

УДК 533.6.011.5,533.6.72

# ГОРЕНИЕ МЕТАНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ВПРЫСКА В ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК С БОЛЬШИМИ ДОЗВУКОВЫМИ СКОРОСТЯМИ

Р. В. Албегов, В. А. Виноградов, Ю. М. Шихман

Центральный институт авиационного машиностроения им. П. И. Баранова, 111116 Москва  
slavavino@ciam.ru

Важным этапом создания перспективных двигателей и энергетических установок является отработка эффективного процесса сжигания углеводородного топлива. В литературе широко представлены расчетные и экспериментальные данные по горению различных газовых топлив в лабораторных условиях, но недостаточно данных по эффективному сжиганию газообразных углеводородов в многофорсуночных коротких камерах сгорания. В статье представлены результаты систематических экспериментальных исследований рабочего процесса в модельной прямооточной камере сгорания прямоугольного сечения с горением природного газа (метана) в высокоскоростном дозвуковом воздушном потоке.

Ключевые слова: метан, схемы впрыска, инициирование и стабилизация горения, эффективность процесса.

DOI 10.15372/FGV20160102

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективное горение газообразных топлив в перспективных двигателях и энергетических установках требует хорошего смешения и, следовательно, достаточной длины участка выгорания. А при горении углеводородов необходимо учитывать, что их кинетические свойства хуже по сравнению с водородом, что отражается на увеличении более чем на порядок времени химических реакций в процессах воспламенения и горения.

В соответствии с закономерностями диффузионного горения [1–5] основным принципом получения качественного смешения на малых длинах следует считать впрыск топлива в воздушный поток через большое количество форсунок без слияния топливных струй вблизи мест подачи. При этом, если условия для самовоспламенения отсутствуют, поджиг и стабилизацию горения топливных струй вблизи мест впрыска необходимо обеспечивать за счет фиксированных отрывных зон с нужными размерами и уровнем концентрации топлива в них.

Кроме того, для уменьшения неравномерности распределения топлива по сечению камеры сгорания (КС) в месте впрыска обычно рассматривается подача топлива с пилонов, иницирующих к тому же дополнительные вихре-

вые структуры и градиенты параметров течения. Размеры поперечного сечения канала также влияют на выбор схемы впрыска, так как подача топлива только со стенок затрудняет получение требуемой полноты смешения, а установка пилонов приводит к загромождению проходного сечения канала, увеличению потерь импульса и конструктивному усложнению всего устройства.

Такое многофакторное влияние на эффективность процессов в КС с высокоскоростным потоком требует разработки компромиссных решений по впрыску и стабилизации горения с использованием подачи топлива со стенок и пилонов, а также стабилизаторов в виде пилонов с донной областью, уступов, ниш на стенках КС и пр. Одним из путей преодоления этих проблем является впрыск в воздушный поток части, а в пределе и всего топлива перед КС, например в воздухозаборнике или на носовой части летательного аппарата.

В статье представлены результаты систематических экспериментов по горению природного газа (метана) в высокоскоростном дозвуковом воздушном потоке в модельной прямооточной КС при разных способах впрыска топлива.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследовались способы организации эффективного сжигания газообразного углеводо-

родного топлива, в качестве которого использовался подогретый природный газ (содержание метана более 95 %, далее — метан), в модели прямоточной КС с высокоскоростным потоком воздуха на входе, характеризуемым числом Маха  $M = 2$ , полным давлением  $3.9 \div 7.6$  бар и температурой торможения  $690 \div 910$  К. Топливо подавалось через несколько поясов струйных форсунок с пилонов и со стенок КС, а горение стабилизировалось в отрывных зонах за уступами на стенках КС и за торцами топливоподающих пилонов. Основными трудностями при организации рабочего процесса в указанных условиях являются воспламенение метано-воздушной смеси при низкой статической температуре воздуха  $400 \div 450$  К и стабилизация горения при изменении коэффициента избытка топлива в пределах  $\phi_{\Sigma} = 0.3 \div 1.0$ . Поставлены две основные задачи исследования.

Первая задача — изучение свойств многопоясной системы подачи топлива и выявление рациональных способов впрыска и распределения топлива по поясам подачи, которые обеспечивают не только высокую полноту сгорания, но и широкую область режимов стабилизации горения по параметру  $\phi_{\Sigma}$ . Кроме того, наличие в модельной КС нескольких поясов подачи топлива позволяет сравнить эффективность двух принципиально отличающихся схем подачи.

Первая схема, традиционная для прямоточных КС, диффузионная. В модельной КС она реализуется при распределенной подаче топлива через струйные форсунки на топливоподающих пилонах-стабилизаторах и стенках КС перед уступами, форсунки равномерно распределены по сечению КС перед зоной горения. Стабилизация горения в такой схеме осуществляется в рециркуляционных зонах за уступами и за торцами пилонов-стабилизаторов.

Вторая схема, условно называемая кинетической (так как использует задержку воспламенения топливной смеси при рассматриваемых параметрах течения) или схемой с «преинжекцией» топлива, предполагает подачу большей части или всего топлива перед КС, в начале первого ее участка — изолятора, с тем чтобы улучшить смешение топлива с воздухом перед зоной горения. Стабилизация горения осуществляется в тех же рециркуляционных зонах с распространением горения в поток предварительно перемешанной топливовоздушной смеси.

Вторая задача — определение влияния ки-

нетических факторов, и прежде всего давления, температуры и коэффициента избытка топлива, на горение метана в КС с организацией рабочего процесса по обеим схемам. Исследования водородных прямоточных КС свидетельствуют о преимущественно диффузионном характере горения в них, что в большей степени определяется высокими скоростями химических реакций. Однако метан обладает значительно худшими реакционными свойствами, и потому его использование в данной работе может наглядно выявить зависимость эффективности горения от термодинамических параметров воздуха и расхода топлива. Тем более что получение высокой полноты сгорания углеводородного топлива ( $\eta > 0.8$ ) в высокоскоростном потоке воздуха на длинах канала менее 1 м является проблемой при создании высокоэффективных прямоточных КС [6–9].

### МОДЕЛЬ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ, СТЕНД И ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Модель камеры сгорания представляет собой канал длиной  $\approx 1000$  мм, включающий в себя два участка, с переменной по длине площадью прямоугольного поперечного сечения. Ширина канала 100 мм постоянна по длине КС, его высота на входе 40 мм, в выходном сечении — 80 мм.

Первый участок камеры сгорания — изолятор (рис. 1) с топливоподающими пилонами в конце него. Его высота меняется от 40 до 50 мм на длине канала 400 мм. Вторым участком — основная зона горения с большей и постоянной по длине площадью поперечного сечения. Он находится за уступами на верхней и нижней стенках КС, которые служат стабилизаторами горения. На боковых стенках КС уступов нет.

В начале первого участка расположены 8 пилонов для «преинжекции» топлива с 8-струйными форсунками за ними (I пояс, впрыск перпендикулярно потоку). В конце изолятора установлены 3 топливоподающих пилон-стабилизатора II пояса подачи топлива с 5 форсунками на каждом — по две на боковых поверхностях (впрыск перпендикулярно поверхности) и одна на верхнем торце (впрыск под углом  $30^\circ$ ).

В конце первого участка КС перед уступами равномерно по периметру тракта размещены 20 форсунок пристеночной подачи III пояса — по семь на верхней и нижней стенках

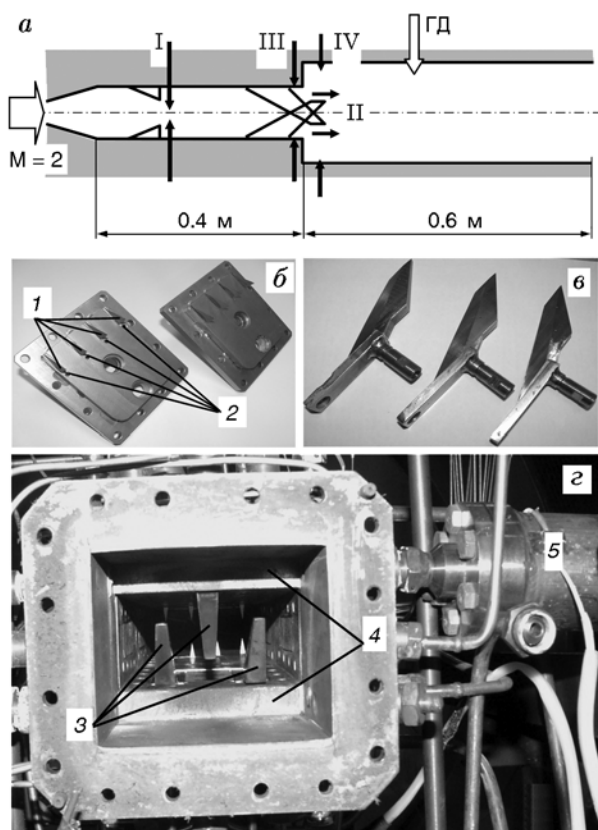


Рис. 1. Схема модельной камеры сгорания (а) и фотографии КС и топливоподающих пилонов (б-г):

а: ГД — воздушный газодинамический дроссель, темные стрелки и римские цифры — пояса подачи топлива; б: узлы I пояса подачи, 1 — пилоны, 2 — форсунки; в — пилоны II пояса подачи; г — вид сзади на первый участок камеры: 3 — пилоны-стабилизаторы II пояса подачи, 4 — донные уступы-стабилизаторы, 5 — огневой воспламенитель

и по три на боковых. Диаметры форсуночных отверстий II и III поясов одинаковы и равны 1.5 мм, что обуславливает соотношение расходов топлива  $G_i$  между поясами  $g_{II} : g_{III} = 0.38 : 0.62$  (здесь  $g_i = G_i/G_{\Sigma}$ ).

Непосредственно за каждым уступом на одной боковой стенке КС размещался метано-воздушный огневой воспламенитель для поджига топливоздушной смеси в отрывной зоне, а на другой — форсунка IV пояса для впрыска топлива непосредственно в отрывную зону стабилизатора. Для дросселирования течения в тракте КС с целью увеличения давления в зоне поджига использовался газодинамический воздушный дроссель, расположенный на втором участке КС. Фотографии пило-

нов модели КС показаны на рис. 1.

Стенд Ц16К НИЦ ЦИАМ обеспечивал проведение экспериментального исследования модельной КС по схеме присоединенного воздухопровода с параметрами воздушного потока на входе  $M = 2$ ,  $p_b^* = 3.6 \div 7.6$  бар,  $T_b^* = 690 \div 910$  К. Расход метана соответствовал значениям коэффициента избытка топлива  $\phi_{\Sigma} = 0.26 \div 0.85$ , температура метана  $T_{\text{топл}} = 540 \div 880$  К. Перед КС устанавливалось стендовое сверхзвуковое сопло ( $M \approx 2$ ), воздух подогревался электрическим подогревателем, а топливо — кауперным. Автоматизированное управление стендом обеспечивало длительность подачи топлива в КС до  $\approx 20$  с и ступенчатое изменение расхода (до трех режимов в одном пуске).

В системе измерения параметров КС регистрировались давление, температура, расход сред и сигналы управления. По длине КС и стендового сопла измерялось до 120 параметров, в том числе статическое давление в тракте и температура наружных поверхностей стенок, а температура внутренних поверхностей рассчитывалась. В центре выходного сечения КС вертикально устанавливалась гребенка с шестью платино-платинородиевыми термопарами для измерения температуры продуктов сгорания. Погрешность датчиков давления не более 0.3 %, термопар ХА и ХК —  $\pm 2 \div 3$  К. Расход метана измерялся кориолисовым расходомером с погрешностью менее 0.15 %, расход воздуха — расходомерным соплом с погрешностью менее 1 %.

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для расчета параметров потока в тракте КС решаются обратные газодинамическая и тепловая задачи с граничными условиями на входе в тракт, с учетом распределений давления на стенках  $p_w(x)$  и температуры внешних поверхностей стенок канала  $T_w(x)$ . Газодинамический расчет проводился по стационарным одномерным уравнениям сохранения в приближении равновесной термодинамики с учетом диссоциации и рекомбинации продуктов сгорания, трения и теплообмена на стенках тракта, сопротивления пилонов и донного давления в рециркуляционных зонах за уступами-стабилизаторами и за торцами топливоподающих пилонов пояса II. Импульс потока в начальном

сечении КС задавался по данным калибровочных испытаний стендового сопла совместно с испытываемой КС.

Температуру внутренней поверхности стенок тракта и удельный тепловой поток в стенку определяли на основе решения двумерной обратной нестационарной задачи теплопроводности для толстых стенок по данным измерения температуры наружной поверхности стенки тракта. Эта некорректная задача восстановления указанных выше параметров решалась в соответствии с [10, 11] как прямая задача с постоянными граничными условиями на одном временном шаге.

По параметрам потока определяли эффективность рабочего процесса: коэффициент полноты сгорания  $\eta$ , коэффициент восстановления полного давления  $\sigma$ , тепловые потери в стенки  $\overline{Q}_w$  и др. Отметим, что значение  $\eta$  определялось по выделенной при сгорании топлива полной энергии, в общем случае затраченной не только на нагрев рабочего тела, но и на диссоциацию продуктов сгорания и отвод тепла в стенки тракта КС.

Достоверность расчета параметров потока подтвердили опыты с измерением полной температуры в выходном сечении КС. Рис. 2, *a* позволяет сравнить измеренные температуры и их среднеарифметические значения с результатами газодинамического одномерного расчета при обработке данных. Сравнение проведено для режимов с впрыском топлива только со стенок КС через форсунки III пояса подачи и без впрыска топлива через IV пояс в рециркуляционные зоны за уступами на стенках КС (серия опытов 1, см. ниже таблицу). Несмотря на значительную неравномерность температуры из-за неравномерного распределения топлива по сечению КС, получено все же удовлетворительное согласование расчетных и средних значений измеренной температуры, различие между которыми уменьшается с ростом  $\phi_\Sigma$  и повышением их общего уровня.

На рис. 2, *b* для этих же режимов показаны значения полноты сгорания  $\eta$ , определенные в выходном сечении КС различными методами — газодинамическим расчетом и по среднему значению измеренных термопарами температур. Видно, что оба расчета дают довольно близкие значения  $\eta$ , что подтверждает достоверность методов обработки опытных данных для модельной КС с дозвуковым горением углеводородного топлива.

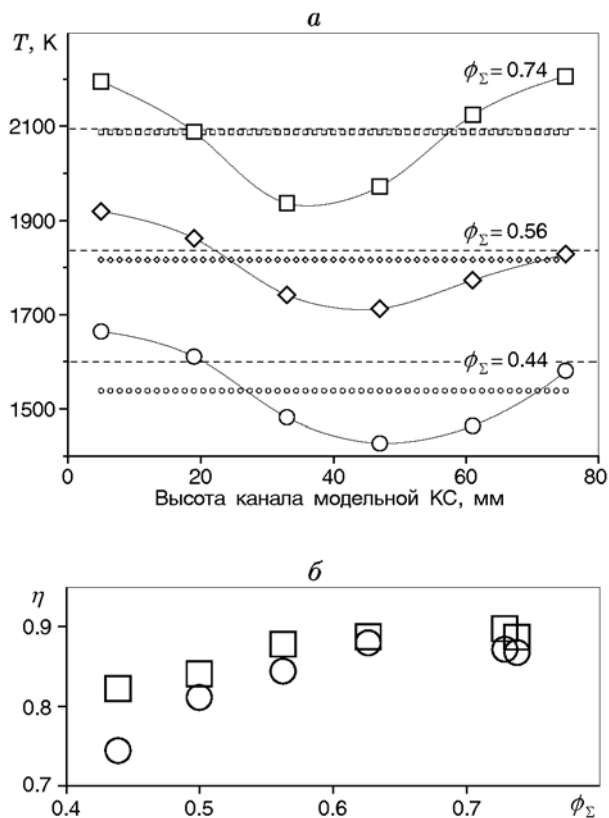


Рис. 2. Параметры потока на выходе из КС:

*a* — полная температура:  $\square, \diamond, \circ$  — измерения термопарами (большие символы) и их средние значения (аналогичные мелкие символы), штриховые линии — данные газодинамического расчета; *b* — полнота сгорания:  $\square$  — газодинамический расчет,  $\circ$  — расчет по измеренной температуре

Другим подтверждением достоверности методики обработки данных является удовлетворительное согласование давлений по тракту, измеренных в режимах без подачи топлива, с давлениями, рассчитанными по распределению среднemasсовой температуры воздуха по длине КС, определяемому по входной температуре и тепловым потокам на стенках тракта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

### Режимы испытаний

В экспериментах варьировались параметры воздушного потока на входе в КС; коэффициент избытка топлива  $\phi_\Sigma$  и его температура; расход топлива  $G_i$  через I и III пояса в диапазоне  $g_i = G_i/G_\Sigma = 0 \div 1$  при  $g_{II} : g_{III} = 0.38 : 0.62$  в случае их совместного использования;

Параметры режимов испытаний

Номер серии опытов	Количество режимов	Параметры воздуха на входе в КС		Параметры топлива					Пилоны пояса	
		$T_v^*$ , К	$p_v^*$ , бар	доля расхода топлива через пояс			$\phi_{IV}$	$\phi_{\Sigma}$		$T$ , К
				I	II	III				
1, 2	10	860 ÷ 880	7.1 ÷ 7.3	0	0	1	0	0.44 ÷ 0.74	538 ÷ 805	II
5–7	90	692 ÷ 912	3.9 ÷ 7.6	0	0	1	0 ÷ 0.04	0.27 ÷ 0.76	573 ÷ 876	II
13	24	851 ÷ 893	7.1 ÷ 7.4	0	0	1	0.04 ÷ 0.06	0.67 ÷ 0.85	597 ÷ 834	I
3, 4	50	853 ÷ 889	6.9 ÷ 7.4	0	0.38	0.62	0 ÷ 0.11	0.35 ÷ 0.79	646 ÷ 855	II
8, 9	77	736 ÷ 909	7.0 ÷ 7.5	0	0.38	0.62	0.02 ÷ 0.05	0.31 ÷ 0.81	582 ÷ 876	II
10, 11	55	735 ÷ 909	7.0 ÷ 7.5	1	0	0	0.003 ÷ 0.055	0.49 ÷ 0.81	597 ÷ 885	I + II
11a	30	778 ÷ 902	7.1 ÷ 7.4	0.8	0.08	0.12	0.03 ÷ 0.06	0.44 ÷ 0.81	616 ÷ 859	I + II
12	25	781 ÷ 903	7.3 ÷ 7.4	0.8	0	0.2	0.026 ÷ 0.058	0.47 ÷ 0.81	618 ÷ 872	I
12a	32	780 ÷ 900	7.2 ÷ 7.4	0.4	0	0.6	0.027 ÷ 0.047	0.26 ÷ 0.79	601 ÷ 878	I
14	6	864 ÷ 901	7.1 ÷ 7.5	1	0	0	0.04 ÷ 0.06	0.59 ÷ 0.83	663 ÷ 813	I

расход топлива через IV пояс, соответствующий диапазону  $\phi_{IV} = 0 \div 0.1$ . Изменялась и конфигурация тракта модельной КС при установке или снятии пилонов I и II поясов подачи топлива. В соответствии с методологией проведения опытов при выбранных значениях  $p_v^*$ ,  $T_v^*$ ,  $\phi_{IV}$  и распределении топлива между поясами значение  $\phi_{\Sigma}$  подбирали так, чтобы обеспечить розжиг КС и стабилизацию горения в пуске на первом режиме и уменьшение расхода топлива во втором и третьем режимах.

Отметим, что уже во вторых режимах пуска температура топлива уменьшилась на  $100 \div 120^\circ$  по сравнению с первыми режимами из-за охлаждения кауперного подогревателя. Анализ показал, что в режимах стабилизированного горения с близкими коэффициентами  $\phi_{\Sigma}$ , но разными температурами топлива значения полноты сгорания метана близки, так как при исследованных значениях  $\phi_{\Sigma}$  изменение среднemasсовой температуры топливовоздушной смеси не превышает  $1 \div 1.5$  %. Следовательно, наиболее вероятной причиной срывов горения во втором или третьем режиме в течение одного пуска является обеднение состава в отрывных зонах стабилизаторов.

В работе получены данные более чем по 300 режимам стабилизированного горения в модельной КС (см. таблицу), позволившие опре-

делить особенности розжига КС и распределения газодинамических параметров в тракте КС, эффективность рабочего процесса при горении метана в высокоскоростном до- и трансзвуковом потоке в широких диапазонах изменения параметров воздуха и топлива, выявить влияние кинетических факторов на процесс горения, а также оценить уровень тепловых потоков в стенке.

При осмотре КС представляло интерес состояние торцов пилонов I пояса, топливоподающих пилонов-стабилизаторов II пояса и уступов-стабилизаторов (см. фотографию на рис. 1,2). Светлые торцы пилонов I пояса — без цвета побежалости — свидетельствовали об отсутствии горения за ними, а темные торцы пилонов II пояса подтвердили возможность стабилизации горения по всей высоте пилонов с толщиной задних кромок  $12 \div 6$  мм при впрыске топлива со стенки КС в отрывную зону вдоль наклонных поверхностей донных торцов пилонов.

Другая важная особенность — неравномерная окраска цветами побежалости поверхностей донных торцов уступов-стабилизаторов — характеризует, по-видимому, температурную и концентрационную неоднородности, а также пространственный характер течений в отрывных зонах за торцами уступов,

хотя заметного отличия давлений, измеренных за уступами, не выявлено.

### Особенности розжига КС

Предварительные оценки показали невозможность инициирования горения метана в воздушном потоке с  $M \approx 2$  при статических параметрах  $p_B = 0.3 \div 0.7$  бар и  $T_B = 400 \div 500$  К, так как время задержки воспламенения более чем на порядок превышает время нахождения метановоздушной смеси в камере. Поэтому розжиг КС проводился с помощью двух метановоздушных воспламенителей (кратковременно, до 1 с), размещенных на расстоянии, равном одной высоте КС, ниже по потоку от уступов-стабилизаторов, с подачей дополнительного расхода топлива в отрывные зоны за уступами [6, 7] при одновременном газодинамическом дросселировании потока подводом необходимого расхода воздуха.

Для повышения надежности розжига КС при различных распределениях расхода топлива по поясам подачи была измерена концентрация метана в отрывной зоне за уступами в условиях, предшествующих по времени розжигу КС. Определено, что необходимая для воспламенения концентрация метана в зонах стабилизации с  $\phi_{\Sigma} \geq 0.9 \div 1.1$  достигается при подаче только через III пояс ( $\phi_{\Sigma} \approx 0.8$ ) и практически не реализуется при распределенной подаче. Установлено также, что в условиях испытаний модельной КС «пилонное» топливо II пояса подачи практически не попадает в отрывные зоны за уступами, т. е. более богатые топливовоздушные смеси в зонах стабилизации за уступами можно получить лишь при непосредственном впрыске в них топлива. Поэтому для надежного розжига КС дополнительный расход топлива подавался в отрывные зоны за уступами через IV пояс.

Однако отметим, что из-за различных условий массообмена между основным потоком и отрывными зонами уступов-стабилизаторов во время дросселирования тракта КС и без него воспламенение топлива при дросселировании не гарантировало стабилизацию горения после прекращения дросселирования и иногда наблюдались срывы горения даже на первых режимах пусков, где расходы основного топлива наибольшие, но чаще на вторых или третьих при меньших, чем на первых режимах, расходах топлива.

### Газодинамика потока в тракте КС

Исследованные тракты КС различались наличием пилонов I и II поясов подачи. На рис. 3 показаны типичные для «горячих» и «холодных» режимов распределения статического давления в тракте КС ( $p$ ), отнесенного к давлению в ресивере стендового сопла ( $p_{\text{рес}}^* = p_B^*$ ), без пилонов I пояса и с подачей топлива с различными значениями  $\phi_{\Sigma}$  только через III пояс.

Распределение относительного давления  $p/p_B^*$  в холодных режимах без топлива свидетельствует о том, что, несмотря на 20%-е расширение канала первого участка КС, загромождение его пилонами II пояса приводит к тому, что давление в нем почти не уменьшается.

Видно также, что давление на выходе из КС в режимах без горения увеличивается, что соответствует течению с псевдоскачком. Однако зона повышенного давления не достигает уступов-стабилизаторов, что свидетельствует о необходимости дросселирования тракта для запуска КС. Отметим также, что при установке пилонов I пояса вблизи них появляется зона повышенного на 20 ÷ 30 % давления, размеры которой несколько превышают длину пилонов ( $\approx 30$  мм).

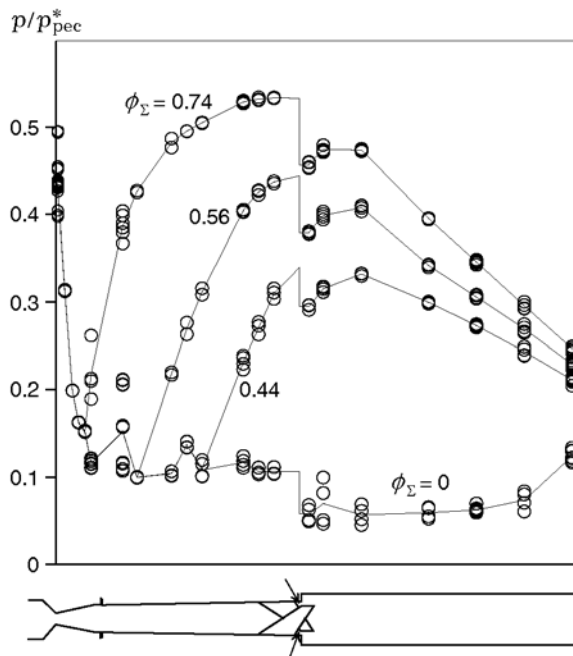


Рис. 3. Относительные статические давления по длине модельной КС при различных значениях  $\phi_{\Sigma}$  (серия опытов 2, III пояс,  $p_{\text{рес}}^* = 7.2$  бар,  $T_B^* = 870$  К)

В горячих режимах реализуется характерная для дозвукового горения структура течения с псевдоскачком на участке-изоляторе, продвигающимся против потока по мере роста теплоподвода при увеличении  $\phi_\Sigma$ , причем давление в выходном сечении КС значительно выше, чем в барокамере стенда ( $p/p_b^* \approx 0.12$ ). Такое превышение характеризует все горячие режимы, и, следовательно, полученные результаты можно считать достаточно общими и не зависящими от условий окружающей среды на стенде. Отметим также, что во всех опытах не наблюдалось срыва течения в критическом сечении стендового сопла.

В опытах с подачей топлива через III и IV пояса в трактах с пилонами II пояса и без них при одинаковых параметрах воздуха и  $\phi_\Sigma = 0.76$  значения  $p/p_b^*(x)$  оказались близки в зоне горения и заметно отличались только на первом участке КС в зоне псевдоскачка. Без пилонов II пояса псевдоскачок располагался ниже по потоку, а близкие давления в выходном сечении КС предварительно свидетельствуют о похожей эффективности горения. Таким образом, присутствие пилонов II пояса без впрыска с них топлива не приводит, несмотря на дополнительную турбулизацию потока в камере, к улучшению смешения в тракте КС и повышению полноты сгорания. Тем не менее анализ результатов опытов с подачей топлива через комбинации поясов III + IV, II + III + IV и I + IV при одинаковых значениях  $p_b^*$ ,  $T_b^*$  и  $\phi_\Sigma$  показал преимущество тех схем впрыска топлива, в которых используются пилоны II пояса подачи, в основном по причине дополнительных возможностей стабилизации горения топливных струй на торцах пилонов.

Как пример, на рис. 4 по результатам опытов с подачей топлива через I пояс без пилонов и с пилонами II пояса показано изменение относительного статического давления в конце первого участка перед уступами  $p_1/p_b^*$  и в конце тракта КС  $p_{II}/p_b^*$  в зависимости от параметра  $\Pi(T_b^*, \phi_\Sigma) = 10^4(1 + L_0/\phi_\Sigma)^{-1}/T_b^*$ , пропорционального теплоподводу с точностью до коэффициента полноты сгорания ( $L_0$  — стехиометрический коэффициент). Видно, что опытные данные удовлетворительно коррелируют по параметру  $\Pi(T_b^*, \phi_\Sigma)$ . Разброс значений  $p/p_b^*$ , наиболее заметный в конце первого участка КС, объясняется наличием или отсутствием пилонов II пояса, условиями подачи топлива, влиянием кинетических факторов и сви-

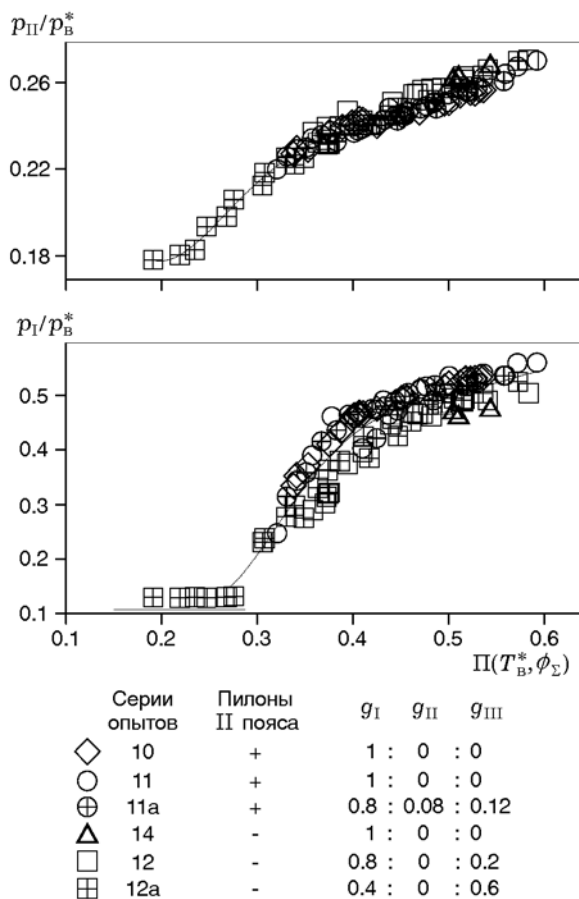


Рис. 4. Относительные статические давления в конце первого участка ( $p_1/p_b^*$ ) и в выходном сечении ( $p_{II}/p_b^*$ ) модельной камеры сгорания: пояса подачи — I, I + II + III, I + III  $T_b^* = 780 \div 890$  К,  $p_b^* = 7.2 \div 7.5$  бар,  $\phi_\Sigma = 0.29 \div 0.81$ ,  $\phi_{IV} = 0.03 \div 0.06$

детельствует об отличии коэффициентов полноты сгорания при различных условиях опытов.

Эти предположения хорошо подтверждаются обобщением данных по числу Маха и коэффициенту восстановления полного давления  $\sigma$  в характерных сечениях тракта КС. Это иллюстрирует рис. 5, где приведены зависимости указанных параметров от коэффициента теплоподвода  $\Pi\eta$ , аналогичного ранее использованному, но учитывающему полноту сгорания. Опыты проводили при впрыске топлива через пояса III + IV. Видна очень хорошая корреляция всех величин на входе, в конце первого участка и в выходном сечении КС (индексы I, в; I; II соответственно). Как и следовало ожидать, во всех горячих режимах в выходном сечении

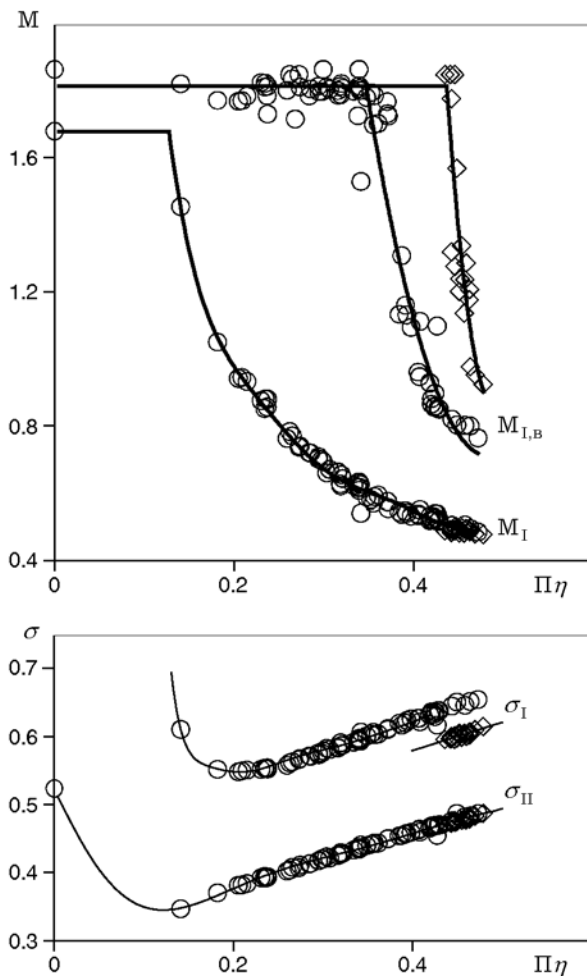


Рис. 5. Газодинамические параметры потока в модельной КС при подаче топлива через пояса III и IV:

○ — КС с пилонами II пояса, ◇ — без пилонов II пояса

КС достигалось значение  $M_{II} \approx 1.0$ .

Необходимо отметить, что для исследованных условий и схем впрыска топлива картина течения в тракте КС, которую явно характеризуют распределения давлений и тепловых потоков, типична для режимов дозвукового горения, а полученные значения  $p/p_B^*$  в сечениях выхода из первого и второго участков КС отличаются при одинаковом параметре теплоподвода не более чем на 10 ÷ 12 % и зависят в основном от полноты сгорания топлива.

### Эффективность горения

Достоверность расчетов эффективности рабочего процесса в КС, наряду с данными

измерения в ней температуры продуктов сгорания (см. рис. 2), подтверждает также качественное согласование распределений давления, измеренного в тракте в режимах без подачи топлива, и давления, рассчитанного по параметрам потока на входе и по распределению среднемаассовой температуры воздуха в КС  $T_B^*(x) = T_B^* - \Delta T_w^*(x)$ .

Расчетный анализ исследованных режимов КС показал, что в условиях стабилизированного горения на втором участке КС устанавливается дозвуковое течение с числами Маха перед зоной горения  $M = 0.5 \div 0.6$ , а коэффициенты восстановления полного давления в выходном сечении изменяются в диапазоне  $\sigma = 0.5 \div 0.6$ . В опытах с разными распределениями топлива по поясам подачи получен высокий уровень максимальных значений коэффициента полноты сгорания.

На рис. 6 представлены соответствующие данные, полученные в опытах 1–13 при подаче метана через III и IV пояса в широких диапазонах изменения параметров воздуха ( $T_B^* = 690 \div 900$  К,  $p_B^* = 4.1 \div 7.8$  бар) и топлива ( $T_{\text{топл}}^* = 540 \div 880$  К,  $\phi_\Sigma = 0.3 \div 0.83$ ) и с разными расходами топлива подпитки (IV пояс,  $\phi_{IV} = 0 \div 0.06$ ). Установлено, что максимальные значения  $\eta = 0.88 \div 0.93$  реализуются при наибольших значениях  $T_B^*$ ,  $p_B^*$  и  $\phi_\Sigma = 0.55 \div 0.7$ . Немонотонность функции  $\eta(\phi_\Sigma)$ , в отличие от монотонного изменения при диффузионном горении, свидетельствует о влиянии кинетических факторов на горение метана в исследуемых условиях.

Явно можно выделить область преобладающего влияния кинетических факторов при  $\phi_\Sigma < 0.6 \div 0.65$  и область диффузионного горения при  $\phi_\Sigma > 0.7$  с определяющим влиянием процессов смешения. Влияние кинетических факторов на горение метана усиливается с уменьшением  $\phi_\Sigma$ , и для данной КС значения  $\eta(\phi_\Sigma)$  резко уменьшаются при  $T_B^* < 730$  К (рис. 6, б). По-видимому, последнее можно объяснить влиянием кинетики на стабилизирующую способность уступов-стабилизаторов вплоть до срыва горения на одном из них или уменьшением областей стабилизации за ними — скорее всего, последнее.

В опытах 1–13 установлен важный факт — отсутствие в режимах стабилизированного горения заметного влияния температуры топлива на эффективность горения (рис. 6, а), по крайней мере в выходном сечении КС. Выяв-



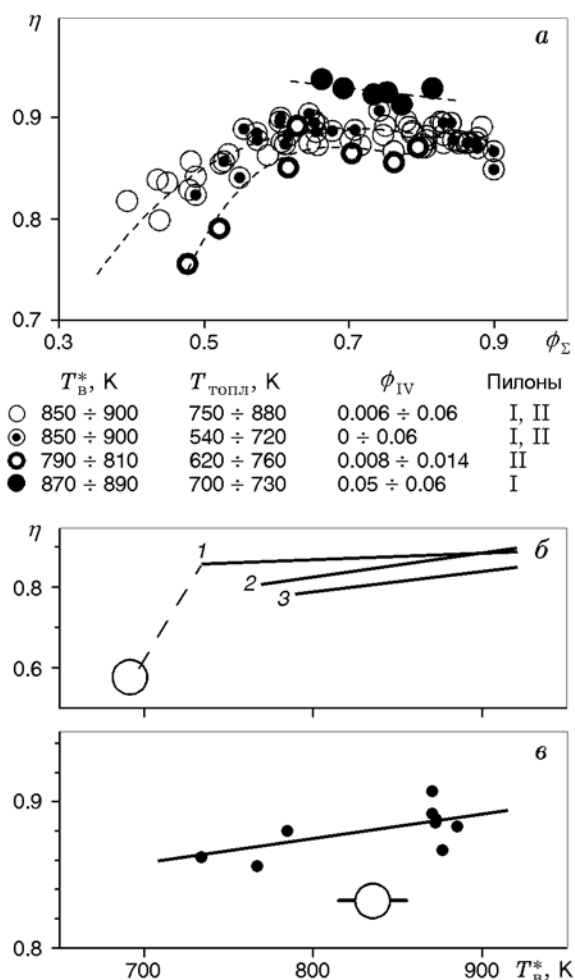


Рис. 6. Эффективность горения метана:

впрыск через пояса III + IV, серии опытов 1, 2, 5–7, 13, а — полнота сгорания,  $p_{\text{в}}^* = 7.1 \div 7.6$  бар; б — влияние  $T_{\text{в}}^*$ ,  $p_{\text{в}}^* = 7.1 \div 7.6$  бар; линии — аппроксимация  $\eta$  для режимов: 1 —  $\phi_{\Sigma} = 0.63 \div 0.83$ , 2 —  $\phi_{\Sigma} = 0.50 \div 0.56$ , 3 —  $\phi_{\Sigma} = 0.43 \div 0.50$ , кружок —  $\phi_{\Sigma} = 0.71$ ; в — влияние  $p_{\text{в}}^*$ , темные символы —  $p_{\text{в}}^* = 7.1 \div 7.6$  бар,  $\phi_{\Sigma} = 0.66 \div 0.71$ ,  $\phi_{\text{IV}} = 0 \div 0.02$ , светлый кружок —  $p_{\text{в}}^* = 4.1$  бар,  $\phi_{\Sigma} = 0.69$ ,  $\phi_{\text{IV}} = 0.01$

лено также и отсутствие влияния расхода топлива подпитки на полноту сгорания при  $\phi_{\text{IV}} \leq 0.06$ . Последнее объясняется тем, что, как показали специальные измерения концентрации метана в отрывных зонах за уступами, при подаче основного топлива со стенок перед уступами (через III пояс) при малых значениях  $\phi_{\text{IV}}$  определяющее влияние на величину  $\phi$  оказывает расход топлива через III пояс. При этом влияние  $\phi_{\text{IV}}$  более заметно при малых значениях  $\phi_{\text{III}}$ , т. е. при распределенной подаче топлива через пояса I–III.

Выявлено хорошее эксплуатационное свойство пристеночной системы подачи топлива перед уступами-стабилизаторами — широкая по расходу топлива область устойчивых режимов с горением. Так, при  $T_{\text{в}}^* = 850 \div 900$  К после запуска КС с  $\phi_{\Sigma} = 0.6 \div 0.8$  переход к меньшему расходу топлива не приводил к срыву горения, даже если не было дополнительного подвода топлива в рециркуляционные зоны стабилизаторов ( $\phi_{\text{IV}} = 0$ ), а при  $T_{\text{в}}^* < 800 \div 820$  К режимы стабилизированного горения обеспечивались даже при малых значениях  $\phi_{\text{IV}} < 0.02 \div 0.03$ .

Особо отметим данные опытов с подачей метановоздушных смесей через III пояс при соотношении расходов  $G_{\text{в}}/G_{\text{СН}_4} = 0.13 \div 1.26$  (темные кружки на рис. 6,а). Увеличение полноты сгорания в этих опытах по сравнению с впрыском чистого метана объясняется увеличением глубины проникновения топливных струй в поток воздуха, которое даже при малой доле воздуха приводит к более равномерному распределению топлива в поперечном сечении КС и, следовательно, к лучшему смешению. Эти данные подтверждают существенное влияние смешения на эффективность горения, т. е. преобладание механизмов диффузионного горения в КС в условиях проведенных опытов.

Рис. 7 иллюстрирует эффективность горения при подаче метана через пояса II–IV в серии опытов 3, 4, 8, 9. В конструкции модельной КС между поясами II и III реализовано соотношение расходов  $g_{\text{II}} : g_{\text{III}} = 0.38 : 0.62$ . Опыты проводились примерно при тех же параметрах воздуха и топлива, как и опыты с подачей топлива через III пояс. Как и ожидалось, более равномерное распределение топлива по поперечному сечению КС, чем при подаче только через III пояс, обусловило большие на несколько процентов максимальные значения полноты сгорания, которые при  $T_{\text{в}}^* = 850 \div 900$  К,  $p_{\text{в}}^* \approx 7.2$  бар и  $\phi_{\Sigma} = 0.55 \div 0.8$  достигали уровня  $0.93 \div 0.98$ .

В связи с тем, что часть расхода топлива из пристеночной области течения выносилась пилонами II пояса подачи непосредственно в поток и рециркуляционные зоны стабилизаторов обеднялись, для обеспечения режимов устойчивого стабилизированного горения требовалось увеличить расход топлива подпитки  $\phi_{\text{IV}}$ , поэтому эти опыты проходили в условиях подачи топлива  $\phi_{\text{IV}} = 0 \div 0.11$ . Опыты показали, что при  $\phi_{\text{IV}} = 0$  эффективность го-

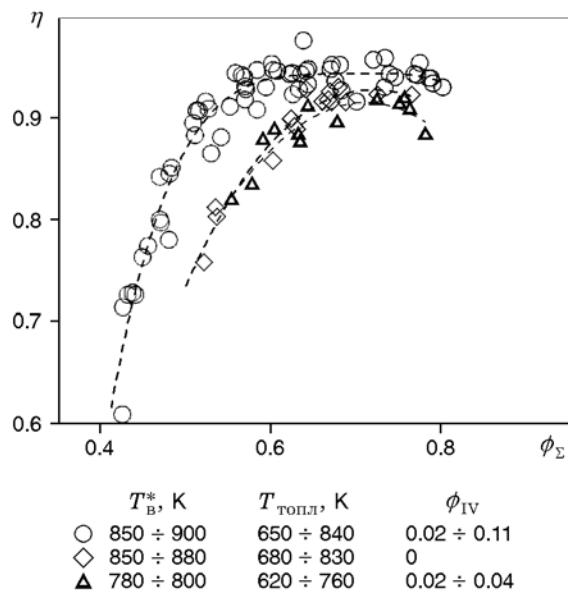


Рис. 7. Полнота сгорания в модельной КС при подаче метана через пояса II–IV ( $\phi_{\text{II}} : \phi_{\text{III}} = 0.38 : 0.62$ )

рения снижается на несколько процентов по сравнению с режимами, в которых топливо в отрывные зоны стабилизаторов подавалось с  $\phi_{\text{IV}} \geq 0.02$ . Однако при всех  $\phi_{\text{IV}} > 0.02$  заметного влияния этого параметра на эффективность горения не обнаружено.

Уменьшение расхода топлива в области  $\phi_{\Sigma} < 0.5 \div 0.55$  приводило к снижению полноты сгорания в выходном сечении КС более резко, чем в опытах с подачей метана через III и IV пояса, — до уровня  $\eta = 0.6$  уже при  $\phi_{\Sigma} = 0.43$ . Анализ показал, что возможная причина — срыв горения в рециркуляционных зонах за задними кромками пилонов II пояса, так как значения  $\phi_{\text{II}}$  малы ( $\phi_{\text{II}} \approx 0.15 \div 0.3$  при  $\phi_{\Sigma} = 0.4 \div 0.8$ ). Поэтому обеднение топливовоздушной смеси в отрывных зонах за торцами пилонов II пояса (с переменной по высоте шириной задней кромки) и снижение температуры воздуха или отсутствие подпитки в режимах с  $\phi_{\text{IV}} = 0$  сильно ухудшало стабилизирующие свойства отрывных зон за пилонами и уступами даже при больших значениях  $\phi_{\Sigma}$ .

Данные рис. 8 характеризуют эффективность горения при подаче метана через пояса I–IV в серии опытов 10–12 и 14 с различным распределением расхода топлива по поясам. Опыты проводились как при использовании пилонов II пояса, так и без них.

Установлено, что наиболее высокая полнота сгорания достигается в тракте КС с пилонами-стабилизаторами II при подаче основного расхода топлива через I пояс (режим «преинжекции» топлива) в условиях  $\phi_{\text{IV}} = 0.01 \div 0.05$ . При такой схеме подачи  $\eta = 0.94 \div 0.98$  (рис. 8,з), т. е. значения практически того же уровня, что и при подаче основного топлива через II и III пояса, однако при впрыске через I пояс область максимальных значений  $\eta$  при  $\phi_{\Sigma}(\eta_{\text{max}}) = 0.7 \div 0.75$  значительно уже. При той же схеме впрыска, но без пилонов II пояса реализованная в опытах зона стабилизированного горения находится в пределах  $\phi_{\Sigma} = 0.78 \div 0.84$  и полученные значения полноты сгорания на 10 ÷ 12 % ниже, чем при наличии пилонов-стабилизаторов II пояса:  $\eta = 0.83 \div 0.85$  (рис. 8,з).

Для КС с пилонами-стабилизаторами при других распределениях топлива по поясам подачи I–IV максимальная полнота сгорания ниже, чем при подаче основного топлива через I пояс:  $\eta \leq 0.9 \div 0.92$  при  $g_{\text{I}} : g_{\text{II}} : g_{\text{III}} = 0.8 : 0.08 : 0.12$ . Однако при разных распределениях топлива по поясам впрыска с участием I пояса эффективное горение с  $\eta > 0.85 \div 0.9$  достигается в довольно узких диапазонах  $\phi_{\Sigma}$  (рис. 8,а–в). Правда, повышение доли топлива, поданного через III пояс, уменьшает значения  $\phi_{\Sigma}$  на границе бедного срыва.

Опыты при пониженной температуре воздуха (до уровня  $T_{\text{в}}^* = 780 \div 800$  К) также свидетельствуют об уменьшении в этих режимах полноты сгорания и, следовательно, о влиянии кинетических факторов на горение метана при распределенном по тракту впрыске топлива.

Тепловые потери в стенки КС  $\bar{Q}_w = Q_w / (G_{\text{топл}} H_u \eta)$ , полученные по данным оценок тепловых потоков по измерениям температуры стенок (здесь  $H_u$  — массовая теплотворная способность топлива), составляют 4 ÷ 5 % от тепловыделения в КС при расходе метана  $\phi_{\Sigma} = 0.5 \div 0.8$  и схеме подачи через пояса II + III + IV. В случае пристеночной подачи (через III и IV пояса) теплотери возрастают до 5 ÷ 7 %. Значения  $\bar{Q}_w$  в опытах с подачей всего топлива или его части через I пояс близки к уровню потерь при подаче через пояса II + III. При  $\phi_{\Sigma} = 0.3 \div 0.85$  от 10 до 3.5 ÷ 4 % тепла, выделившегося при горении, отводилось в стенки КС. Специально отметим, что из анализа температуры стенок и распределений  $q_w(x)$  и  $\eta(x)$  в режимах стабилизированного горения следу-

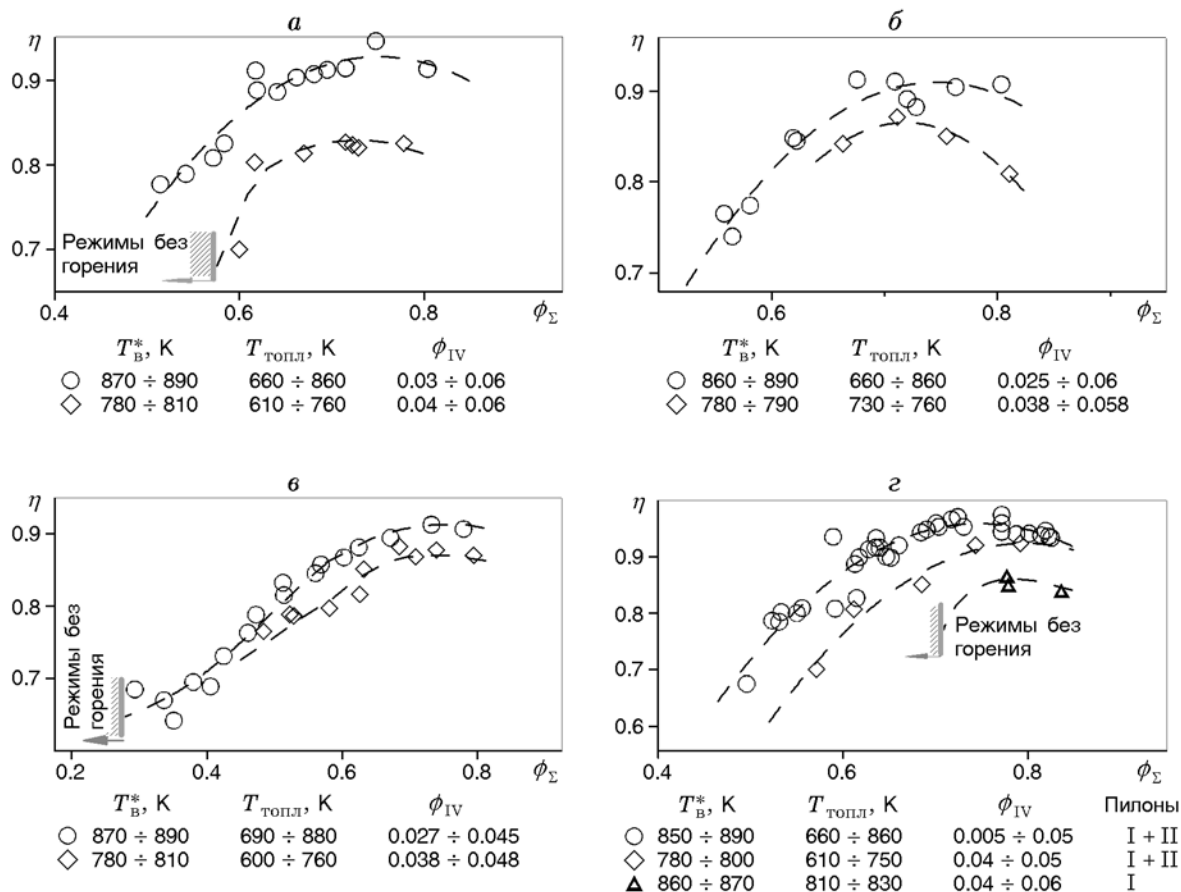


Рис. 8. Полнота сгорания метана в модельной КС при подаче топлива через пояса I–IV:

*а* — пояса I + II + III + IV,  $\phi_I : \phi_{II} : \phi_{III} = 0.8 : 0.08 : 0.12$ ; *б* — пояса I + III + IV,  $\phi_I : \phi_{III} = 0.8 : 0.2$ , без пилонов II пояса; *в* — пояса I + III + IV,  $\phi_I : \phi_{III} = 0.4 : 0.6$ , без пилонов II пояса; *г* — пояса I + IV

ет, что во всех опытах с подачей топлива через I пояс горение топлива на первом участке камеры не реализовывалось.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования рабочего процесса в модельной прямоточной камере сгорания прямоугольного сечения при параметрах воздушного потока на входе  $M = 2$ ,  $T_B^* = 690 \div 910$  К и  $p_B^* = 3.9 \div 7.6$  бар с горением в высокоскоростном дозвуковом воздушном потоке природного газа (метана), подогретого до  $540 \div 880$  К, с коэффициентами избытка топлива  $\phi_\Sigma = 0.3 \div 0.85$ . Испытания проводились по схеме присоединенного воздухопровода с подачей топлива со стенок КС (пояс III) и с топливоподающих пилонов (пояса I и II). Стабилизация горения осуществлялась в рециркуляционных зонах за донными торцами

пилонов и уступами на верхней и нижней стенках камеры с подачей топлива через пояс IV.

Испытаны конфигурации КС с пилонами I и II поясов подачи и без них при различных распределениях расхода топлива по поясам I–IV. Наиболее эффективной оказалась схема с распределенной подачей через пояса II + III + IV: при  $T_B^* = 850 \div 910$  К и  $p_B^* = 7 \div 7.8$  МПа максимальные значения  $\eta = 0.92 \div 0.96$  получены в широком диапазоне  $\phi_\Sigma = 0.53 \div 0.88$ . При индивидуальной подаче через III пояс богатых метановоздушных смесей с соотношением расходов  $G_B/G_{CH_4} = 0.13 \div 1.26$  эффективность горения метана близка к максимальной:  $\eta = 0.92 \div 0.94$  при  $\phi_\Sigma = 0.55 \div 0.8$ .

Все схемы КС с распределенной подачей топлива через пояса I–IV характеризуются высокими значениями  $\eta = 0.92 \div 0.97$ , но в более узком диапазоне  $\phi_\Sigma = 0.65 \div 0.85$  и только при наличии пилонов II пояса.

Зависимости  $\eta(\phi_\Sigma)$  и кривые выгорания метана по длине КС свидетельствуют о заметном влиянии кинетических факторов на процессы горения при всех схемах подачи метана в КС. Уменьшение температуры и давления на входе в КС до  $T_B^* = 690$  К и  $p_B^* = 4$  МПа приводит к снижению полноты сгорания. Определено, что снижение  $T_B^*$  оказывает наименьшее влияние при подаче основного топлива через III пояс. Влияние температуры метана на горение в КС не выявлено.

В работе продемонстрирована возможность организации эффективного рабочего процесса в КС с полной горения до  $0.94 \div 0.98$  при подаче большей части топлива ( $40 \div 95$  %) за стреловидными пилонами до входа в КС (изоляторе) без срыва течения и горения в нем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Аннушкин Ю. М.** Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 4. — С. 59–71.
2. **Аннушкин Ю. М., Сverdlov E. D.** Закономерности изменения длины диффузионных пламен газообразных топлив в спутном потоке воздуха // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 3. — С. 46–51.
3. **Баев В. К., Головичев В. И., Третьяков П. К., Гаранин А. Ф., Константиновский В. А., Ясаков В. А.** Горение в сверхзвуковом потоке / под ред. М. Г. Кталхермана. — Новосибирск: Наука, 1984.
4. **Strokin V. N., Grachev V. A.** The peculiarities of hydrogen combustion in model scramjet combustors // Proc. of the XIII Intern. Symp. on Air Breathing Engines, AIAA. — 1997. — V. 1. — P. 374–384.
5. **Sosounov V.** Research and development of ramjets/ramrockets. Part III. The study of gaseous hydrogen ram combustors // AGARD Lecture Series. — 1993. — V. 194. — P. 6-1–6-6.
6. **Vinogradov V. A., Shikhman Yu. M., Albegov R. V., Vedeshkin G. K.** About possibility of effective methane combustion in high speed subsonic airflow // AIAA Paper 2002-5206. — 2002. — (11th AIAA/AAAF Intern. Conf. «Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies», Orleans, France, 2002).
7. **Vinogradov V. A., Shikhman Yu. M., Albegov R. V., Vedeshkin G. K.** Experimental research of methane combustion in high speed subsonic airflow // AIAA Paper 2002-5208. — 2002. — (11th AIAA/AAAF Intern. Conf. «Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies», Orleans, France, 2002).
8. **Vinogradov V. A., Kobigsky S. A., Petrov M. D.** Experimental investigation of kerosene fuel combustion in supersonic flow // J. Propul. Power. — 1995. — V. 11, N 1. — P. 130–134.
9. **Ortwerh P., Vinogradov V., Grin V., Mathur A., Goldfeld M., Starov A.** Experimental and numerical investigation of hydrogen and ethylene combustion in a Mach 3–5 channel with a single injector // AIAA Paper 96-3245. — 1996. — (7th Intern. Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conf., 1996).
10. **Алифанов О. М.** Обратные задачи теплопроводности. — М.: Машиностроение, 1988.
11. **Гук В. Ф.** Экономичный метод решения квазилинейного уравнения параболического типа в прямоугольнике // Программное обеспечение ЭВМ Мир-1 и Мир-2. — Киев, 1976. — Т. 3. — С. 192–195.

*Поступила в редакцию 7/IX 2014 г.,  
в окончательном варианте — 29/IV 2015 г.*