

УДК: 533.6.011.5;536.46

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЗАДНЕЙ СТЕНКИ КАВЕРНЫ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

М. А. Гольдфельд, А. В. Старов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
starov@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования сверхзвуковой камеры сгорания со сплошной и дискретной (прерывистой) задней стенкой каверны. Испытания проводились в импульсной трубе по схеме присоединенного воздухопровода при числе Маха на входе, равном 3, в диапазонах полной температуры $2550 \div 3140$ К и статического давления $178 \div 195$ кПа. В качестве топлива использовался подогретый керосин. Получены данные по условиям воспламенения и эффективности горения керосина в зависимости от конфигурации каверны. Проведена оценка сопротивления внутренних элементов камеры сгорания, формирующих нишевые стабилизаторы. Показано общее преимущество камеры сгорания с дискретной задней стенкой каверны по сравнению со сплошной задней стенкой.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, керосин, каверна, стабилизация горения.

DOI 10.15372/FGV20170104

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени известно много работ по исследованию различных типов каверн как инструмента стабилизации пламени в до- и сверхзвуковых камерах сгорания [1–3], в том числе каверны с инжекцией топлива. Обеспечение горения керосина в сверхзвуковой камере сгорания требует дополнительных элементов для воспламенения и стабилизации ввиду большего времени подготовки (распыление, смешение) и меньших скоростей реакций в сравнении с водородом [4]. В работах [5–8] было продемонстрировано использование каверн в качестве стабилизаторов пламени для жидких углеводородных топлив. Топливо может быть введено в каверну путем прямой инжекции либо при захвате из набегающего потока (если инжекция топлива происходит выше по потоку). Если каверна достаточно глубокая, требуется большее время пребывания топлива в камере для смешения и химической реакции [8–10]. Кроме того, так как каверна характеризуется относительно высоким уровнем восстановления температуры, температура в слое смешения слабо отличается от полной температуры набегающего потока. Таким образом, если обеспечить подходящие для хорошего смешения условия, будут обеспечены воспламенение и устойчивое горение [6, 11].

Организация стабилизации горения с помощью каверны должна выполняться совместно с выбором схемы инжекции топлива [5]. Расположение каверны за клиновидным инжектором существенно повышает эффективность горения углеводородного топлива в сверхзвуковом потоке [12] за счет стабилизации горения даже при высоких числах Маха. Введение таких устройств в поток усиливает взаимодействие течения в каверне с воздушно-топливной смесью в ядре потока [13]. Пилон, расположенный перед каверной, обеспечивает реализацию этого процесса за счет увеличения массообмена между каверной и основным потоком [14] и повышения качества смешения вследствие взаимодействия ударных волн и вихрей, возникающих при обтекании пилонa [13]. Низкое давление за пилоном приводит к перетеканию газа с высоким давлением из каверны в область за пилоном, что увеличивает массо- и теплообмен по сравнению с каверной без пилонa [15].

Положительное стабилизирующее влияние каверны может сопровождаться отрицательным эффектом — дополнительным гидравлическим сопротивлением камеры сгорания. Сопротивление каверны в основном обусловлено различием давлений на передней и задней стенках каверны. Давление на задней стенке зависит в общем случае от типа каверны — открытая или закрытая [2]. В случае открытой каверны (отношение длины к

глубине меньше 10) сдвиговой турбулентный слой, оторвавшийся на передней кромке, присоединяется за каверной и сопротивление каверны относительно небольшое. В случае закрытой каверны (отношение длины к глубине больше 10) сдвиговой слой присоединяется на нижней стенке каверны. На задней стенке возникает скачок уплотнения, что ведет к росту давления на ней и, соответственно, к росту сопротивления каверны [16]. В работе [9] показано, что при уменьшении угла наклона задней стенки сопротивление каверны увеличивается.

Таким образом, конфигурация каверны, включая схему инъекции, оказывает влияние на массообмен в потоке и на время пребывания топлива в камере сгорания, что определяющим образом отражается на стабилизации и эффективности горения. Высокие стабилизирующие характеристики каверны могут быть реализованы при обеспечении низкого уровня ее сопротивления.

Настоящая работа является продолжением исследования воспламенения и горения различных топлив при сверхзвуковых скоростях потока [17, 18]. Основная цель состояла в определении влияния конфигурации задней стенки каверны на эффективность самовоспламенения и стабилизации горения керосина в модельной камере сгорания (КС). Кроме того, была выполнена оценка сопротивления ее внутренних элементов по уровню давления, которое реализуется на соответствующих поверхностях начального участка КС (донное давление на срезе топливных инжекторов, фронтальное и донное давление на задней стенке каверны).

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование модельной КС проводилось в режиме присоединенного воздухопровода. В качестве источника горячего газа была использована первая форкамера аэродинамической трубы ИТ-302М СО РАН [19]. Такой подход позволил получить высокоэнталийный поток с высоким давлением и температурой на входе в камеру сгорания. Выбор начальных значений давления воздуха в первой форкамере и напряжения зарядки конденсаторных батарей позволил получить требуемую температуру торможения потока на входе. Применение второй форкамеры с дросселирующим отверстием позволило получить необходимый уровень давления на входе в модели КС при максимальном запасе высокоэнталийного воздуха в первой

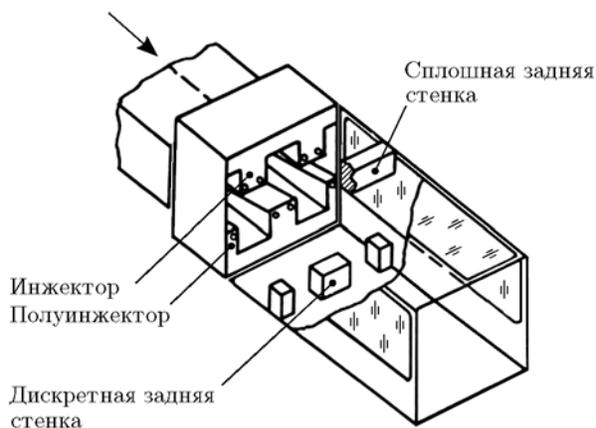


Рис. 1. Схема начального участка модельной камеры сгорания

форкамере и, следовательно, при максимальной длительности эксперимента. Подробно особенности конфигурации канала камеры сгорания и технологии испытаний описаны в [18]. Схема начального участка модели КС представлена на рис. 1.

Размеры канала в сечении донного среза инжекторов составляли 100×100 мм и включали в себя уступ высотой 25 мм на верхней и нижней стенках секции. В инжекторной секции были размещены четыре клиновидных инжектора с соотношением сторон (высота/ширина) $h/b = 1.0$ (см. рис. 1). В каждом инжекторе устанавливались две струйные форсунки на торцевой поверхности вблизи верхней кромки для подачи топлива в ядро потока под углом 10° . Для обеспечения равномерного перекрытия поперечного сечения камеры сгорания струями подогретого керосина один из инжекторов был разделен на две части и полученные «полуинжекторы» размещены в нижних углах инжекторной секции (рис. 2). Канал КС за донным срезом инжекторов имел постоянную площадь поперечного сечения длиной 303 мм и расширяющуюся в вертикальной плоскости секцию длиной 380 мм со степенью расширения 1.8.

На расстоянии 30 мм от инжекторов вниз по потоку на верхней и нижней стенках КС размещались плоскости высотой 17 мм и толщиной 5 мм, так что образовывались два нижних стабилизатора (каверны) на верхней и нижней стенках КС (см. рис. 1). Задняя стенка каверны была выполнена в двух вариантах: сплошной по ширине канала КС и дискретной.

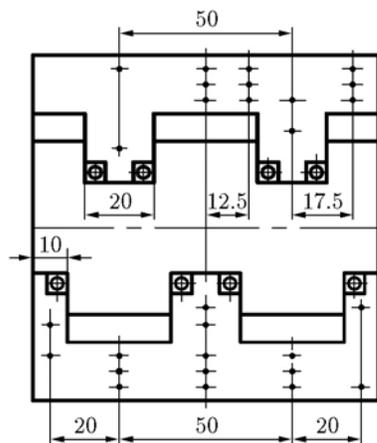


Рис. 2. Схема расположения приемников статического давления на донном срезе инжектора

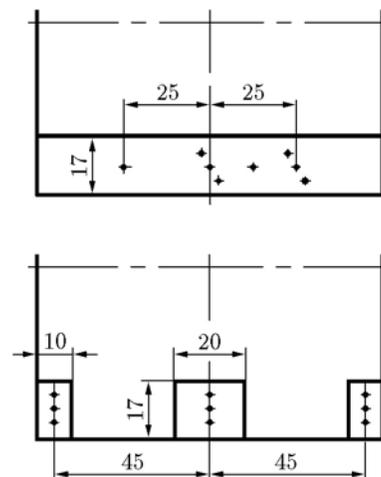


Рис. 3. Схема расположения приемников статического давления на сплошной и дискретной задней стенке каверны

кретной. Стенки устанавливались только напротив соответствующего инжектора. Напротив «полного» инжектора ширина стенки составляла 20 мм, напротив «полуинжектора» — 10 мм.

В испытаниях измерялись параметры течения в первой и второй форкамерах установки, распределения статического давления и тепловых потоков вдоль вертикальной плоскости симметрии, параметры (давление и температура) в системе топливоподачи [18]. Всесторонне было измерено давление на донном срезе инжекторов: давление на торце каждого инжектора, распределение давления на обратном уступе под и между инжекторами (см. рис. 2). Схема измерения давления на фронтальной и донной плоскостях задних стенок каверн представлена на рис. 3, где показаны соответствующие нижние стенки. Верхние стенки были дренированы аналогично с той разницей, что в случае дискретной каверны вверху находились два элемента шириной по 20 мм. Эти элементы были дренированы аналогично элементу шириной 20 мм внизу. Общее количество измерительных точек на донном срезе инжекторов составляло 28 приемников статического давления, на сплошных задних стенках — 32 приемника, на дискретных — 30 приемников. Во всех опытах выполнялась визуализация потока на начальном участке КС.

Испытания проведены при следующих параметрах воздушного потока на входе в КС: число Маха 3, температура торможения $2550 \div 3140$ К, статическое давление $p_{en} = 178 \div 195$ кПа. В качестве топлива

использовался керосин, который нагревался в специальном баке топливной системы до температуры 500 К при давлении ≈ 5 МПа. Коэффициент избытка топлива изменялся в пределах $\phi \approx 0.8 \div 1.0$. Для подачи топлива в камеру сгорания применялась вытеснительная система. В качестве поддавливающего газа использовался азот.

По результатам измерения параметров потока по длине КС определялась полнота сгорания в одномерном приближении из уравнения энергии потока, записанного через полные энтальпии (физическая и химическая энергия) рабочих тел [18]. В уравнении импульсов учитывались силы давления, действующие на стенки канала (по измерениям статического давления в эксперименте); импульс струи керосина; силы, приложенные к донным областям инжекторной секции и каверны. Сила трения на стенках канала определялась по соотношениям аналогии Рейнольдса на основе измерений теплового потока в исследуемом канале в предположении одномерности течения. В уравнении энергии учитывался теплоотвод в стенки канала, рассчитанный по измерениям теплового потока, и теплоподвод за счет горения с определяемой полнотой сгорания. И наконец, уравнение состояния рассматривалось для термодинамически равновесного газа, включающего в себя воздух и продукты сгорания. Состав и свойства рабочего тела определялись термодинамическим расчетом с учетом диссоциации и зависимости энергии внутренних сте-

Относительные погрешности основных измеряемых величин

p	p^*	q_w	T^*	T	M	G_{air}	G_{ker}	ϕ	η
0.005	0.01	0.08	0.05	0.065	0.01	0.0475	0.0075	0.055	0.062

Примечания. p — давление, p^* — давление торможения, q_w — тепловой поток на стенке канала, T — температура, T^* — температура торможения, M — число Маха, G_{air} — массовый расход воздуха, G_{ker} — массовый расход керосина, ϕ — коэффициент избытка топлива, η — полнота сгорания

пеней свободы от температуры [20].

Предварительные испытания установки и выполненные калибровки позволили определить поле чисел Маха на входе в камеру сгорания и погрешности измерения всех параметров. Для определения погрешностей использовался стандартный подход. Относительные погрешности определения параметров представлены в таблице.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Распределение статического давления вдоль канала модельной КС ($X = 0$ — донный срез клиновидных инжекторов, т. е. передняя стенка каверны) с использованием сплошной задней стенки каверны (рис. 4) показывает, что горение керосина происходит с задержкой $10 \div 15$ мс. Рост давления, соответствующий воспламенению, начинается в конце участка постоянного сечения и затем распространяется вверх и вниз по потоку (процесс «розжига» КС). Уже к 20-й миллисекунде давление на

этом участке превышает в $2 \div 3$ раза давление без горения. На 52-й миллисекунде наблюдается максимум роста статического давления в результате горения, что соответствует достижению полноты сгорания $\eta \approx 0.8$. Из рис. 4 видно, что без горения давление ниже по потоку за каверной меньше давления в каверне. Но при горении давление в каверне повышается примерно в два раза, в то время как давление за каверной возрастает более чем в три раза. Можно предположить, что стабилизация горения происходит на донной поверхности задней стенки каверны. Низкое давление в каверне при горении объясняется экранирующим действием воздушных и топливных струй, что приводит к снижению количества топлива в этой области. Такой вывод подтверждают данные теневой визуализации и анализа течения на начальном участке КС. Представленная на рис. 5 схема течения соответствует началу процесса горения (слабое горение), т. е. отсутствию горения в каверне.

Вместе с тем вниз по потоку (см. рис. 4, $X \approx 85$ мм) наблюдается снижение давления при максимальной интенсивности горения, что может свидетельствовать о локализации воз-

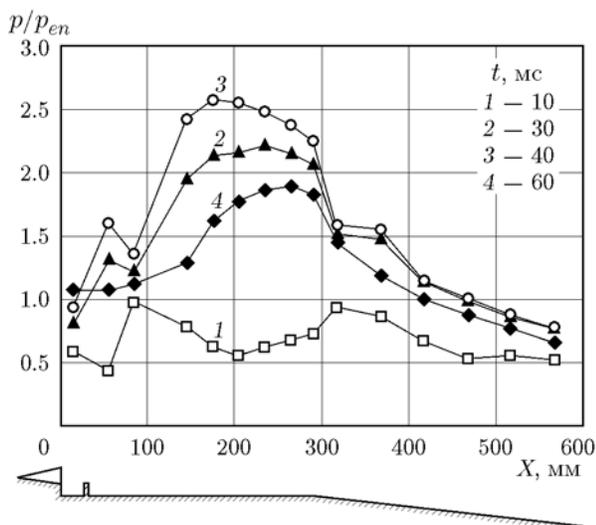


Рис. 4. Распределение относительного статического давления вдоль нижней стенки модели КС со сплошной задней стенкой каверны

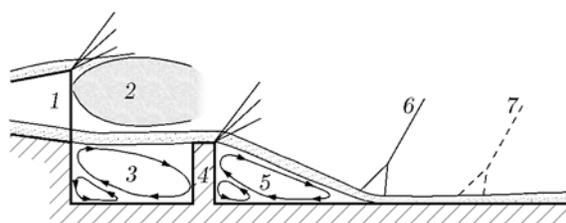


Рис. 5. Схема течения на начальном участке КС по данным теневой визуализации:

1 — клиновидный топливный инжектор, 2 — струя керосина, 3 — вихревая структура в каверне, 4 — задняя стенка каверны, 5 — рециркуляционная зона, 6 — положение замыкающей ударной волны при дискретной задней стенке каверны, 7 — положение замыкающей ударной волны при сплошной задней стенке

действия уступа как стабилизатора горения керосина. Основной рост давления наблюдается во второй половине участка КС постоянной площади. Такой характер «розжига» КС можно объяснить определяющим влиянием на развитие горения системы скачков уплотнения, возникающей при обтекании клиновидных топливных инжекторов. Их взаимодействие с пограничным слоем на стенках КС приводит к появлению зон отрыва пограничного слоя, в которых повышаются параметры потока (температура и давление) при одновременном снижении скорости течения. Как результат, воспламенение топлива происходит на участке постоянного сечения КС в области повторного падения скачков уплотнения на стенку канала с последующим распространением волны «розжига» вверх и вниз по потоку. Такая схема воспламенения для водорода предложена и обоснована в работах [17, 21]. Веер волн разрежения и дальнейшее расширение канала за секцией постоянного сечения подавляют горение, и степень повышения статического давления снижается.

Из сравнения распределений давления вдоль камеры сгорания со сплошной (см. рис. 4) и дискретной задней стенкой каверны (рис. 6) следует, что изменение конфигурации задней стенки вызывает повышение давления по длине канала и особенно на начальном участке секции постоянного сечения. Видно, что давление

в каверне и за ней существенно и монотонно растет при горении без локальных снижений, характерных для сплошной каверны. Расчетные и экспериментальные оценки по данным визуализации показывают, что положение замыкающей ударной волны изменяется при присоединении пограничного слоя за рециркуляционной зоной позади задней стенки. При дискретной задней стенке эта ударная волна смещается вверх по потоку по сравнению со сплошной задней стенкой каверны, что приводит к сдвигу вверх по потоку области воспламенения, вызванного ударными волнами. Соответственно в этом случае сдвигается вверх по потоку максимум давления, что видно из сравнения рис. 4 и 6. Совместное воздействие этих факторов приводит к тому, что в КС с дискретной стенкой достигается большее статическое давление, соответствующее полноте сгорания $\eta \approx 0.9$, и увеличивается время тепловыделения в КС начиная с момента воспламенения до срыва горения. Увеличение этого времени в условиях режима работы установки с падающими параметрами показывает, что данная схема стабилизации обеспечивает воспламенение и устойчивое горение в более широком диапазоне параметров воздушного потока на входе КС. Увеличение длительности тепловыделения в КС с дискретной задней стенкой каверны можно объяснить тем, что такая конфигурация создает интенсивный массо- и теплообмен между каверной и основным потоком в канале КС. Существенное увеличение давления и температуры в канале способствует улучшению смешения и сохранению условий для воспламенения при снижении параметров набегающего потока при избытке топлива, близком к стехиометрическому значению.

Здесь следует отметить, что на рисунках представлены результаты для нижней стенки КС. С учетом несимметричного расположения инжекторов распределения статического давления сверху и снизу несколько отличаются, но общий характер и средний уровень давления на верхней стенке остаются примерно такими же, как на нижней стенке. Различия не превышают $8 \div 10 \%$, что свидетельствует о квазидвумерности течения за каверной. В дозвуковых областях отрывов и рециркуляционных зон давление быстро выравнивается по ширине канала до уровня не более $10 \div 15 \%$. Квазидвумерность течения подтверждается измерениями давления по ширине канала КС в каверне

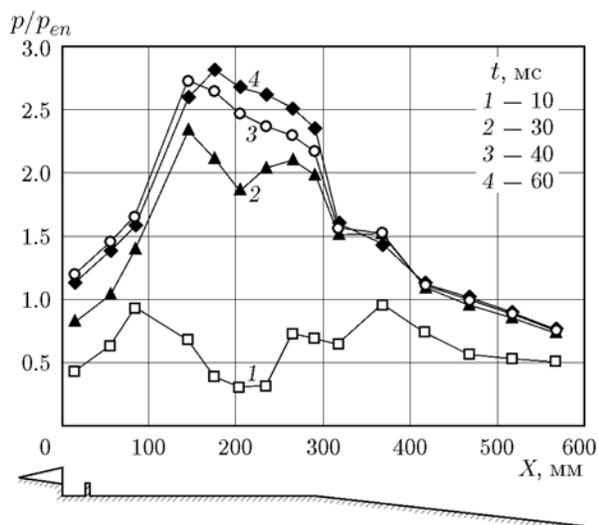


Рис. 6. Распределение относительного статического давления вдоль нижней стенки модели КС с дискретной задней стенкой каверны

и при $X = 175$ мм. Такой характер распределения давления позволяет с известными допущениями использовать одномерный подход для расчета полноты сгорания.

О высоком уровне тепловыделения и преимуществе КС с дискретной задней стенкой каверны свидетельствуют результаты измерения статического давления, представленные в виде отношения давления в «горячем» пуске p_{comb} (с горением) к давлению в «холодном» пуске p_{cold} (без топлива). На рис. 7 приведены максимальные уровни повышения давления при горении, соответствующие времени 52 мс для сплошной и 58 мс для дискретной стенки каверны. В среднем степень увеличения давления при горении керосина в КС с дискретной стенкой каверны на $10 \div 15\%$ больше уровня повышения давления в варианте со сплошной задней стенкой каверны. Можно утверждать, что дискретная каверна выполняет функцию стабилизатора в области $X = 0 \div 30$ мм, тогда как сплошная каверна недостаточно эффективна и стабилизация горения в этом случае происходит за сплошной задней стенкой каверны, при $X > 35$ мм. Следует отметить, что зона максимального давления в КС не соответствует зоне с максимальным повышением давления в результате горения керосина, которая находится в конце секции постоянного сечения. Приведенные данные подтверждают нали-

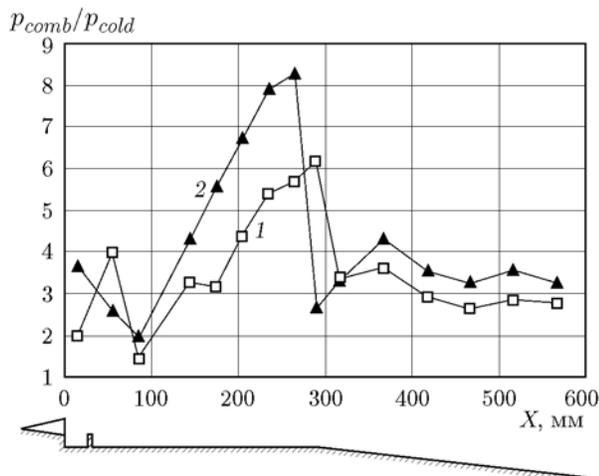


Рис. 7. Степень повышения статического давления при горении керосина вдоль канала модели КС:

1 — со сплошной задней стенкой каверны, максимум давления соответствует $t = 52$ мс, 2 — с дискретной задней стенкой, $t = 58$ мс

чие области начального воспламенения в конце участка постоянного сечения и смещение этой зоны вверх по потоку для варианта КС с дискретной задней стенкой каверны.

Изменение схемы стабилизации горения вследствие изменения конфигурации задней стенки каверны подтверждается измерениями давления на донном срезе инжекторов (рис. 8). Видно, что при дискретной стенке каверны среднее давление на донном срезе инжекторной секции в результате горения керосина повышается почти в 3.5 раза, в то время как в случае каверны со сплошной стенкой — только в $1.5 \div 2$ раза. Причем преимущество дискретной каверны наблюдается уже в процессе «розжига», до начала интенсивного горения, а при использовании сплошной каверны задержка интенсивного горения достигает $35 \div 40$ мс при меньшей общей длительности горения. Это свидетельствует о том, что сплошная каверна «закрыта» от процессов в остальной части КС. Из рис. 8 видно также, что распределения на верхней и нижней стенках КС отличаются принципиально, что и было отмечено при рассмотрении распределений давления по длине канала модели.

Противоположный характер носят данные измерения давления на донной плоскости задней стенки каверны (рис. 9). Давление на сплошной стенке увеличивается почти в четыре раза, причем его рост начинается практи-

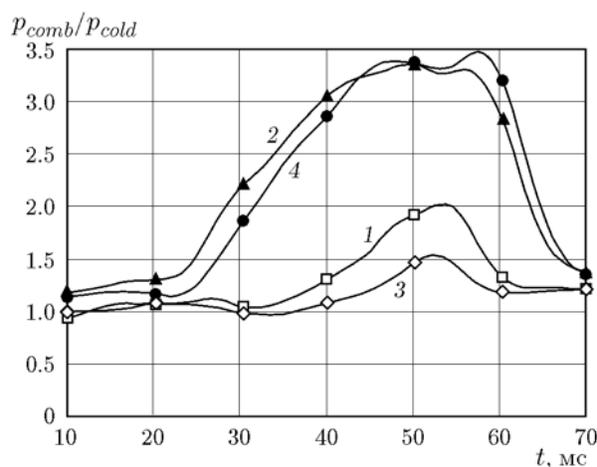


Рис. 8. Степень повышения статического давления на донном срезе инжекторов при горении керосина:

1, 2 — нижние инжекторы, 3, 4 — верхние; светлые точки — сплошная задняя стенка каверны, темные — дискретная задняя стенка

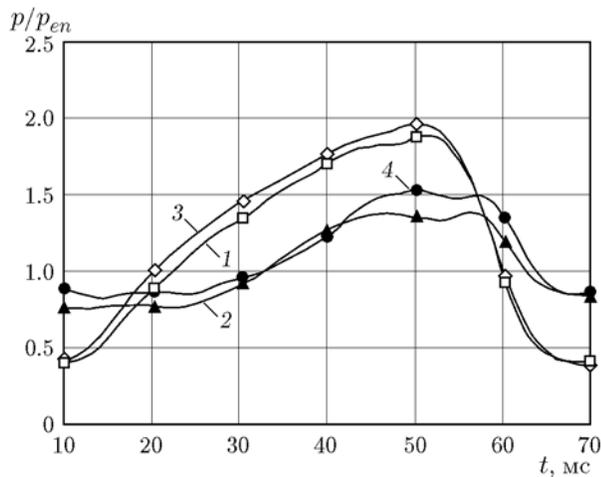


Рис. 9. Относительное статическое давление на задней стенке каверны:

1, 2 — нижняя каверна, 3, 4 — верхняя; светлые точки — сплошная задняя стенка каверны, темные — дискретная задняя стенка

чески на 10-й миллисекунде, а на дискретной стенке только полутора-двукратный рост с задержкой около 30 мс. В случае же без горения относительное донное давление выше на дискретной стенке. Такой результат объясняется их различной геометрией. Этот факт интересен для анализа структуры течения, возникающей при обтекании внутренних элементов КС различной конфигурации, поскольку оценка их сопротивления имеет смысл, конечно, в случае с горением.

Сопротивление рассчитывали путем умножения среднего давления на донном срезе инжекторов, фронтальной и донной плоскостях задней стенки каверны на соответствующую площадь элемента. Полученные силы (верх и низ КС) суммированы с учетом направления действия силы: тяга — положительная, сопротивление — отрицательное. Силы тяги — сопротивления, обезразмеренные скоростным напором на входе КС, представлены на рис. 10. Здесь суммарное относительное усилие $f = (F_1 - F_2 + F_3)/0.5\rho U^2 A$, где F_1 — сила, действующая на донный срез инжекторов; F_2 — сила, действующая на фронтальную плоскость задней стенки каверны; F_3 — сила, действующая на донную плоскость задней стенки каверны; ρ , U — плотность, скорость потока; A — площадь канала на входе КС, равная 50 × 100 мм. Видно, что результирующая сила, действующая на дискретную

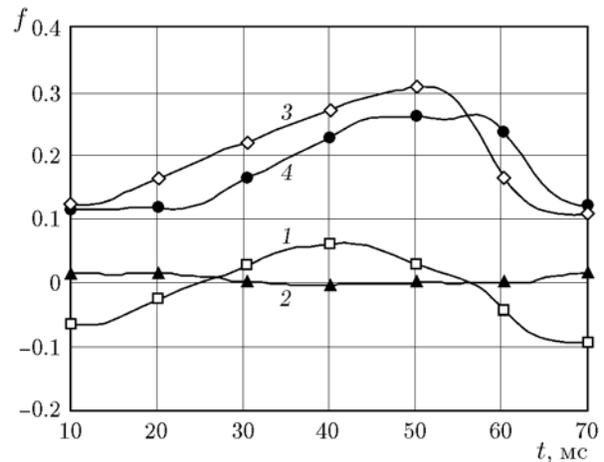


Рис. 10. Относительная сила (тяга — сопротивление), действующая на внутренние элементы КС:

1, 2 — результирующая сила на задней стенке каверны, 3, 4 — суммарная результирующая сила, включающая в себя также давление на донном срезе инжекторов; светлые точки — сплошная задняя стенка каверны, темные — дискретная задняя стенка

заднюю стенку (линия 2), слабо меняется в зависимости от развития процесса горения и близка к нулю, причем интенсивное горение ведет даже к некоторому уменьшению тягового усилия. Усилие на сплошной задней стенке каверны (линия 1) меняется четырехкратно: от сопротивления без горения примерно до того же уровня, но уже тяги при интенсификации горения. Здесь следует отметить особенность этой зависимости. Максимум тяги не соответствует максимальному уровню давления при интенсивном горении по всей КС. Это связано с тем, что рост давления в каверне со сплошной задней стенкой имеет самую большую временную задержку по длине КС, т. е. процесс «розжига» КС завершается в каверне. При этом давление в каверне и за ней выравнивается, что приводит к обнулению результирующей силы, которая действует на сплошную заднюю стенку. Такой результат сближает силу сопротивления на задней стенке каверн обеих рассмотренных конфигураций при максимуме горения. В итоге решающее влияние на сопротивление (тягу) внутренних элементов КС на ее начальном участке при горении по всему объему КС (после завершения процесса «розжига») оказывает давление на донном срезе инжекторов

(с учетом наличия дополнительной положительной силы на сплошной задней стенке с 25-й по 55-ю миллисекунду). Здесь следует отметить, что давление на донном срезе инжекторов зависит от конфигурации задней стенки каверны. Так, давление при горении в КС с дискретной задней стенкой каверны растет (см. рис. 8) в $3 \div 3.5$ раза, но при этом абсолютные значения донного давления выше при использовании сплошной задней стенки. В результате суммарная сила тяги внутренних элементов КС (включая донную область топливных инжекторов) при сплошной задней стенке каверны оказывается выше примерно на 18 % (см. рис. 10) при максимальном уровне давления для этой конфигурации. Однако это преимущество исчезает с 57-й миллисекунды вследствие снижения интенсивности горения при сплошной задней стенке и продолжения интенсивного горения при дискретной задней стенке каверны. При этом нельзя сделать вывод о преимуществе сплошной задней стенки каверны, поскольку общая полнота сгорания в КС с дискретной стенкой выше, что должно приводить к большему общему импульсу, в том числе за счет расширяющейся части КС и отсутствующего (в данной постановке) сопла. Длительность тепловыделения в процессе испытаний КС с дискретной стенкой также больше (важность этого параметра отмечена выше).

ВЫВОДЫ

Применение дискретной каверны ускоряет «розжиг» камеры сгорания по всему объему вплоть до донной области топливных инжекторов. Этот процесс сопровождается значительным ростом давления по всей длине камеры сгорания. Общий уровень статического давления в КС с дискретной задней стенкой каверны превышает на $10 \div 15$ % давление в КС со сплошной задней стенкой каверны.

Максимальная достигнутая полнота сгорания в КС с дискретной задней стенкой каверны составляет $\eta \approx 0.9$ против $\eta \approx 0.8$ для конфигурации со сплошной задней стенкой. Таким образом, общая эффективность горения и располагаемый импульс выше для КС с дискретной задней стенкой.

Интеграл сил давления на внутренних элементах КС, образующих нишевой стабилизатор, включая весь донный срез топливных ин-

жектеров, имеет положительный знак (сила тяги).

Результаты исследования позволяют утверждать, что предпочтительной является конфигурация каверны с дискретной задней стенкой, которая обеспечивает интенсивный массо- и теплообмен между областью каверны и основным течением в КС. Дискретная каверна положительно влияет на эффективность горения в более широком диапазоне параметров воздушного потока на входе КС в условиях проведенных испытаний, что предполагает некоторые допущения при переносе полученных данных на КС с другими условиями на входе. Тем не менее можно утверждать, что положительное свойство такой конфигурации должно сохраняться.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Огородников Д. А., Виноградов В. А., Строкин В. Н., Шихман Ю. М.** Российская программа создания экспериментального водородного двухрежимного ГПВРД: выбор концепции и результаты исследований // Авиакосм. техника и технология. — 2001. — № 1. — С. 27–37.
2. **Ben-Yakar A., Hanson R. K.** Cavity flameholders for ignition and flame stabilization in scramjets: an overview // J. Propul. Power. — 2001. — V. 17, N 4. — P. 869–877.
3. **Wang Zh., Wang H., Sun M.** Review of cavity-stabilized combustion for scramjet applications // J. Aerospace Eng. — 2014. — V. 228, N 14. — P. 2718–2735.
4. **Третьяков П. К., Бруно К.** Особенности горения керосина в сверхзвуковом потоке // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 3. — С. 35–42.
5. **Виноградов В. А., Кобыжский С. А., Петров М. Д.** Организация горения керосина в модельном ГПВРД // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 4. — С. 18–26.
6. **Owens M. G., Tehranian S., Segal C., Vinogradov V.** Flame-holding configurations for kerosene combustion in a mach 1.8 airflow // J. Propul. Power. — 1998. — V. 14, N 4. — P. 456–461.
7. **Hsu K. Y., Goss L. P., Roquemore W. M.** Characteristics of a trapped-vortex combustor // J. Propul. Power. — 1998. — V. 14, N 1. — P. 57–65.
8. **Yu G., Li J. G., Chang X. Y., Chen L. H., et al.** Fuel injection and flame stabilization in a liquid-kerosene-fueled supersonic combustor // J. Propul. Power. — 2003. — V. 19, N 5. — P. 885–893.

9. **Gruber M. R., Baurle R. A., Mathur T., Hsu K.-Y.** Fundamental studies of cavity-based flameholder concepts for supersonic combustors // *J. Propul. Power.* — 2001. — V. 17, N 1. — P. 146–153.
10. **Yu K., Wilson K. J., Smith R. A., Schadow K. C.** Experimental investigation on dual-purpose cavity in supersonic reacting flows // *AIAA Paper 98-0723.* — 1998.
11. **Barnes F. M., Segal C.** Cavity-based flameholding for chemically-reacting supersonic flows // *Prog. Aerospace Sci.* — 2015. — V. 76. — P. 24–41.
12. **Goldfeld M. A., Starov A. V., Vinogradov V. A., et al.** Experimental and numerical investigation of hydrogen and ethylene combustion in a mach 3-5 channel with a single injector // *AIAA Paper 96-3245.* — 1996.
13. **Bogdanoff D. W.** Advanced injection and mixing techniques for scramjet combustors // *J. Propul. Power.* — 1994. — V. 10, N 2. — P. 183–190.
14. **Gardner A. D., Paull A., McIntyre T. J.** Upstream porthole injection in a 2-D scramjet // *Shock Waves J.* — 2001. — V. 11, N 5. — P. 369–375.
15. **Freeborn A. B., King P. I., Gruber M. R.** Characterization of pylon effects on a scramjet cavity flame holder flow field // *AIAA Paper 2008-0086.* — 2008.
16. **Гувернюк С. В., Зубков А. Ф., Симоненко М. И., Швец А. И.** Экспериментальные исследования трехмерного сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* — 2014. — № 4. — С. 136–142.
17. **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.
18. **Виноградов В. А., Шихман Ю. М., Гольдфельд М. А., Старов А. В.** Рабочий процесс и стабилизация горения керосина в модели камеры сгорания при больших скоростях потока на входе // *Физика горения и взрыва.* — 2013. — Т. 49, № 5. — С. 8–16.
19. **Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И.** Некоторые методические аспекты исследования газодинамических моделей с тепло-массопроводом в импульсной аэродинамической трубе // *Физика горения и взрыва.* — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 45–54.
20. **Орлик Е. В., Старов А. В., Шумский В. В.** Определение газодинамическим способом полноты выгорания в модели с горением // *Физика горения и взрыва.* — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 23–34.
21. **Гольдфельд М. А., Старов А. В.** Схема воспламенения водорода в канале с ударными волнами // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика.* — 2014. — Т. 9, вып. 2. — С. 116–127.

*Поступила в редакцию 6/IV 2016 г.,
в окончательном варианте — 2/VIII 2016 г.*