

О. С. Ванькова^{1,2}, **М. А. Гольдфельд**¹, **Н. Н. Федорова**^{1,2}

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия*

vankova@itam.nsc.ru, gold@itam.nsc.ru, nfed@itam.nsc.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ*

Представлены результаты математического моделирования течения в сверхзвуковой камере сгорания, которое было выполнено для условий инициирования горения с помощью электронного пучка высокой энергии на основе предложенной модели воспламенения. Расчеты проведены на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, дополненных $k-\omega$ SST моделью турбулентности и блоком детальной химической кинетики. В результате численного моделирования показано, что математическая модель позволяет предсказать воспламенение смеси при низких температурах торможения. Полученные результаты согласуются с данными экспериментов. Установлено, что выбор оптимальной схемы стабилизации и геометрии стабилизатора пламени позволяет обеспечить распространение пламени по всему каналу и устойчивость горения даже при высоких числах Маха. Предложенная математическая модель позволила определять условия воспламенения.

Ключевые слова: камера сгорания, математическое моделирование, воспламенение, сверхзвуковое течение, стабилизация горения.

Проблема инициирования воспламенения и устойчивого горения в сверхзвуковых потоках является одной из ключевых задач внутренней аэродинамики гиперзвуковых скоростей. Помимо газодинамических способов, таких как изменение газодинамических параметров и геометрии течения, улучшение перемешивания топлива с окислителем, турбулизации потока и др., большое значение имеет оптимизация кинетических механизмов воспламенения. Многочисленные исследования по инициированию воспламенения и горения в высокоскоростных потоках связаны с развитием гиперзвуковых летательных аппаратов и их основного элемента – гиперзвукового воздушно-реактивного двигателя [1; 2]. Цель этих усилий

состоит в стремлении повысить энергетическую эффективность и экологичность силовой установки, в частности сверхзвуковой камеры сгорания.

Широко распространено мнение, что использование плазменных технологий для управления процессами в камере сгорания поможет решить многие актуальные проблемы [3–5]. Эти исследования важны с фундаментальной точки зрения при исследовании физики плазменных и плазмохимических структур, кинетики горения, управления воздушным потоком с помощью плазменных образований и других родственных задач. Представляет интерес получение новых сведений о взаимодействии плазменных образований с высокоскорост-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-19-00010).

ными, в том числе неоднородными, воздушно-топливными потоками газа. Это взаимодействие является комплексным, так как содержит механическую, тепловую и плазмохимическую составляющие.

Плазменные воздействия на поток для инициации воспламенения могут преследовать различные цели: нагрев газа, интенсификацию смешения топлива и воздуха вблизи зоны реакции или дополнительную генерацию активных радикалов [5; 6]. В результате проведенных исследований были получены экспериментальные данные по воспламенению топлива и стабилизации горения с использованием плазменного воздействия [7; 8]. Различные подходы и методы, направленные на снижение температуры воспламенения, представлены в обширном обзоре [3]. Среди этих методов – иницирование горения электрическими разрядами различных типов (искровые, барьерные, скользящие и др.), которые возбуждают колебательные уровни и существенно повышают концентрацию радикалов. Наиболее интересными, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, являются неравновесные плазмохимические системы, которые позволяют иницировать горение с высокой энергетической эффективностью.

Выполненные исследования воздействия разряда или плазмы были сосредоточены в основном на воспламенении предварительно перемешанных воздушно-топливных смесей [7; 9], поскольку это позволяло исключить влияние дополнительных факторов, связанных с составом смеси, неравномерностью параметров потока и т. п. Эти исследования подтвердили возможность управления процессами воспламенения в канале с помощью разряда даже при невысоких температурах воздуха на входе, когда самовоспламенение невозможно.

Однако в реальных условиях на входе в сверхзвуковую камеру сгорания приходится иметь дело с неравномерным потоком и раздельной подачей топлива и воздуха. Поэтому проблеме плазменного воздействия на поток для воспламенения предварительно несмешанных потоков воздуха и топлива в сверхзвуковом течении продолжает уделяться все большее внимание [10; 11]. В последнее время были получены экспериментальные и численные результаты по воспламенению и стабилизации горения предварительно несмешанных потоков воз-

духа и топлива. Как и при исследовании предварительно смешанных топлива и воздуха, использовались различные методы плазменного воздействия на течение, но при этом изучалась также возможность улучшения процессов смешения. В результате этих исследований продемонстрирована возможность интенсификации смешения топлива с воздушным потоком с помощью электрической дуги, импульсно-периодического разряда, и одновременно была достигнута стабилизация горения [12].

Экспериментальные исследования показали, что устойчивый режим иницированного горения в высокоскоростном потоке реализуется только при определенных параметрах электрического разряда и определенном составе горючей смеси [5; 13; 14]. При неудачном выборе условий реализуется возбуждение или диссоциация потока, но не происходит воспламенения и распространения пламени. В этом случае течение характеризуется неустойчивостью и неравномерностью, которые обусловлены локальными условиями воздействия разряда или неравномерностью смешения потоков топлива и воздуха [12].

Дополнительная генерация активных радикалов в зоне воспламенения и горения позволяет значительно уменьшить время иницирования горения [13]. Неравновесный электрический разряд может эффективно способствовать созданию активных частиц в воздушно-топливной смеси, в результате чего можно существенно (более чем в 1 000 раз) снизить время воспламенения пропана. Эти данные согласуются с теоретическими исследованиями влияния колебательного возбуждения водорода на снижение температуры воспламенения водородно-кислородной смеси [15].

Привлекательным является использование способов иницирования горения, основанных на инжектировании в поток плазменных сгустков, когда горение распространяется с границы плазмы в воспламеняемый поток. Интересные результаты получены с помощью объемных высокочастотных разрядов [16]. Исходя из априорных физических представлений и известных результатов наиболее эффективными методами иницирования горения, видимо, являются методы, в которых используются объемные плазменные образования. Кроме СВЧ-разрядов способностью образовывать такие плазмен-

ные объекты обладает, в частности, широкоапертурный электронный пучок. Эффективность такого подхода была подтверждена при исследовании процессов воспламенения в покоящемся газе и в потоках при низком статическом давлении [17; 18].

Следует отметить, что воздействие электронного пучка с энергией электронов до 10 кэВ на химические реакции, идущие в области газовой фазы, практически мало изучено. С одной стороны, такие электроны являются быстрыми относительно тепловых электронов, получаемых в газоразрядной плазме, а с другой – они являются медленными по сравнению с релятивистскими и околорелятивистскими электронами в пучках, широко используемых в различных технологических процессах.

На основе полученных экспериментальных данных [19], проведены расчетные исследования механизмов воспламенения предварительно смешанных водородно-воздушных потоков при сверхзвуковой скорости на входе в камеру сгорания для условий аэродинамического эксперимента. Цель исследования состояла в следующем:

1) разработка и верификация метода расчета воспламенения и стабилизации горения водородно-воздушной смеси в сверхзвуковой камере сгорания с помощью сильноточного широкоапертурного электронного пучка при высоких числах Маха на входе в условиях, когда самовоспламенение смеси невозможно;

2) проверка адекватности моделирования процессов управления в условиях неравномерного течения;

3) оценка эффективности инициирования воспламенения и стабилизации горения водорода при различных формах стабилизирующих устройств.

Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования процессов инициирования горения были выполнены в импульсной установке со временем действия 100 мс, поскольку в случае успешного инициирования горения характерное время должно быть существенно меньше. Для проведения экспериментальных исследований использовалась импульсная аэродинамическая труба ИТ-302М ИТПМ СО РАН с высокими параметрами

рабочего газа, которые близки к полетным условиям [20]. Уникальность этой установки заключается в исключительно широком диапазоне условий на входе модельной камеры сгорания (полное давление от 2 до 30 МПа, полная температура 1 000–3 000 К). Использование импульсной установки удешевляет исследования и значительно сокращает время, необходимое для проведения опытов. Такой способ испытаний позволяет эффективно использовать преимущества импульсной аэродинамической трубы как источника рабочего газа высокого теплосодержания. Модельная установка состоит из форкамеры, блока сопел, секции изолятора для выравнивания потока и измерительной секции канала для моделирования реагирующего потока в сверхзвуковой камере сгорания [21]. Блок сопел позволяет получать различные значения скорости потока на входе в канал, соответствующие числам Маха от 2 до 5. Канал оснащен системой подачи топлива и устройствами стабилизации пламени различной конфигурации, которые могут быть установлены на верхней и нижней стенах рабочей секции.

Схема рабочей секции модели представлена на рис. 1. Камера сгорания была выполнена в трех модификациях стабилизатора пламени: симметричная конфигурация с обращенным по потоку прямоугольным уступом (рис. 1, *а*); симметричная конфигурация с предварительным поджатием перед прямоугольным уступом (рис. 1, *б*); комбинированная конфигурация с прямым уступом на верхней стенке и уступом с поджатием на нижней стенке. В настоящей работе представлены результаты для двух первых конфигураций.

Для диагностики потока модель оборудована датчиками давления и тепловых потоков. Кварцевые окна с размерами 140×140 мм установлены на боковых стенах канала для визуализации течения и количественных оптических измерений.

Для инициирования воспламенения водородно-воздушной смеси использовалась электронная пушка, устройство и характеристики которой изложены в [17; 18]. Электронная энергия луча зависит от ускоряющего напряжения на катоде и не превышает 12 кэВ. Электронная плотность тока изменялась от 1,5 и 8,1 А/см², а площадь поперечного размера луча превышала 200 см².

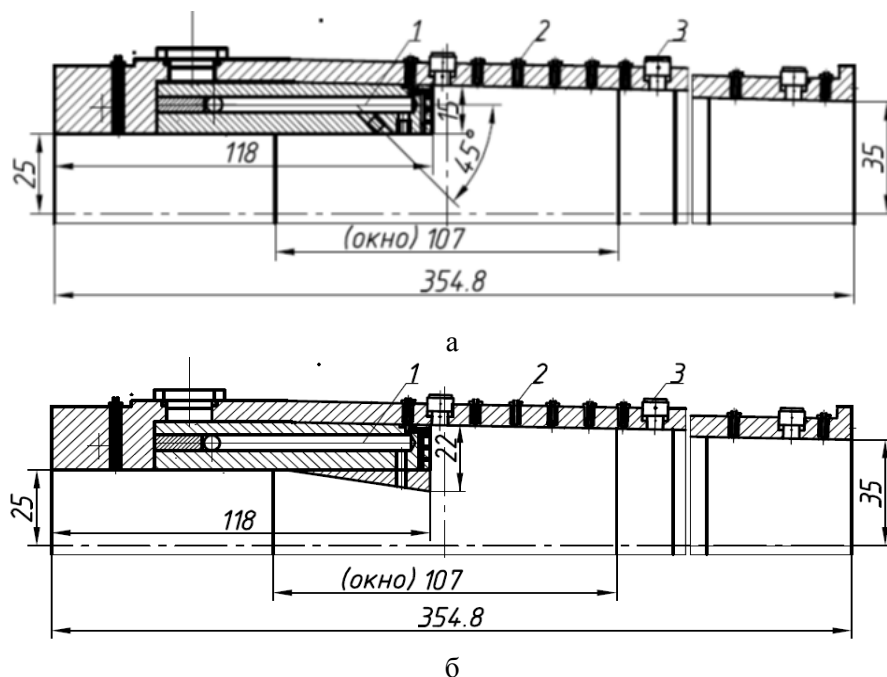


Рис. 1. Схема камеры сгорания без предварительного поджата (а) и с предварительным поджатием (б): 1 – канал подачи топлива; 2 – датчик давления; 3 – датчик теплового потока

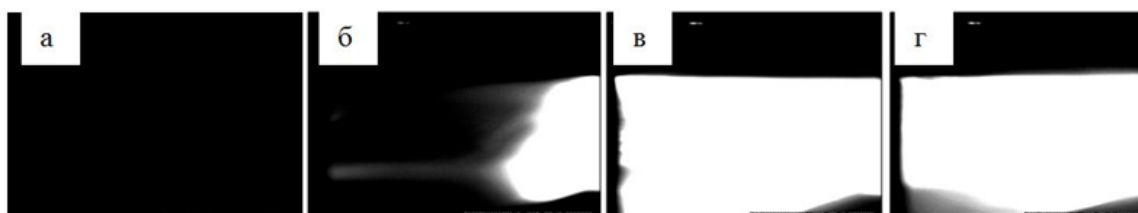


Рис. 2. Визуализация пламени в камере при сгорании водорода: $t = 0$ мс (а); $t = 1$ мс (б); $t = 4$ мс (в); $t = 24$ мс (г)

Экспериментальные исследования воспламенения смеси в потоке проведены при числах Маха 4 и 5. Воспламенение заранее неперемешанного топлива и воздуха было реализовано при статическом давлении $4 \div 5$ КПа и начальной полной температуре воздуха на входе в канал 1 200 К. При продолжительности действия электронного пучка приблизительно 150 мкс, горение наблюдалось в течение 60 мс. При этом происходило увеличение статического давления в камере сгорания приблизительно в два-три раза, и этот рост давления зависел от числа Маха. Такое изменение давления характерно для потоков с тепловыделением в канале со сверхзвуковой скоростью потока.

Визуализация потока в камере сгорания с помощью быстродействующей видеокамеры

позволила определять характер воспламенения смеси в канале. На рис. 2 показано развитие процесса воспламенения водородно-воздушной смеси в сегменте камеры сгорания с постоянным поперечным сечением в потоке с числом Маха 3,84 при полном давлении 4,2 МПа и полной температуре 1 252 К. Визуализация была выполнена в окне, показанном на рис. 1, а, в видимом диапазоне. На первой фотографии (см. рис. 2, а) показан поток перед включением электронной пушки (без горения). После включения электронной пушки воспламенение смеси происходит на расстоянии приблизительно 80 мм от поперечного сечения подаваемого водорода ($t = 1$ мс). Затем пламя распространяется вверх по течению и заполняет всю камеру сгорания ($t = 4$ мс).

В этом опыте горение продолжалось приблизительно 55 мс и сопровождалось постепенным уменьшением интенсивности люминесценции пламени вследствие падения полной температуры на входе в канал ввиду особенностей рабочего процесса импульсной установки.

Для оценки эффективности воспламенения с помощью электронной пушки как источника активных радикалов были проведены также опыты с предварительно подготовленной водородно-воздушной смесью, которая подавалась на вход камеры сгорания. Такой подход позволил исключить влияние неполного (незавершенного) смешения на воспламенение смеси и стабилизацию горения и обеспечить равномерное инициирование горения по всему объему камеры сгорания. С методической точки зрения облегчается построение математической модели, поскольку исключается необходимость определения локальных областей воспламенения в сложном трехмерном течении, что само по себе является трудной задачей, особенно при испытаниях в импульсном режиме. Поэтому для оценки эффективности использования электронной пушки и определения необходимой мощности на первом этапе расчетных исследований была использована двумерная модель с предварительно подготовленной смесью.

Численное моделирование

Численное моделирование течения в камере сгорания было выполнено на основе модели воспламенения с учетом применения электронного пучка. Расчет сгорания заранее перемешанного водородно-воздушного сверхзвукового потока был выполнен при условиях искусственного воспламенения смеси с помощью электронного пучка длительностью 400 мкс. Состав смеси предполагался стехиометрическим. Выбор стехиометрического состава смеси позволяет определить максимальную мощность источника воспламенения и получить предельную оценку его эффективности.

Математическое моделирование течений в камере сгорания проведено в ANSYS Fluent на основе решения полных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса вязкого теплопроводного газа, дополненных k - ω SST моделью турбулентности и блоком химических реакций. Использовался решатель

на основе уравнения для плотности и AUSM схема [22] третьего порядка аппроксимации. Для моделирования процесса горения водородно-воздушной смеси использовалась детальная кинетическая схема [23] с 38 реакциями для 8 компонентов. В работах [24; 25] выполнена верификация кинетической схемы [23] с использованием расчетных и экспериментальных данных [26].

Математическая модель воздействия электронного пучка основана на полуэмпирической концепции [17], которая позволила определить возможные кинетические механизмы инициации сгорания в присутствии электронов высокой энергии в газовой среде. Анализ динамики рассмотренного развития реакций показал, что процесс формирования положительных и отрицательных ионов заканчивается быстрым снижением электронной температуры. Одновременно проходят процессы рекомбинации [16]. Они завершаются существенным выделением энергии, которая ведет к интенсивному росту температуры газа и быстрому повышению колебательной температуры в начальный момент процесса. Это приводит к значительному росту соответствующих констант реакции, и эта стадия, вероятно, является спусковым механизмом инициирования главной реакции окисления.

Результаты и обсуждение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что воздействие на поток объемного электронного пучка способствует образованию активных радикалов и позволяет обеспечить инициирование воспламенения топлива как в условиях покоящейся смеси [16; 17], так и при высоких скоростях потока на входе камеру сгорания [18]. Вместе с этим выяснилось, что при больших скоростях потока необходимы дополнительные усилия для стабилизации горения ввиду короткого времени воздействия электронного пучка на горючую смесь. Для предсказания условий стабилизации горения были проведены расчетные исследования течения в канале при искусственном воспламенении смеси с помощью электронного пучка при постоянной длительности воздействия.

В расчетах зоны горения идентифицировались по отличной от нуля величине массовой концентрации воды и по увеличению

статического давления и температуры по сравнению со случаем без горения. Изменение массовой концентрации воды при горении в канале с прямым уступом без искусственного инициирования горения при более высокой температуре торможения ($T_0 = 1800 \text{ K}$) представлено на рис. 3, а. Интенсификация красного цвета вниз по потоку соответствует увеличению концентрации воды. Эти данные демонстрируют, что реакция горения, как и в эксперименте, происходила только вдоль нижней стенки и заканчивалась на расстоянии примерно 200 мм от уступа. Максимальная концентрация достигалась на нижней стенке в результате стабилизации пламени за обратным уступом. Можно видеть, что горение не распространяется по всему объему камеры сгорания.

Применение стабилизатора пламени с дополнительным углом сжатия (см. рис. 3, б) сопровождается существенным увеличением области горения, тогда как применение стабилизатора без угла сжатия не приводило к распространению горения до верхней стенки. Было установлено, что горение усиливается вниз по потоку и максимальная концентрация воды достигается у нижней стенки за уступом.

Этот эффект вызван воздействием наклонной ударной волны от угла сжатия перед уступом, который создает дополнительные условия стабилизации пламени в виде зоны отрыва на верхней стенке. При взаимодействии ударной волны с пограничным слоем на верхней стенке возникает отрыв (см. рис. 3), в котором происходит воспламенение и горение. Такое заключение подтверждается появлением зоны сгорания на правой границе вычислительной области, которая является следствием воздействия ударной волны, возникающей при присоединении пограничного слоя на нижней стенке за уступом. Такая ударная волна всегда существует, но ее интенсивность значительно выше при наличии предварительного сжатия.

Проведенные расчеты течения в камере сгорания со стабилизаторами горения на верхней и нижней стенках показали, что с помощью электронного пучка при такой схеме стабилизации можно обеспечить воспламенение смеси по всей камере сгорания (рис. 4). Приведенные данные показывают быстрое увеличение температуры вниз по

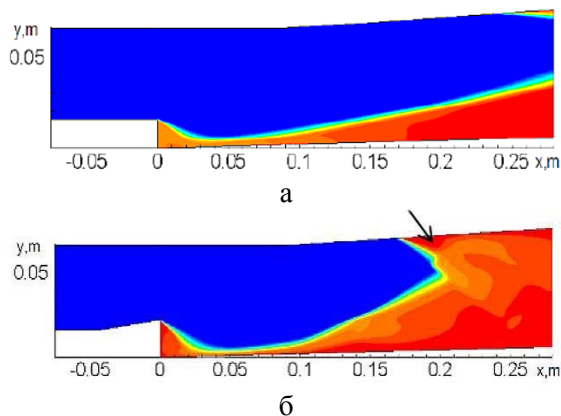


Рис. 3. Концентрация воды за уступом при горении водорода для прямого уступа (а) и уступа с предварительным поджатием (б). Стрелка указывает на зону отрыва

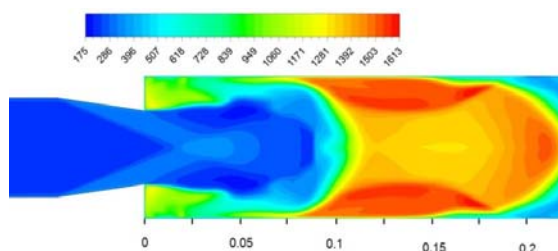


Рис. 4. Статическая температура при горении водородно-воздушной смеси, $M = 3,84$



Рис. 5. Визуализация горения в камере сгорания

потоку и особенности выгорания топлива по объему камеры сгорания.

Можно видеть, что интенсивное повышение температуры (горение) начинается на расстоянии примерно 50–70 мм от уступа. Наибольшее повышение температуры происходило у стенок за уступами, и затем температура повышалась в ядре потока при $X > 150 \text{ мм}$, что является следствием стабилизирующего влияния обратного уступа с предварительным сжатием. Кроме того, сохраняется высокий уровень температуры (около 1250 K) в области отрыва пограничного слоя за уступами, что способствует инициированию горения.

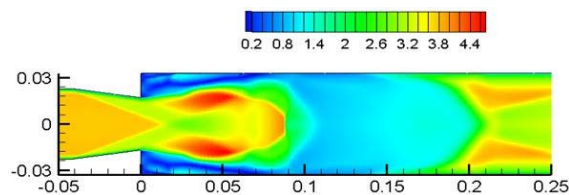
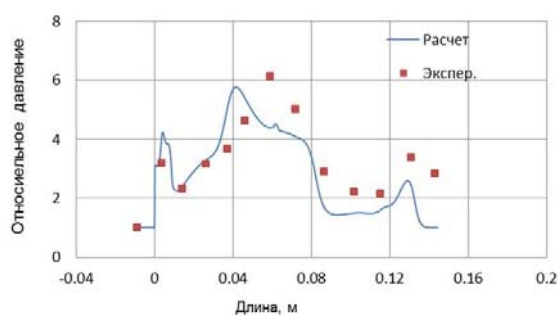
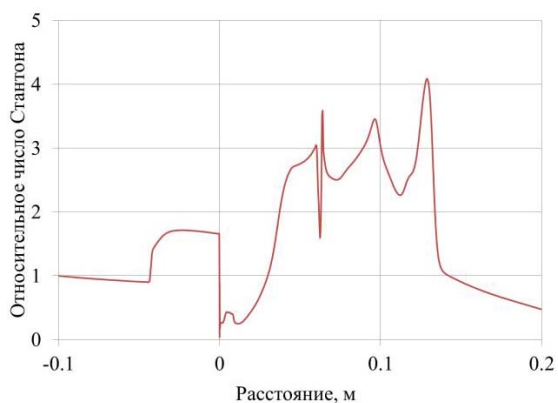


Рис. 6. Изменение числа Маха при горении водородно-воздушной смеси, $M = 3,84$



а



б

Рис. 7. Распределение относительного давления (а) и тепловых потоков (б) по длине канала

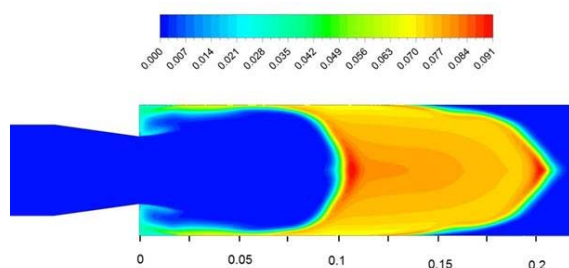


Рис. 8. Распределение концентрации воды в канале при горении водорода, $M = 3,84$

Приведенные данные качественно согласуются с результатами, полученными в эксперименте. Отличие состоит в том, что в эксперименте воспламенение топлива началось сразу за уступом или даже перед ним, тогда как в расчете горение начинается на некотором расстоянии от уступа. Это вызвано особенностями воздействия электронного пучка на поток, которое в эксперименте не имеет фиксированных границ и может распространяться даже вверх по потоку от торца уступа (рис. 5), вызывая воспламенение перед ним вплоть до запирания канала. Условия, принятые в расчете, предполагают начало воздействия электронного пучка в плоскости торца уступа, что приводит к задержке воспламенения, определяемого временем индукции.

Изменение тепловыделения по длине канала постоянного сечения за уступом и соответствующее повышение температуры приводит к изменению распределения числа Маха, которое уменьшается вниз по потоку по мере выгорания топлива (рис. 6). В результате скорость потока приближается к звуковой и даже дозвуковой скорости, что характерно для течений с подводом тепла при сверхзвуковых скоростях течения на входе в канал. Полученные данные показывают, что течение характеризуется неравномерностью поля скоростей, которая вызвана не только особенностями тепловыделения под воздействием электронного пучка, но и взаимодействием ударных волн с пограничным слоем и существованием развитых областей отрыва пограничного слоя на стенках канала.

Интенсивное выделение тепла сопровождается увеличением статического давления. Количественные данные о повышении давления в камере сгорания при горении водородно-воздушной смеси при числе Маха на входе 3,84 показаны на рис. 7, а. Здесь для сравнения приведены результаты измерения давления на верхней стенке канала при тех же условиях. Относительное давление представляет собой отношение давления, полученного при сгорании топлива, к давлению, которое получено без горения топлива.

Сравнение результатов расчета и эксперимента свидетельствует об их удовлетворительном соответствии. Правильно предсказывается максимум давления (с погрешностью около 6%) и его положение

по длине канала (с погрешностью около 31 %). Такое различие положения максимума давления вызвано, по-видимому, более высоким уровнем турбулентности потока в эксперименте по сравнению с расчетными значениями.

Распределение тепловых потоков в стенку по длине камеры сгорания (рис. 7, б) также отличается высоким уровнем неравномерности и определяется особенностями выгорания топлива, которое зависит от положения областей отрыва пограничного слоя. Сравнение рис. 7, а и 7, б показывает качественное различие в положении максимумов в распределении давления и тепловых потоков при искусственном инициировании горения, тогда как при самовоспламенении водорода наблюдалось их качественное соответствие [27]. По-видимому, такое различие связано с более интенсивным воспламенением топлива под воздействием электронного пучка, особенно в областях отрыва пограничного слоя.

Поскольку эффективность горения водорода и положение зон горения определяется образованием воды, рассчитывалась концентрация воды по длине канала. Данные, приведенные на рис. 8, показывают, что горение начиналось вдоль стенок в пограничном слое и затем распространялось в ядро потока. Максимальная концентрация воды достигалась в ядре потока на расстоянии 100–150 мм от торца уступа. Неравномерность горения может быть связана с неравномерностью тепловыделения при искусственном воспламенении, отмеченном выше. Следует отметить низкий уровень концентрации воды в отрывных зонах за уступами вследствие обеднения смеси.

Оценка полноты сгорания по величине концентрации воды показала, что при воздействии электронного пучка может быть достигнут коэффициент полноты сгорания в диапазоне 0,6–0,7, что является достаточно высоким уровнем для числа Маха 3,84 на входе в камеру сгорания при относительно низкой температуре торможения на входе в канал.

Заключение

Представлены результаты расчетов течения реагирующей водородно-воздушной смеси в сверхзвуковой камере сгорания, вы-

полненные на основе предложенной модели воспламенения в условиях искусственного воспламенения с помощью электронной пушки. Расчеты показали, что математическая модель позволяет предсказать воспламенение смеси при низких температурах торможения на входе в камеру сгорания.

Математическое моделирование течения реагирующей водородно-воздушной смеси позволило определить влияние конфигурации стабилизатора и структуры течения на устойчивость горения. На основании расчетов установлено, что горение не распространяется по всей камере сгорания, если не обеспечена эффективная стабилизация пламени с помощью дополнительных стабилизаторов и дополнительного поджигания потока на входе в камеру сгорания. Показано, что предварительное сжатие потока может быть эффективным средством стабилизации горения по всему объему камеры сгорания. Эти результаты были подтверждены экспериментально.

Список литературы

1. Scramjet Propulsion, Progress in Astronautics and Aeronautics / Eds. E. T. Curran, S. N. B. Murthy. AIAA, Reston, VA, 2000. Vol. 189.
2. McClinton C. R. X-43 – Scramjet Power Breaks the Hypersonic Barrier: Dryden Lectureship in Research for 2006 // AIAA Paper 2006-1317. Jan. 2006.
3. Starikovskaia S. M. Plasma assisted ignition and combustion // J. Phys. D, Appl. Phys. 2006. Vol. 39. No. 16. P. R265–R299.
4. Leonov S. B., Yarantsev D. A., Napartovich A. P., Kochetov I. V. Plasma-Assisted Combustion of Gaseous Fuel in Supersonic Duct // Plasma Science, IEEE Transactions on Plasma Science. 2006. Vol. 34. No. 6. P. 2514–2525.
5. Jacobsen L. S., Carter C. D., Baurle R. A., Jackson T., Williams S., Barnett J., Tam C.-J., Bivolaru D. Plasma-Assisted Ignition in Scramjets // Journal of Propulsion and Power. 2008. Vol. 24, No. 4. P. 641–654.
6. Savelkin K. V., Yarantsev D. A., Adamovich I. V., Leonov S. B. Ignition and flameholding in a supersonic combustor by an electrical discharge combined with a fuel injector // Combustion and Flame. 2015. Vol. 162. P. 825–835.

7. Pilla G., Galley D., Lacoste D. A., Lacas F., Veynante D., Laux C. O. Stabilization of a turbulent premixed flame using a nanosecond repetitively pulsed plasma // IEEE Transactions on Plasma Science. 2006. Vol. 34. No. 6. P. 2471–2477.
8. Vinogradov V. A., Chernikov V. A., Timofeev I. B., Kolesnikov E. Preliminary Study of Different Plasma Discharges at $M = 2$ Air Flow // AIAA Paper # 2005-988. 2005. 10 p.
9. Kim W., Mungal M. G., Cappelli M. A. The role of in situ reforming in plasma enhanced ultra lean premixed methane / air flames // Combustion and Flame. 2010. Vol. 157. P. 374–383.
10. Fei W., Liu J. B., Sinibaldi J., Brophy C., Kuthi A., Jiang C., Ronney P., Gunderesen M. A. Transient Plasma Ignition of Quiescent and Flowing Air/Fuel Mixtures // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. Vol. 33. No. 2. P. 844–849.
11. Leonov S., Yarantsev D. Near-Surface Electrical Discharge in Supersonic Airflow: Properties and Flow Control // Journal of Propulsion and Power. 2008. Vol. 24. No. 6. P. 1168–1181.
12. Vinogradov V. A., Alexandrov A. F., Timofeev I. B., Esakov I. I. The Effects of Plasma Formations on Ignition and Combustion // AIAA Paper 2004-1356. 2004. 8 p.
13. Klimov A., Bityurin V., Chinnov V. Non-Premixed Plasma-Assisted Combustion of Hydrocarbon Fuel in High-Speed Airflow, Paper 2006-0670 // Proc. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV, 2006. 10 p.
14. Marcum S. D., Ganguly B. N. Electric-field-induced flame speed modification // Combustion and Flame. 2005. Vol. 143 (1). P. 23–36.
15. Старик А. М., Даутов Н. Г. О возможности ускорения горения смеси $H_2 + O_2$ при возбуждении колебательных степеней свободы молекул // Докл. АН. 1994. Т. 336, № 5. С. 617–622.
16. Shibkov V. M. et al. Combined MW-DC Discharge in a High Speed Propane-Butane-Air Stream // AIAA Paper 2006-1216, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, 2006. 6 p.
17. Кацнельсон С. С., Поздняков Г. А. Иницирование процессов горения водородно-кислородной смеси под воздействием сильнооточного электронного пучка низкой энергии // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 2. С. 10–16.
18. Pozdnyakov G. A. Effect of generation of charged particles fluxes by pulsed gas discharge. URL: //arXiv:1409.3303 (2014). 3 с.
19. Goldfeld M. A., Pozdnyakov G. A. Ignition of Hydrocarbon-Air Supersonic Flow by Volumetric Ionization // Journal of Thermal Science. 2015. Vol. 24. No. 6. P. 583–590.
20. Пузырев Л. Н., Ярославцев М. И. Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы // Изв. АН. 1990. № 5. С. 86–93.
21. Goldfeld M. A. et al. Methodical Aspects of the Study of Supersonic Combustor in the Impulse Regime // Proc. 8th Int. Conf. on the Meth. of Aeroph. Res. Novosibirsk, 1996. Vol. 1. P. 123–129.
22. Liou M. S., Steffen C. J., jr. A new flux splitting scheme // Journal of Computational Physics. 1993. Vol 107. No. 1. P. 23–39.
23. Tien J. H., Stalker R. J. Release of Chemical Energy by Combustion in a Supersonic Mixing Layer of Hydrogen and Air // Combustion and Flame. 2002. No. 130. P. 329–348.
24. Бедарев И. А., Федоров А. В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 1. С. 26–33.
25. Fedorova N. N., Goldfeld M. A., Bedarev I. A. Step configuration influence on combustion in premixed hydrogen-air supersonic flow // 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012) (Austria, Vienna, 10–14 Sept., 2012): Proc. 2012. No. 4240. S. 1. P. 1–15. CD-ROM.
26. Evans J. S., Schexnayder C. J., jr. Influence of Chemical Kinetics and Unmixedness on Burning in Supersonic Hydrogen Flames // AIAA Jour. 2012. Vol. 18. No. 2. P. 188–193.
27. Виноградов В. А., Гольдфельд М. А., Старов А. В. Исследование воспламенения и горения водорода в канале при высоких сверхзвуковых скоростях потока на входе в канал // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 4. С. 3–11.

O. S. Vankova^{1,2}, **M. A. Goldfeld**¹, **N. N. Fedorova**^{1,2}

¹ *S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

² *Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

vankova@itam.nsc.ru, gold@itam.nsc.ru, nfed@itam.nsc.ru

CONTROL OF PROCESSES OF IGNITION AND COMBUSTION STABILIZATION IN THE SUPERSONIC COMBUSTION CHAMBER

In the paper, results of mathematical modeling of a flow in the supersonic combustion chamber are presented, which have been performed under the conditions of burning initiation by means of an electronic bunch of high energy on the basis of the offered ignition model. Calculations are carried out on the basis of the Reynolds averaged Navier – Stokes equations supplemented by the $k-\omega$ SST turbulence model and detailed chemistry kinetics. As a result of numerical modeling, it has been shown that in a frame of the offered model it is possible to predict the ignition of mixture at low stagnation temperatures. The numerical results confirm the experimental data. It is shown that the choice of the optimum scheme of stabilization and the stabilizer geometry allows one to get the flame propagation over all the channel and to provide the stability of combustion even at high flow Mach numbers. The offered mathematical model has allowed defining the conditions of ignition.

Keywords: combustion chamber, mathematical simulation, ignition, a supersonic flow, combustion stabilization.