

УДК 533.6.011.5;536.46

# РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС И СТАБИЛИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА В МОДЕЛИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ ПОТОКА НА ВХОДЕ

В. А. Виноградов<sup>1</sup>, Ю. М. Шихман<sup>1</sup>, М. А. Гольдфельд<sup>2</sup>, А. В. Старов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, 111116 Москва

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск  
starov@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования рабочего процесса в модели прямоточной камеры сгорания, работающей на подогретом керосине со сверхзвуковым потоком воздуха на входе с числами Маха 3 и 3.5. Испытания проводились в импульсной трубе по схеме присоединенного воздухопровода при полных температурах  $2350 \div 3250$  К и давлениях  $3.2 \div 12.0$  МПа. Получены данные по условиям воспламенения и эффективности горения керосина. Показана принципиальная возможность использования критерия Озавы и его модификации для описания области устойчивого горения керосиновоздушной смеси в канале со стабилизаторами в виде ниш и уступов, обтекаемых существенно трехмерным потоком.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, воспламенение, керосин, рабочий процесс, стабилизация.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно достаточно большое количество исследований, посвященных анализу и обобщению данных по стабилизации горения водорода и углеводородных топлив. Степень успешности предсказания стабилизации горения существенно зависит от выбора модели течения и полноты параметров (условий), учитываемых в модели. Поэтому предложено множество различных эмпирических соотношений для определения границ устойчивого горения, которые базируются на сопоставлении характерных времен процессов смешения и горения [1]. Обзор исследований сверхзвуковых камер сгорания (КС) представлен в [2, 3]. В качестве примера можно назвать работу [4], в которой предложено обобщение данных по стабилизации горения водорода в камерах сгорания с нишевым стабилизатором при сверхзвуковой скорости потока на входе. Опытные данные для этого обобщения получены в широком диапазоне параметров воздушного потока, коэффициентов избытка топлива  $\phi$  и геометрических размеров ниши:  $M = 2 \div 3$ ,  $T_{t,a} = 800 \div 1400$  К,  $P = 7 \div 100$  кПа, длина ниши  $L = 20 \div 70$  мм и отношение расстояния между струйными форсунками, расположенными перед нишей, к диа-

метру этих форсунок  $s/d = 3 \div 8$ . На основе анализа полученных результатов был определен критерий стабилизации горения водорода:

$$K_s(1/\phi_{rz}) = U_a / (P_{rz}^{1.45} T_{t,a}^2 L), \quad (1)$$

где  $\phi_{rz}$  — коэффициент избытка топлива в рециркуляционной зоне ниши,  $U_a$  и  $T_{t,a}$  — скорость и температура торможения набегающего потока,  $P_{rz}$  — давление в полости ниши,  $L$  — характерный размер (в данном случае — длина) нишевого стабилизатора. По мере накопления экспериментальных данных этот критерий стабилизации горения модифицировался и уточнялся [5, 6].

Тем не менее при выборе критериев стабилизации не удается строго учесть все особенности процесса, влияющие на стабилизацию горения. Именно с этим связана необходимость проверки многочисленных критериев стабилизации горения и невозможность априорного распространения критериев для стабилизации горения в водородных КС на стабилизацию углеводородных пламен.

Для углеводородных топлив (газообразные октан и пропан, испаренный керосин) в работе [7] на основе экспериментальных и расчетных исследований различных стабилизаторов предложен критерий

$$SP^* = \left( \frac{d}{d_e} \right) k_{eff} \frac{U_a}{2h_s} \frac{14.7}{P_s} \left( \frac{10}{T_s} \right)^{1.5}, \quad (2)$$

основанный на соотношении из работы [8], описывающем пределы устойчивого стабилизированного горения при дозвуковых скоростях потока. Здесь  $d/d_e$  — корреляционный параметр, зависящий от конфигурации стабилизатора,  $U_a$  — скорость внешнего потока перед или над стабилизатором,  $h_s$  — характерный размер стабилизатора (высота уступа или глубина ниши),  $P_s$  и  $T_s$  — давление и температура топливоздушнoй смеси в отрывной зоне стабилизатора,  $k_{eff}$  — эмпирический коэффициент, характеризующий эффективность смещения топливоздушнoй смеси в рециркуляционной зоне стабилизатора.

Вместе с тем было показано, что соотношение (2) можно использовать для двумерной конфигурации, поскольку оно включает дополнительно такие важные особенности стабилизации, как массообмен, турбулентность, газодинамические параметры рециркуляционной зоны и ее геометрию.

В [9, 10] были проведены эксперименты по горению подогретого до  $\approx 570$  К керосина в модельной камере сгорания с переменной по длине площадью поперечного сечения и сверхзвуковым воздушным потоком с числами Маха  $M_a = 3$  и  $3.5$  на входе. Были исследованы некоторые схемы стабилизации горения керосина в отрывных зонах за донными торцами клинообразных инжекторов, в нишах и за уступами, однако проблема предсказания их стабилизирующих свойств не рассматривалась. Последовательное расположение ниш и обратных уступов приводило к образованию интенсивных вихрей, которые способствовали усилению смещения топлива с воздухом и, кроме того, локальному повышению давления и температуры в сверхзвуковом потоке. При анализе этих экспериментальных данных были определены эффективность горения и диапазоны параметров потока на входе в канал, в пределах которых осуществлялось самовоспламенение керосина и реализовывался процесс устойчивого горения.

Цель настоящей работы — проанализировать полученные экспериментальные данные по воспламенению и горению подогретого керосина и выявить возможности и эффективность подходов, использованных в [11] для определения устойчивого горения углеводородного топлива при анализе двумерных КС со сверхзвуковыми скоростями потока на входе.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Испытания КС проводились в режиме присоединенного воздухопровода с использованием в качестве источника высокоэнтальпийного воздуха разрядной форкамеры импульсной трубы ИТ-302М ИТПМ СО РАН [12]. Применение второй (дресселирующей) форкамеры позволяет получать необходимый уровень давления в модели камеры сгорания. Ко второй форкамере подсоединялись сменные плоские профилированные сопла с сечением выхода  $50 \times 100$  мм, обеспечивающие получение потока с числами Маха  $2 \div 5.8$ . Между соплом и моделью камеры сгорания располагалась успокоительная секция постоянного поперечного сечения для выравнивания потока перед камерой сгорания. Схема тракта модели КС с вариантами подачи топлива приведена на рис. 1.

Инжекторная секция состояла из четырех клиновидных инжекторов с соотношением сторон  $h/b = 1.0$  (см. рис. 1). Количество, форма и распределение инжекторов выбраны на основе данных [13] по эффективности смесеобразования водорода и углеводородов в канале постоянной площади с единичным клиновидным инжектором.

В каждом инжекторе устанавливались две центробежные форсунки на торцевой поверхности вблизи верхней кромки для подачи топлива в ядро потока под углом  $10^\circ$ . Для 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. Помимо основной подачи керосина через инжекторы в яд-

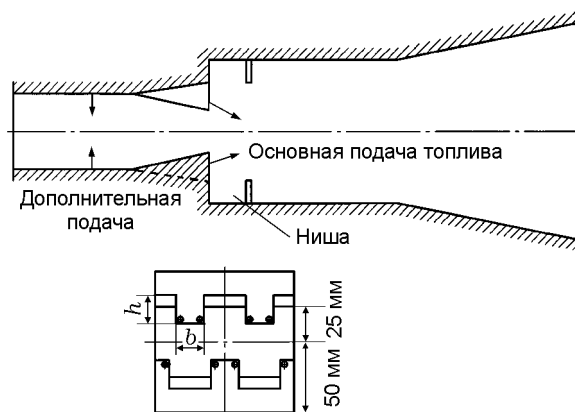


Рис. 1. Схема тракта модели КС с вариантами подачи топлива и стабилизаторов горения

ро потока, предусмотрен также дополнительный впрыск части керосина со стенки успокоительной секции перпендикулярно потоку через 5 струйных форсунок, расположенных по одной перед каждым клинообразным выступом.

Канал КС за инжекторами состоит из секции постоянного сечения  $100 \times 100$  мм, длиной 365 мм и из секции длиной 390 мм, расширяющейся в вертикальной плоскости так, что на выходе площадь поперечного сечения возрастает в 1.8 раза.

На расстоянии 30 мм от инжекторов вниз по потоку на верхней и нижней стенках КС устанавливались две вертикальные вставки высотой 17 мм и толщиной 5 мм, образующие два нишевых стабилизатора на верхней и нижней стенках канала (см. рис. 1). В пусках без дополнительной подачи топлива стабилизация горения осуществлялась за счет последовательной комбинации нишевого стабилизатора и обратного уступа. В пусках с дополнительной подачей топлива вставки за торцами клинообразных выступов отсутствовали и КС работала без нишевых стабилизаторов.

Параметры воздушного потока на входе в КС: числа Маха  $M_a = 3$  и 3.5, температура и давление торможения  $T_{t,a} = 2350 \div 3250$  К и  $P_{t,a} = 3.2 \div 12.0$  МПа. Керосин ( $\phi = 0.4 \div 3.4$ ) нагревался в специальном баке топливной системы до температур  $T_f = 510 \div 570$  К при  $P_f = 5 \div 9.3$  МПа. Для подачи топлива в камеру сгорания применялась вытеснительная система. В качестве поддавливающего газа использовался азот, чтобы исключить насыщение керосина кислородом воздуха.

Опыты проводили с холодным и подогретым керосином. В топливной системе после нагрева керосин оставался жидким, а его распыление и испарение происходили при впрыске в КС при истечении из форсунок. Выяснилось, что холодный керосин воспламенялся не всегда [9]. Поэтому основная серия экспериментов была проведена с горячим керосином.

В испытаниях измеряли параметры торможения в первой и второй форкамерах установки, распределения статического давления и тепловых потоков вдоль плоскости симметрии (включая параметры в успокоительной секции), полное давление в 7 точках гребенкой насадков полного напора в выходном сечении КС, давление и температуру в системе топливоподачи. В общей сложности использовалось 112 измерительных каналов [14].

По перечисленным выше данным в различных сечениях КС, от входного до выходного, совпадающих, как правило, с местами расположения замеров статического давления на стенке, были рассчитаны средние параметры потока и параметры, характеризующие качество рабочего процесса и эффективность работы камеры: коэффициент полноты сгорания топлива, коэффициент потерь полного давления, тепловые потери в стенке тракта и др. Коэффициент полноты сгорания определялся в энергетическом виде из уравнения энергии потока, записанного через полные энтальпии (физическая и химическая энергия) рабочих тел. Расчет параметров рабочего процесса проводился в одномерном приближении по методике ЦИАМ, верифицированной по данным стендовых и летных испытаний экспериментальных водородных и углеводородных высокоскоростных прямоточных двигателей [15].

В рамках проведенных исследований было выполнено 50 пусков. В таблице приведены характерные режимы испытаний для некоторых пусков, которые дают представление об условиях и диапазонах параметров потока. Здесь  $M_a$  — число Маха на входе в КС,  $P_w$  — статическое давление на входе в КС (в конце успокоительной секции),  $P_{t,a}$  — полное давление во второй форкамере установки (перед соплом),  $T_{t,a}$  — полная температура,  $\phi_m$  — коэффициент избытка топлива основной подачи (через инжекторы),  $\phi_{add}$  — коэффициент избытка топлива дополнительной подачи (струйные форсунки перед инжекторами).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА

Прежде всего, необходимо отметить, что в отличие от простых двумерных конфигураций стабилизаторов, рассмотренных в работах [7, 8, 11], стабилизаторы испытанной модели камеры сгорания имеют сложную геометрическую форму, в результате чего реализуется трехмерная структура течения при их обтекании.

Параметры потока отличаются высоким уровнем неравномерности как в поперечном сечении, так и по длине канала. Поэтому для определения зависимости  $SP^*(\phi)$  необходимо использовать осредненные значения параметров потока, полученные при обработке экспериментальных данных. Еще одним сильным

Условия испытаний модели КС с подогретым керосином

Номер пуска	$M_a$	Подача керосина	$P_w$ , кПа	$P_{t,a}$ , МПа	$T_{t,a}$ , К	$\phi_m / \phi_{add}$
189	3.5	Нет	88	6.0	2970	—
191	3.5	Есть	211	12.0	2910	0.41 ÷ 1.81 / —
195	3.5	—//—	180	10.2	2710	0.69 ÷ 2.32 / —
212	3	Нет	193	4.1	2670	—
215	3	Есть	187	4.5	3010	0.88 ÷ 1.78 / —
216*	3	—//—	188	4.6	2920	0.77 ÷ 1.04 / —
217	3	—//—	188	4.6	2620	0.81 ÷ 1.52 / —
219*	3	—//—	188	4.7	2600	0.88 ÷ 1.04 / —
220	3	—//—	195	5.3	2350	0.74 ÷ 1.36 / —
222*	3	—//—	156	4.2	3250	1.04 ÷ 1.51 / —
224*	3	—//—	125	3.2	2500	1.05 ÷ 1.35 / —
227*	3.5	—//—	185	11.4	2810	1.52 ÷ 3.40 / —
244**	3	—//—	225	5.7	2760	0.65 ÷ 2.00 / 0.17 ÷ 0.54
245**	3	Нет	200	5.1	3010	—

Примечание. \*Пуски с мультипликатором давления, \*\*без нишевых стабилизаторов, в четвертой — шестой графах даны максимальные значения параметров в пуске, в последней графе — для  $\tau = 10 \div 70$  мс.

допущением, сделанным при анализе результатов, является использование среднемассовых значений коэффициента избытка топлива  $\phi$ , которые могут изменяться за время одного пуска. Однако локальные значения  $\phi$  в потоке и в отрывных зонах стабилизатора сложной формы могут изменяться еще больше и тем самым приводить к отличиям одномерных представлений от реальной структуры и параметров потока в окрестности стабилизатора. Вместе с тем использование быстродействующей системы сбора данных с временным разрешением не хуже 3 мкс на каждый измерительный канал позволило установить, что процесс воспламенения и горения керосина был квазистационарным в течение короткого временного интервала. Таким образом, в процессе одного пуска можно оценить влияние изменения коэффициента избытка топлива на устойчивость горения.

Использование результатов определения зависимости  $SP^*(\phi)$  на основании средних значений параметров потока и коэффициента избытка топлива следует относить к конкретному каналу камеры сгорания и конкретной конфигурации стабилизатора, поскольку неравномерность параметров потока и неоднородность

горения в канале существенно зависят от его геометрии и условий на входе.

Анализ полученных данных по горению керосина в модели КС при условиях течения, приведенных в таблице, показал:

1) при  $M_a = 3$  и 3.5 основное влияние на эффективность горения керосина, которая характеризуется коэффициентом полноты сгорания топлива в КС ( $\eta_c$ ), оказывает коэффициент избытка топлива  $\phi$ . Зависимость  $\eta_c = f(\phi)$  имеет типичный для диффузионного горения вид: при обогащении топливоздушных смесей вплоть до стехиометрии значения  $\eta_c$  уменьшаются в области  $\phi < 1$  и увеличиваются в области  $\phi > 1$  (рис. 2);

2) в опытах с нишевыми стабилизаторами значения  $\eta_c$ , полученные при  $M_a = 3$  и 3.5, практически не зависят от  $M_a$ , но зависят от полной температуры и давления воздушного потока;

3) при  $M_a = 3$  и суммарном коэффициенте избытка горючего  $\phi_\Sigma = 0.85 \div 2$  дополнительный впрыск топлива (20 % от общего количества) в пограничный слой перед клиновидными инжекторами в модели без нишевых стабилизаторов приводит к уменьшению  $\eta_c$  на  $\approx 25 \div 30$  % по сравнению с данными для камеры со ста-

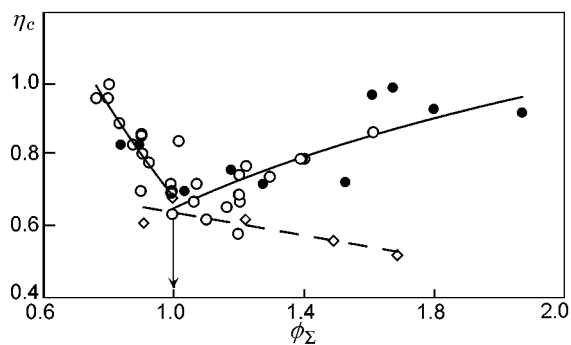


Рис. 2. Полнота сгорания керосина:

светлые символы —  $M_a = 3$ , темные —  $M_a = 3.5$ ;  $\circ$ ,  $\bullet$  — без дополнительной инъекции топлива,  $\diamond$  — с дополнительной подачей 20 % топлива в пограничный слой перед инжекторами, линии — аппроксимация данных

биллизаторами, но без дополнительной подачи топлива.

Важным условием для достоверного анализа газодинамических процессов в камере сгорания при испытаниях в импульсной трубе было условие квазистационарности течения в стендовом сопле и в канале модельной КС. Условие квазистационарности для входного сечения КС, в котором измеряются статические давления за стендовым соплом  $P_{w,1}$  и  $P_{w,2}$  (нижняя и верхняя стенки), можно, например, с точностью до неучтенного влияния температуры на термодинамические параметры воздуха и теплоотвод в стенки сопла записать в виде соотношения, полученного из уравнения расхода  $P_{w,i} = K_G G_a \sqrt{T_{t,a}}$ , где  $K_G$  — слабая функция  $T_{t,a}$ , и тогда  $P_{w,i}$  ( $i = 1, 2$ ) есть функция параметра  $G_a \sqrt{T_{t,a}}$ , близкая к линейной. В опытах с горением условием квазистационарности для других сечений тракта будет постоянство или слабое изменение по времени безразмерного статического давления в камере  $P/P_{w,i}$ .

Это же условие необходимо и для анализа процессов стабилизации и горения. При этом расход и температура торможения воздуха в ресивере стендового сопла, а также статические давления в тракте КС должны быть связаны стационарными уравнениями газовой динамики, например одномерными [16]. Подобную проверку условий квазистационарности во всем тракте камеры целесообразно проводить для режимов без подачи топлива, а в случае режимов с горением — только для параметров потока перед камерой, т. е. за стендовым соплом на участке изолятора, где нет влияния

горения.

Анализ результатов опытов с КС показал, что условие квазистационарности реализуется через 10 ÷ 15 мс после начала работы стенда, а процессы горения в КС начинаются еще до установления в ней квазистационарных режимов течения. Достаточно достоверно это условие квазистационарности характеризует линейная зависимость статического давления на входе в модель КС (или на выходе из сопла) от параметра  $G_a \sqrt{T_{t,a}}$ , которая была получена для большинства пусков.

На рис. 3 представлены примеры распределения статического давления на нижней и верхней стенках КС (отнесенные к давлению за стендовым соплом), свидетельствующие о начале горения примерно через 10 ÷ 12 мс после запуска установки. Подача топлива осуществлялась одновременно с запуском установки и синхронизировалась так, что расчетный режим достигался одновременно с заполнением второй форкамеры. Поэтому анализировались процессы горения, происходившие после 15 мс с момента начала работы установки ( $\tau = 0$ ). Увеличенное давление, обусловленное горением, оставалось примерно постоянным в интервале  $\tau = 15 \div 60$  мс. На рисунке показано также изменение коэффициента избытка топлива.

Представляет интерес сопоставление давлений  $P$  и тепловых потоков  $q$  в отрывных зо-

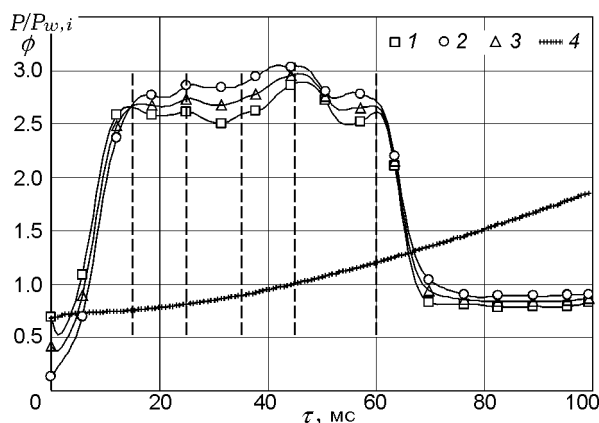


Рис. 3. Пример изменения относительного статического давления на стенках КС (пуск 220):

1 — давление на нижней стенке, 2 — давление на верхней стенке, 3 — среднее значение давления, 4 — коэффициент избытка топлива, штриховые линии — моменты времени, в которых значения параметров приняты для обработки

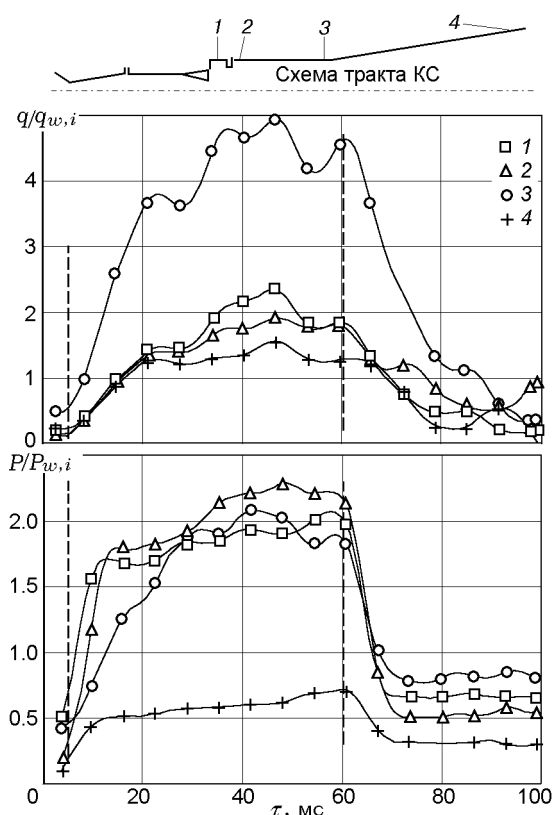


Рис. 4. Относительные тепловые потоки и давление в характерных сечениях тракта КС (пуск 220):

1 — дно ниши, 2 — рециркуляционная зона за уступом, 3 — конец участка с постоянной площадью поперечного сечения, 4 — конец расширяющегося участка, штриховые линии — моменты воспламенения и срыва

нах стабилизаторов (ниши и уступы) и в характерных сечениях КС. На рис. 4 показаны типичные изменения  $P$  и  $q$  во времени (пуск 220 с горением керосина) для четырех характерных сечений: сечение 1 — с параметрами отрывной зоны на дне ниши; 2 — с параметрами отрывной зоны за уступом; 3 — с параметрами потока в конце первого участка КС постоянной площади; 4 — с параметрами потока в конце второго расширяющегося участка КС.

Отметим ряд свойств рабочего процесса в модели КС.

Во-первых, распределения  $P(x)$  и  $q(x)$  удовлетворительно согласуются друг с другом. В отрывных зонах стабилизаторов и по всему тракту КС повышение  $P$  при горении сопровождается увеличением  $q$ , а прекращение го-

рения приводит к уменьшению  $P$  и  $q$ . Эти результаты типичны для всех пусков, и принципиальных отклонений от этих закономерностей не наблюдалось, что не противоречит известным экспериментальным данным. Полученные зависимости позволяют с приемлемой точностью определить начало процесса воспламенения или срыва горения по быстрому росту давления (теплого потока) или резкому падению.

Во-вторых, из полученных данных однозначно не выделяется какая-либо область в тракте КС, в которой прежде всего проявляются начало или прекращение горения. Сравнение распределений  $P$  и  $q$  (см. рис. 4) свидетельствует о том, что оба стабилизатора работают как устройства воспламенения при розжиге КС. При срыве горения на стабилизаторах резкое падение давления и тепловых потоков происходит практически одновременно по всему тракту. Имея в виду малый градиент уменьшения  $q$  в отрывных зонах стабилизаторов после прекращения горения в КС, которое идентифицируется по резкому уменьшению давления по всему тракту, можно, по-видимому, утверждать, что стабилизаторы переходят сначала (в первые  $5 \div 10$  мс после срыва пламени) в режим остаточных пламен с сохранением в них очагов горения, но без распространения пламени в основной поток, и только затем в режим полного прекращения горения.

Следует особо подчеркнуть, что анализ выявил определяющий характер закономерностей горения керосина в широком диапазоне

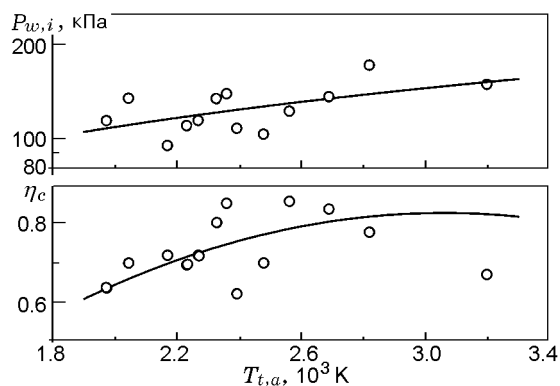


Рис. 5. Зависимость полноты сгорания керосина в КС с нишевыми стабилизаторами от температуры торможения воздушного потока на входе при слабом изменении давления ( $\phi = 0.9 \div 1.1$ ,  $M_a = 3.0$ , без дополнительной подачи керосина)

суммарных коэффициентов избытка топлива  $\phi_\Sigma = 0.75 \div 2.1$ . Об этом свидетельствует характерное уменьшение коэффициента полноты сгорания от уровня  $\eta_c = 0.95 \div 1.0$  при  $\phi_\Sigma = 0.75 \div 0.8$  до  $\eta_c = 0.6 \div 0.8$  при  $\phi_\Sigma \approx 1.0$  с дальнейшим повышением  $\eta_c$  до уровня  $0.9 \div 1.0$  при  $\phi_\Sigma = 1.6 \div 2.1$  (см. рис. 2). Выявлено также некоторое влияние температуры и давления воздуха на величину  $\eta_c$ . На рис. 5 приведены значения  $P_{w,i}$  ( $i = 1, 2$ ) и  $\eta_c$  для режимов в стехиометрической области  $\phi_\Sigma = 0.9 \div 1.1$  в широком диапазоне температур  $T_{t,a} = 2000 \div 3200$  К. Отметим, что снижение темпа роста  $\eta_c$  по мере увеличения  $T_{t,a}$  также можно объяснить как кинетическими эффектами (уменьшением времени пребывания топлива в зоне горения вследствие роста скорости потока при  $M_a = \text{const}$ ), так и особенностями механизмов смешения, т. е. влияние кинетических и диффузионных факторов взаимосвязано.

Таким образом, представленная на рис. 2 зависимость  $\eta_c(\phi_\Sigma)$  характеризует горение керосина в модели КС, которое определяется в основном закономерностями диффузионного смешения и свидетельствует о свойственном такой модели начале горения топливной смеси вблизи места впрыска. Следовательно, этот результат подтверждает сделанный ранее вывод о стабилизации горения керосина на нишах и уступах, расположенных на верхней и нижней стенках камеры сгорания. Поэтому представляется важным и необходимым анализ работы этих стабилизаторов для определения критерия стабилизации, в частности, на основе подхода, развитого в работах [7, 11] с использованием критерия Озавы [8].

### ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА

При обобщении экспериментальных данных по стабилизации горения керосина в модельной КС по уравнению (2) следует иметь в виду:

— значение параметра  $d/d_e$ , зависящее от конфигурации стабилизатора, ранее было определено для простых (двумерных) схем стабилизаторов. Поэтому для модельной КС со сложной пространственной формой стабилизаторов оно не может строго соответствовать рекомендациям упомянутых работ. Тем не менее в данной работе принято значение  $d/d_e = 2$  — как для типичного нишевого стабилизатора;

— коэффициент  $k_{eff}$  для оценки эффективности смешения топливовоздушной смеси в рециркуляционной зоне стабилизатора принимался равным 1.0 (согласно [11]) для режимов устойчивого горения, и, как варианты, для предсрывных режимов принималось  $k_{eff} = 4$  и 16;

— характерный размер стабилизатора  $h_s$  принимался равным средней высоте передней стенки ниши в плоскости торцов клинообразных инжекторов,  $h_s = 0.025$  м, что также является упрощающим допущением для трехмерной формы стабилизаторов модели КС.

Так как локальные параметры керосинозвушной смеси и воздуха не измерялись и не определялись расчетным путем, с уверенностью говорить о локальных параметрах  $P$ ,  $T$  и  $\phi$ , при которых происходило воспламенение, невозможно. Можно лишь с большой вероятностью указать место воспламенения: оно располагается в области отрывного течения за уступами, образованными клиновидными инжекторами в случае канала без поперечных вставок, или в области пространственных ниш, образованных стенками торцов клинообразных инжекторов и вставок на нижней и верхней стенках канала (см. рис. 1). Поэтому наиболее достоверный анализ пределов стабилизации горения возможен только для условия квазистационарного потока и при параметрах срыва горения в канале.

С учетом этих замечаний расчеты параметра  $SP^*$  проводились для времени процесса более  $40 \div 50$  мс (непосредственно перед срывом горения) при следующих дополнительных допущениях:

— поскольку эффективность уступа как второго стабилизатора при горении в нише во многом определяется параметрами потока, вытекающего из ниши, то для ниши и уступа определяющие критерий  $SP^*$  параметры  $d/d_e$ ,  $k_{eff}$ ,  $U_a$ ,  $P_s$  и  $T_s$  близки. Поэтому принимались средние значения  $U_a$  и  $P_s$  по длине тракта КС от сечения перед нишей до сечения за уступом;

— температура  $T_s$  равна температуре воздуха, поступающего в полость ниши из пограничного слоя с температурой восстановления. Учитывался также, следуя [17], теплоотвод в стенки ниши по результатам измерения теплового потока в эксперименте.

Результаты расчета  $SP^*$  иллюстрирует рис. 6, на котором представлены данные проведенных нами опытов: темные кружки со-

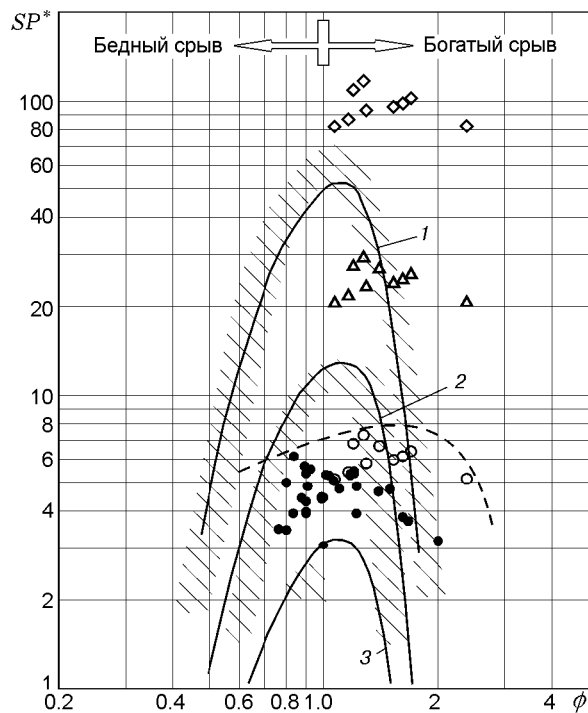


Рис. 6. Критерий стабилизации горения в КС с нишевыми стабилизаторами:

заштрихованные области и сплошные линии — критериальное обобщение [11]: 1 — гомогенный реактор,  $k_{eff} = 1$ , 2 — предварительно перемешанная топливоздушная смесь,  $k_{eff} = 4$ , 3 — впрыск топлива в отрывную зону стабилизатора,  $k_{eff} = 16$ ; данная работа: топливо — газифицированный керосин,  $k_{eff} = 1$  (○, ●), 4 (△), 16 (◇), штриховая линия — граница области стабилизации, полученная в настоящей работе

ответствуют режимам устойчивого горения с распространением пламени в основной поток, светлые — предсрывным режимам с горением, для которых дальнейшее уменьшение температуры и давления воздуха приводит к прекращению распространения пламени в основной поток и срыву горения в стабилизаторах. Штриховой линией показана граница области устойчивого горения в модели КС, полученная на основании данных настоящей работы.

На рис. 6 видно, что область устойчивой работы исследуемых стабилизаторов в условиях высокоскоростной КС занимает промежуточное положение между областью непосредственного впрыска в отрывную зону и областью для потоков с прединжекцией топлива перед зоной горения. Этот факт свидетельствует об удовлетворительной работе системы стабилизаторов, так как топливо подава-

лось с передней стенки ниши, что ближе к схеме с непосредственным впрыском в отрывную зону. При этом следует иметь в виду особенность работы нишевого стабилизатора КС: воспламенение топливной смеси осуществляется не только продуктами сгорания, вытекающими из полости ниши, но и в результате воздействия интенсивного замыкающего скачка уплотнения, возникающего при обтекании вертикальной задней стенки и распространяющегося в основной поток. Последнее обстоятельство требует, по-видимому, специального исследования, например, при непосредственном экспериментальном сравнении работы нишевых стабилизаторов с вертикальной и наклонной задними стенками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены испытания модельной камеры сгорания в импульсной трубе при числах Маха воздушного потока на входе в камеру  $Ma = 3$  и  $3.5$ , температурах и давлениях торможения  $T_{t,a} = 2350 \div 3250$  К и  $P_{t,a} = 3.2 \div 12.0$  МПа. Выполнено обобщение экспериментальных данных по стабилизированному горению керосина в модели КС с двумя типами стабилизаторов (ниша и обратный уступ), установленных в тракте прямоугольного сечения.

С учетом динамических особенностей работы импульсной трубы определение границ области срыва пламени в координатах  $(SP^*, \phi)$  выполнялось для квазистационарных предсрывных режимов горения. Сравнение полученных результатов с опубликованными данными показало принципиальную возможность использования критерия Озава для описания области устойчивого стабилизированного горения керосина в прямоточной камере с нишами и уступами, обтекаемыми существенно пространственным потоком. В то же время можно утверждать, что соответствие критерия  $SP^*$  области устойчивого горения является необходимым, но не достаточным условием реализации интенсивного горения в камере сгорания со сложной трехмерной структурой течения.

Кроме того, необходимы дополнительные эксперименты для определения зависимости эффективности рабочего процесса от параметров режима  $T_{t,a}$ ,  $P_{t,a}$  и  $\phi_{\Sigma}$  в КС с различными схемами подачи топлива.



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Баев В. К., Третьяков П. К.** Характерные времена горения топливовоздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 1968. — Т. 4, № 3. — С. 367–376.
2. **Ortwert P. J., Mathur A. B., Segal C., Mullagilli S., Owens M. G.** Combustion stability limits of hydrogen in a non-premixed, supersonic flow // Proc. of XIV Intern. Symp. on Air Breathing Engines. — ISABE-99-7235. — 1999.
3. **Driscoll J. F., Rasmussen C. C.** Correlation and analysis of blowout limits of flames in high-speed airflows // J. Propulsion and Power. — 2005. — V. 21, N 6. — P. 1035–1044.
4. **Strokin V. N., Grachev V. A.** Possible schemes of flameholding in hydrogen fueled scramjet combustors // Intern. Aerospace Congress, Moscow, 1997. — V. 1. — P. 630–633.
5. **Strokin V. N., Grachev V. A.** The peculiarities of hydrogen combustion in model scramjet combustors // Proc. of XIII Intern. Symp. on Air Breathing Engines. — ISABE-97-7053. — 1997. — V. 1. — P. 374–384.
6. **Segal C.** Flameholding in non-premixed supersonic flows // Paper in RTO-EN-AVT-116. — Von Kármán Institute, Belgium, 2004.
7. **Morrison C. Q., Campbell R. L., Edelman R. B.** Hydrocarbon fueled dual-mode ramjet/scramjet concept evaluation // Proc. of XI-II Intern. Symp. on Air Breathing Engines. — ISABE-97-7053. — 1997. — P. 348–356.
8. **Ozawa R. I.** Survey of basic data on flame stabilization and propagation for high speed combustion system // AFAPL-TR-70-81. — Jan. 1971.
9. **Goldfeld M. A., Starov A. V., Mathur A. B., Mishunin A. A.** Investigation of hydrocarbon fuels combustion in supersonic combustor // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, USA, 11–14 July 2004. — AIAA-2004-3487.
10. **Goldfeld M. A., Starov A. V., Timofeev K. Yu.** Features of ignition and stable combustion in supersonic combustor // Proc. of 6th European Symp. on Aerothermodynamics for Space Vehicles, Versailles, France, 3–6 November 2008.
11. **Morrison C. Q., Lyu H.-Y., Edelman R. B.** Fuel sensitivity studies based on a design system for high speed airbreathing combustors // Proc. of XIV Intern. Symp. on Air Breathing Engines. — ISABE-99-7235. — 1999.
12. **Пузырев Л. Н., Ярославцев М. И.** Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1990. — Вып. 5. — С. 135–140.
13. **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-96-3245. — 1996.
14. **Nestoulia R. V., Starov A. V., Shpilyuk A. N., et al.** Hardware and software for measurements of high-speed processes // Proc. of 8th Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk. — 1996. — V. 2. — P. 186–190.
15. **Ogorodnikov D. A., Vinogradov V. A., Shikhman Yu. M., Strokin V. N.** Design and research russian program of experimental hydrogen fueled dual mode scramjet: choice of conception and results of pre-flight tests // J. Propulsion and Power. — 2001. — V. 17, N 5. — P. 1041–1048.
16. **Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И.** Некоторые методические аспекты исследования газодинамических моделей с тепло-массоподводом в импульсной аэродинамической трубе // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 45–54.
17. **Грачев В. А., Острась С. В., Шихман Ю. М.** Об экспериментальной оценке коэффициента теплоотдачи в нишевом стабилизаторе пламени // Тр. науч. чтений, посвященных памяти пионеров космонавтики. — М., 1990. — С. 234–243.

Поступила в редакцию 5/V 2012 г.