокращения зоны выгорания топлива. Экспериментально эти вопросы рассмотрены, например, в [2, 3]. Для концептуальных исследований влияния способов организации смешения и воспламенения углеводородного топлива в камере сгорания ПВРД более эффективным является использование методов численного моделирования. В связи с существенной неоднозначностью при моделировании характеристик турбулентности и химической кинетики использование упрощенных моделей является более целесообразным, чем применение полных уравнений Навье-Стокса.

Применение упрощенных уравнений «узкого канала» и «вязкого слоя» позволяет проводить численное моделирование как дозвуковых, так и сверхзвуковых турбулентных течений химически-реагирующих газовых смесей с учетом конечных скоростей химических реакций в плоских и осесимметричных протяженных каналах с небольшим искривлением линий тока при больших и умеренных числах Рейнольдса с использованием экономичных маршевых методов.

В работах [4 – 6] рассмотрены возможности улучшения процесса смешения и горения при помощи выбора уровня начальной турбулентности, расположения сечения поджига и рационального задания состава струи.

В настоящей статье обсуждаются результаты численных исследований процесса смешения, воспламенения и горения в дозвуковых и сверхзвуковых турбулентных струях, содержащих водород или углеводородное топливо, истекающих в спутный поток воздуха с целью определения оптимальных параметров неравновесного течения. Прикладная направленность статьи определяется проблемами рациональной организации процессов горения в камерах сгорания ПВРД.

Постановка задачи и алгоритм ее решения

Численное моделирование стационарного двумерного неравновесного течения химически-реагирующей газовой смеси в осесимметричном канале выполнено в рамках упрощенных уравнений «узкого канала» и «вязкого слоя» [7 – 9]. Модель «узкого канала» используется при условии постоянства статического давления в поперечном направлении, что может иметь место при дозвуковых течениях в каналах с плавным изменением площади поперечного сечения. Последнее обстоятельство существенно ограничивает класс решаемых задач только задачами с малыми поперечными градиентами дав-

ления. Модель «вязкого слоя» адекватно описывает вязкие сверхзвуковые течения с небольшими дозвуковыми зонами с учетом влияния поперечного градиента давления на характеристики рассматриваемого течения. Для расчета параметров турбулентности используется дифференциальная однопараметрическая модель турбулентности « $v_t - 90$ », записанная в приближении пограничного слоя [10].

Схемы рассматриваемых течений представлены на рис. 1.

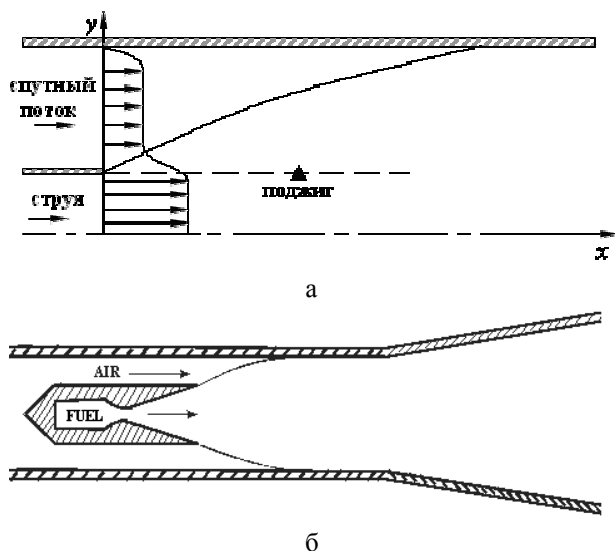


Рис. 1. Схемы рассматриваемых дозвуковых (а) и сверхзвуковых (б) течений

Расчет проводится численно вдоль основного направления течения в канале маршевым методом. Вследствие «жесткости» уравнений диффузии при протекании химических реакций в основу алгоритма численного расчета положен метод расщепления по физическим процессам [11]. На первом шаге расщепления учитывается изменение массового состава только за счет химического взаимодействия, в каждом узле расчетной сетки используется неявный многошаговый метод Гира (Gear W.C.) [12]. На шаге конвективно-диффузионного переноса интегрирование дифференциальных уравнений 2-го порядка в отсутствии химического взаимодействия между компонентами смеси осуществляется с использованием неявной абсолютно устойчивой итерационной схемы типа Кранка – Николсона с применением скалярной прогонки с итерациями по нелинейности.

Продольный градиент давления dp/dx , являющийся неизвестной функцией при расчете внутренних течений в приближении «узкого канала», определяется из условия постоянства расхода в каждом сечении осесимметричного канала. При этом автоматически выполняется второе граничное условие для поперечной скорости (на стенке канала),

являющейся решением уравнения первого порядка. Уравнение движения для продольной скорости решается с выделением явной зависимости от dp/dx [13].

Для интегрирования уравнений «вязкого слоя» в отсутствии химического взаимодействия используется алгоритм, основанный на каскадной неявной схеме решения задачи [8]. Для этого система уравнений, приближенно описывающая течения вязкого газа, разбивается на две подсистемы – подсистему уравнений первого и второго порядка. Для каждой из подсистем в отдельности постановка задачи Коши является корректной, а решение можно получить, применяя маршевый алгоритм. Для интегрирования каждой подсистемы используются неявные абсолютно устойчивые схемы на основе скалярной прогонки первого порядка аппроксимации по продольной и второго порядка по поперечной переменной. Искомое решение на каждом маршевом слое получается в результате последовательных итераций первой и второй подсистем уравнений. Для регуляризации решения в дозвуковых областях вводится регуляризирующий множитель в слагаемые содержащие производную от давления и в выражение для полной энтальпии [14].

Расчетная область представляет собой участок канала между его начальным и конечным сечениями. Во входном сечении канала задаются начальные распределения газодинамических параметров. На оси канала задаются условия симметрии течения, на стенке – условия теплоизолированной и непроницаемой стенки. Струя и спутный поток на входе в канал полагаются равномерным за исключением области пограничного слоя на стенке канала. Профили скорости и температуры в пограничном слое во входном сечении задаются в соответствии с распределением на плоской пластине в отсутствие градиента давления [15]. Используется нормировка расчетной области и сгущение сетки.

В качестве кинетической модели горения углеводородного топлива (пропана C_3H_8) в кислороде воздуха используется глобальная одностадийная кинетическая модель [16]. Для моделирования механизма окисления водорода в кислороде воздуха используется кинетическая схема, включающая 9 химических реакций [17]. Такая модель позволяет достаточно точно описать инициирование процесса горения, определить период индукции и величину тепловыделения при минимальных затратах вычислительных ресурсов [18]. Схема содержит 7 компонентов H_2 , O_2 , H , O , OH , H_2O , N_2 , азот в ней полагается инертным газом.

Результаты численных исследований

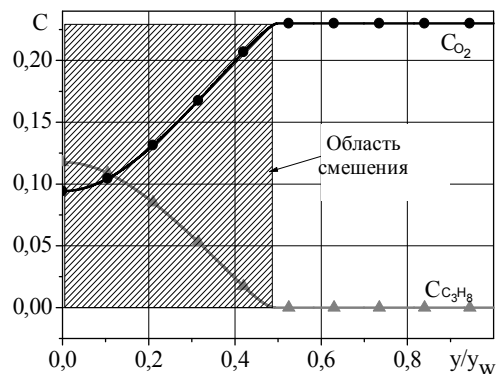
Численные исследования дозвукового горения. Особенности дозвукового горения исследованы в рамках модели «узкого канала». Рассмотрено течение холодной струи пропана в спутный поток воздуха в осесимметричном канале. Расчеты выполнены при следующих значениях параметров течения в начальном сечении канала. В струе $U_{jet}=25$ м/с; $T_{jet}=300$ К; $C_{C_3H_8}=0,2$; $C_{N_2}=0,8$. В спутном потоке воздуха $U_{air}=100$ м/с; $T_{air}=300 - 1000$ К; $C_{O_2}=0,23$; $C_{N_2}=0,77$. Давление в струе и спутном потоке $P=1$ бар; характерное число Рейнольдса $Re=10^6$.

Проведены исследования влияния воспламенения топлива на интенсивность процесса перемешивания и горения. В случае, когда осуществляется самовоспламенение топлива (рассматривается течение холодной топливной струи в спутный поток горячего воздуха), показано, что увеличение температуры спутного потока приводит к затягиванию процесса горения. Это объясняется тем, что процесс горения в условиях неперемешанных компонентов приводит к ухудшению процесса смешения, который ограничивается фронтом пламени. На рис. 2 а и 2 б показаны профили концентраций пропана и водорода при температуре спутного потока 700 К и 900 К, соответственно, в сечении канала при $x=5$. Области смешения компонентов заштрихованы. При высокой температуре воздуха, практически сразу, в области смешения, происходит воспламенение топлива, процесс смешения компонентов ограничивается фронтом пламени, область смешения очень мала и медленно расширяется вниз по потоку (рис. 2 б). При снижении температуры воздуха до минимальной температуры, обеспечивающей самовоспламенение топлива (для пропана – 700 К), период задержки воспламенения значительно увеличивается, однако при этом активно происходит перемешивание окислителя и горючего. В сечении $x=5$ (рис. 2 б) – воспламенения еще не произошло, но в потоке уже имеется значительная область подготовленной смеси. Сечение воспламенения сдвигается вниз по потоку, после воспламенения происходит интенсивное распространение пламени.

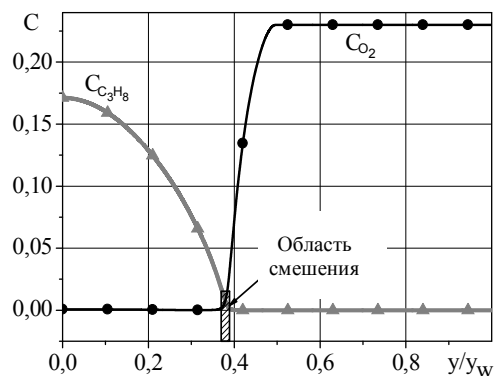
В случае течения холодных компонентов окислителя и горючего для осуществления процесса горения используется поджиг. При горении с поджигом обнаружены те же закономерности, что и при самовоспламенении. Показано, что расположение сечения поджига позволяет управлять длиной зоны горения. При отдалении сечения поджига от среза сопла – с одной стороны, увеличиваем объем подго-

товленной смеси для воспламенения, с другой стороны – удлиняем область до начала воспламенения.

Рис. 3 иллюстрирует влияние расположения сечения поджига на полноту сгорания и протяженность области выгорания топлива. Для каждой из представленных кривых расстояние вдоль канала между значениями $\eta=0$ и $\eta=1$ на рис. 3 соответствует протяженности области выгорания топлива. Расстояние от сечения поджига до полного выгорания топлива немонотонно зависит от координаты сечения x_{podz} : при увеличении x_{podz} от 0,5 до 5 длина зоны выгорания уменьшается от 12 до 2,5 y_w , затем увеличивается и становится больше 10 y_w при увеличении x_{podz} от 5 до 15. Неоправданно большое отдаление сечения поджига приводит к неполному сгоранию топлива, оказавшегося возле стенки канала, куда область горения доходит значительно позже (рис. 3, кривые $x_{podz}=10$; $x_{podz}=15$).



а



б

Рис. 2. Профили концентраций пропана и кислорода при $x=5$:

а - $T_{air}=700$ К, б - $T_{air}=900$ К

Т. о., для рассмотренных случаев дозвукового горения показано, что воспламенение топлива приводит к замедлению процесса смешения при течении неперемешанных компонентов горючего и

окислителя. Для интенсификации процесса горения необходимо добиваться, чтобы горение начиналось в области подготовленной смеси. Для этого, при самовоспламенении температура окислителя должна быть минимальной, обеспечивающей самовоспламенение топлива, в случае течения холодных компонентов сечение поджига следует отдалять на рациональное расстояние от среза сопла.

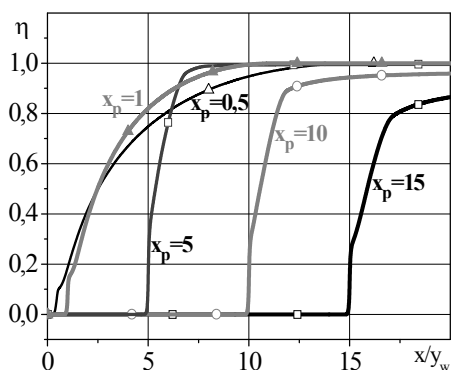


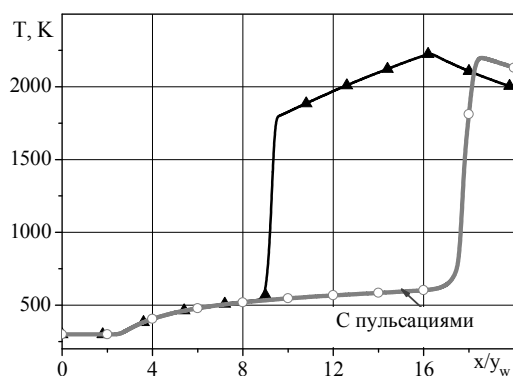
Рис. 3. Распределение полноты сгорания при поджиге в различных сечениях

Проведены исследования влияния турбулентных пульсаций на развитие процесса горения [19], которые показали, что их учет оказывает заметное влияние на развитие процесса горения в случае воспламенения плохо перемешанных компонентов. При самовоспламенении пульсации концентраций приводят к задержке воспламенения топлива (рис. 4 а). При поджиге пульсации концентраций могут приводить к затуханию процесса горения и неполному сгоранию топлива (рис. 4 б).

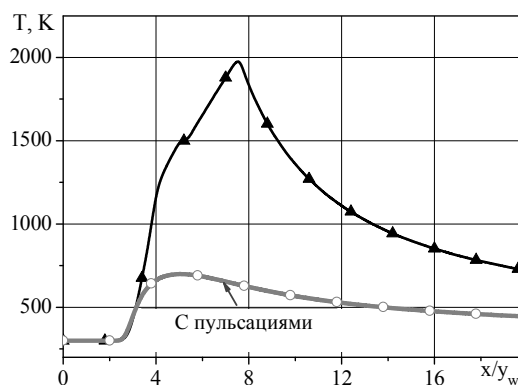
Численные исследования сверхзвукового горения. Особенности сверхзвукового горения исследованы в рамках модели «вязкого слоя» [6]. При организации процесса горения в камере сгорания ПВРД давление в ресивере остается постоянным. В таком режиме истечение происходит при постоянном числе Маха на срезе сопла.

Целью исследований является выяснение особенностей сверхзвукового горения и определение рациональных параметров топливной струи для уменьшения длины области выгорания и получения максимального тепловыделения и полноты сгорания топлива. В рамках модели «вязкого слоя» моделируется истечение холодной сверхзвуковой водородной струи в спутный поток горячего воздуха в осесимметричном канале переменного сечения. Расчеты выполнены при следующих значениях исходных данных: спутный поток – $T_{air}=919\text{ К}$; $P_{air}=0,6\text{ бар}$; $M_{air}=2,75$; $U_{air}=1639\text{ м/с}$; струя – $T_{0jet}=280\text{ К}$; $P_{jet}=0,62\text{ бар}$; $M_{jet}=2,4$; $U_{jet}=650\text{ м/с}$, $Re=4\cdot 10^5$.

Особенности воспламенения холодной струи водорода в спутном потоке горячего воздуха определяются сочетанием в слое смешения уровня температуры со значениями концентраций водорода и кислорода воздуха и разности скоростей в струе и в спутном потоке. В результате исследования возможности сокращения области воспламенения и горения топлива установлено, что добавление воздуха в топливную струю приводит к значительной интенсификации процесса горения, сокращению протяженности области горения и увеличению полноты сгорания. Это объясняется тем, что при добавлении воздуха, несмотря на уменьшение топлива в струе, в результате улучшения параметров смешения и воспламенения, увеличивается полнота сгорания, в результате повышается уровень тепловыделения, уменьшается расход топлива и выброс несгоревшего топлива в атмосферу. Задача заключается в выборе рационального соотношения воздуха и водорода в струе для достижения лучших значений параметров на выходе



а



б

Рис. 4. Распределение температуры на оси при самовоспламенении (а) и поджиге (б):
а - $T_{air}=700\text{ К}$ б - $x_{podz}=2$

Исследовано влияние изменения массового состава струи при добавлении воздуха в водородную струю при сохранении числа Маха на срезе сопла на газодинамические параметры струи и их влияние на развитие процессов смешения и горения. Увеличение массового содержания водорода в струе приводит к: увеличению скорости струи U_{jet} ; уменьшению скоростного отставания струи ΔU ; увеличению расхода топлива в струе $G_{jet}^{H_2}$.

Вследствие ухудшения параметров смешения и воспламенения, вызванного увеличением U_{jet} и уменьшением ΔU , несмотря на увеличение расхода топлива $G_{jet}^{H_2}$, происходит снижение полноты сгорания η , уменьшение тепловыделения и увеличение вредных выбросов в виде несгоревшего топлива. Из анализа графиков поведения параметров струи во входном сечении и полноты сгорания и осредненной температуры в выходном сечении (рис. 5) при изменении состава струи определен оптимальный массовый состав струи, для которого наблюдается максимальная полнота сгорания и уровень тепловыделения на выходе при минимальном расходе топлива.

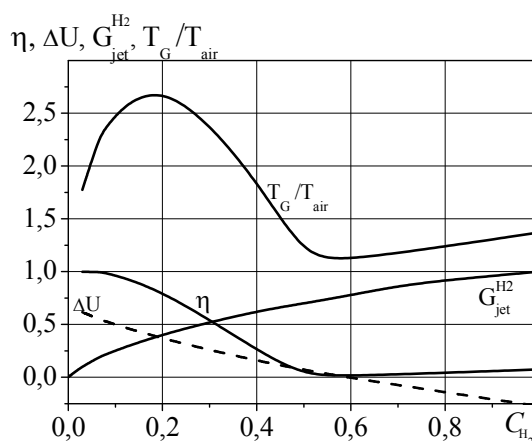
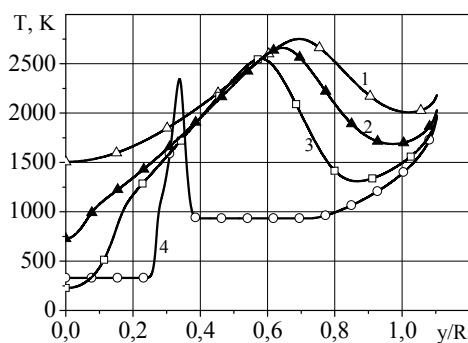


Рис. 5. Зависимость параметров струи во входном сечении (ΔU , $G_{jet}^{H_2}$), полноты сгорания η и осредненной температуры на выходе от массового содержания водорода в струе

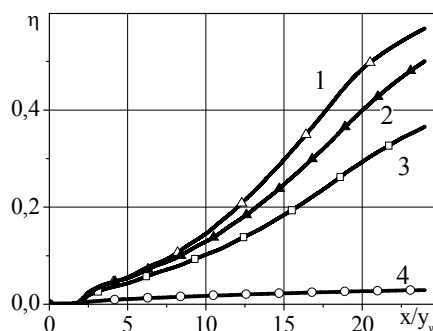
Исследовано влияние температуры струи на интенсификацию процесса горения. При изменении температуры газа в ресивере меняются параметры струи на срезе сопла.

Повышение температуры в ресивере при $M_{jet} = \text{const}$ на срезе сопла приводит к увеличению скорости, уменьшению скоростного отставания струи ΔU и уменьшению расхода. В результате

происходит ухудшение процесса смешения, что приводит к уменьшению полноты сгорания и уровня тепловыделения на выходе (рис. 6 а, б). При $T_{0jet}=700$ К имеем диффузионный режим горения, горение происходит в узкой области смешения, низкая полнота сгорания топлива (рис. 6, кривая 4). Оптимальной является температура топлива в ресивере 200 К (рис. 6, кривая 1).



а



б

Рис. 6. Влияние температуры торможения струи на профили статической температуры (а) и полноту сгорания топлива (б) в выходном сечении:
1 – $T_{0jet}=200$ К; 2 – $T_{0jet}=280$ К; 3 – $T_{0jet}=400$ К;
4 – $T_{0jet}=700$ К

Заключение

Выявлены закономерности воспламенения и горения топлива в спутном потоке как при дозвуковом, так и при сверхзвуковом горении, использование которых позволяет интенсифицировать процесс сгорания топлива.

При дозвуковом горении сокращение области горения может быть осуществлено надлежащим выбором рациональной температуры спутного потока или расположения сечения поджига. При сверхзвуковом горении добавление окислителя в водо-

родную струю позволяет значительно интенсифицировать процесс горения. При этом необходимо: осуществлять подачу топливной струи при минимальной скорости, обеспечивая перепад скоростей в струе и спутном потоке. При заданном числе Маха истечения это может быть обеспечено уменьшением температуры топливной струи и заданием оптимального для рассмотренных параметров на входе массового состава воздушно-водородной струи.

Литература

1. Curran, E. T. *Scramjet Engines: The First Forty Years* [Text] / E. T. Curran // *Journal of Propulsion and Power*. – 2001. – Vol. 1, № 6. – P. 1138 – 1148.
2. Левин, В. М. Проблемы организации рабочего процесса в ПВРД [Текст] / В. М. Левин // *Физика горения и взрыва*. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 45 – 55.
3. Виноградов, В. А. Исследование воспламенения и горения водорода в канале при высоких сверхзвуковых скоростях потока на входе в канал [Текст] / В. А. Виноградов, М. А. Гольдфельд, А. В. Старов // *Физика горения и взрыва*. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 3 – 11.
4. Тимошенко, В. И. Смешение истекающих из целевых сопел дозвуковых струй углеводородного горючего со спутным сверхзвуковым потоком в канале [Текст] / В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец, Н. В. Гурылева // *Техническая механика*. – 2012. – № 4. – С. 36 – 48.
5. Тимошенко, В. И. К вопросу интенсификации горения углеводородного топлива в спутном потоке воздуха [Текст] / В. И. Тимошенко, А. Е. Дешко, И. С. Белоцерковец // *Техническая механика*. – 2010. – № 3. – С. 71 – 80.
6. Тимошенко, В. И. О влиянии массового состава неравновесной воздушно-водородной струи на интенсификацию процесса горения в спутном сверхзвуковом потоке воздуха [Текст] / В. И. Тимошенко, А. Е. Дешко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 3(110). – С. 52 – 58.
7. Тимошенко, В. И. Кинетическое горение при турбулентном смешении метаносодержащих струй со спутным дозвуковым потоком воздуха [Текст] / В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец // *Техническая механика*. – 2007. – № 2. – С. 8 – 24.
8. Тимошенко, В. И. Маршевый расчет течения при взаимодействии сверхзвуковой турбулентной струи со спутным ограниченным дозвуковым потоком [Текст] / В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец // *Вісник Дніпропетровського університету*. – 2008. – Т. 1, Вип. 1. – С. 15 – 23.
9. Тимошенко, В. И. Теоретические основы технической газовой динамики [Текст] / В. И. Тимошенко. – К. : Наук. думка, 2013. – 426 с.
10. Гуляев, А. Н. К созданию универсальной однопараметрической модели турбулентной вязкости [Текст] / А. Н. Гуляев, В. Е. Козлов, А. Н. Секундов // *МЖГ*. – 1993. – № 4. – С. 69 – 81.
11. Ковеня, В. М. Метод расщепления в задачах газовой динамики [Текст] / В. М. Ковеня, Н. Н. Яненко. – Новосибирск : Наука, 1981. – 304 с.
12. Gear, C. W. *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations* [Text] / C. W. Gear. – New Jersey : Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1971. – 253 p.
13. Тимошенко, В. И. Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов [Текст] / В. И. Тимошенко. – Днепропетровск : Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 2003. – 460 с.
14. Родионов, А. В. Новый маршевый метод расчета струй продуктов сгорания [Текст] / А. В. Родионов // *Журн. выч. мат. и матем. физики*. – 2002. – Т. 42, № 9. – С. 1413–1424.
15. Лойцянский, Л. Г. *Механика жидкости и газа* [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1987. – 840 с.
16. Физико-химические процессы в газовой динамике [Текст] : справочник. Т. 2. Физико-химическая кинетика и термодинамика / под ред. Г. Г. Черного и С. А. Лосева. – М. : Научно-издательский центр механики. – 2002. – 368 с.
17. Баев, В. К. Горение в сверхзвуковом потоке [Текст] / В. К. Баев, В. И. Головичев, П. К. Третьяков. – Новосибирск : Наука, 1986. – 301 с.
18. Дешко, А. Е. О выборе кинетической модели горения водорода при численном моделировании сверхзвукового неравновесного течения [Текст] / А. Е. Дешко // *Техническая механика*. – 2014. – № 1. – С. 37 – 46.
19. Дешко, А. Е. О влиянии модели турбулентности и пульсаций концентраций компонент газовой смеси на расчетные параметры течения при горении углеводородного топлива в спутном потоке воздуха в канале [Текст] / А. Е. Дешко // *Техническая механика*. – 2012. – № 4. – С. 49 – 58.

Поступила в редакцию 3.06.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. механотроники А. А. Приходько, Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара, Днепропетровск.

ДО ПИТАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЗМІШУВАННЯ І ГОРІННЯ В КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ППРД

В. І. Тимошенко, Г. Є. Дешко

В рамках моделей «вузького каналу» та «в'язкого шару» з метою визначення оптимальних параметрів нерівноважної течії проведено чисельні дослідження процесу змішування, запалювання і горіння дозвукових і надзвукових турбулентних струменів, що містять водень або вуглеводневе паливо та витікають у супутній потік повітря. Наводяться результати дослідження впливу температурного режиму, масового співвідношення окислювача і пального і положення перерізу запалювання на інтенсивність і протяжність області горіння. Показано, що вибір оптимальної температури окислювача при самозапалюванні та раціональному розташуванні перерізу запалювання дозволяє зменшити протяжність області горіння. Для зменшення протяжності області горіння надзвукового струменя, що витікає при заданому числі Маха необхідно зменшувати температуру струменя і задавати оптимальний для розглянутих параметрів на вході масовий склад паливного струменя.

Ключові слова: чисельне моделювання, спрощені рівняння Нав'є-Стокса, нерівноважні течії, кінетика горіння, газоподібні вуглеводневі палива.

ON THE RATIONAL IMPLEMENTATION OF PROCESSES OF MIXING AND COMBUSTION WITHIN RAMJET COMBUSTION CHAMBER

V. I. Timoshenko, A. Ye. Deshko

For models of a narrow channel and a viscous layer processes of mixing, injection and combustion of subsonic and supersonic turbulent jets, containing hydrogen or hydrocarbon fuel, exhausting into a cocurrent air flow are studied numerically to determine rational parameters of a nonequilibrium flow. The results of studying the effects of the temperature regime, the mass oxidizer-fuel relation and the ignition section position on the intensity and the extent of the combustion zone are presented. It is shown that the selection of an optimal temperature of oxidizer at self-energized ignition and a rational position of the ignition section results in a decrease in the combustion zone extent. In order to lower the extent of the combustion region of the supersonic jet exhausting at a given mach number, it is necessary to lower the jet temperature and set an optimal mass-inlet composition of a fuel jet for parameters under consideration.

Keywords: numerical simulation, simplified Navier-Stokes equations, nonequilibrium flows, combustion kinetics, gaseous hydrocarbon fuels.

Тимошенко Валерій Іванович – д-р физ.-мат. наук, проф., член-корреспондент НАНУ, зав. отделом аэрогазодинамики Института технической механики, Национальная академия наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск, Украина.

Дешко Анна Евгеньевна – мл. науч. сотр. отдела аэрогазодинамики Института технической механики, Национальная академия наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: deshanya@list.ru.