

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

П. К. Третьяков, К. Бруно*

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

* Римский университет, Рим, Италия

Анализируются экспериментальные исследования по организации горения керосина в высокоэнтальпийном сверхзвуковом потоке воздуха. Применение промотирующих присадок, а также улучшение процессов распыла, испарения и смешения не всегда способствуют эффективному развитию горения. Показано, что существенное влияние на параметры воспламенения оказывает наличие процесса конверсии. Интенсивность выгорания может быть обеспечена добавлением водорода, при этом существенное значение имеет относительное расположение топливных инжекторов. Отмечается основополагающая роль волновых структур на протяженность зоны горения в канале. Приведено сравнение интегральных характеристик горения водорода и керосина.

Проблематичность применения жидких углеводородных топлив типа керосина для гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ГПВРД) обусловлена несколькими причинами. Одна из них связана с трудностями организации устойчивого процесса горения и эффективного сжигания керосина во всем диапазоне параметров ГПВРД. Традиционные способы стабилизации пламени не всегда эффективны из-за высокого уровня скоростей потока в камере сгорания и больших потерь импульса. По сравнению с водородом время подготовки жидкого углеводородного топлива для сжигания увеличивается за счет добавления процесса испарения и большого периода задержки воспламенения. Другой причиной является необходимость использования хладоресурса топлива для охлаждения наиболее теплонапряженных элементов двигателя и летательного аппарата. Тем не менее многие проблемы находят свое решение. Так, в некоторых программах (см., например, [1]) рассматривается возможность использования части керосина для охлаждения при его термическом разложении с применением катализаторов. Этот способ увеличивает хладоресурс, так как процесс конверсии идет с поглощением тепла и, с другой стороны, образующийся синтез — газ, содержащий водород в смеси с керосином — может привести к улучшению характеристик воспламенения и горения в камере ГПВРД. Известно, что присутствие водорода существенно влияет на скорость горения продуктов конвер-

сии пропана [2] и на расширение концентрационных пределов воспламенения керосина [3].

Альтернативными являются известные схемы двухстадийного сжигания керосина [4], в которых первичное горение (в газогенераторе) идет при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 0,35$. При этом с ростом числа Маха полета доля керосина, подаваемого во внутренний контур, может уменьшаться и при больших температурах воздуха, когда условия воспламенения улучшаются, газогенератор используется как пилотное устройство.

Уменьшение периода задержки воспламенения возможно также при подмешивании к керосину определенных присадок. Примером промотирующих добавок могут быть нитраты органических соединений. В ИТПМ СО РАН был выполнен цикл экспериментальных исследований периода задержки воспламенения керосина нескольких типов (Т-А, Т-15, КО-20) как в чистом виде, так и с добавлением нитратов жирных спиртов (НЖС), циклогексилнитрата (ЦГН) и изопропилнитрата (ИПН). Опыты проводили в ударной трубе при давлении торможения $p_0 = 2,25$ МПа, температуре торможения $T_0 = 1000, 1240, 1500$ К и в бомбе постоянного объема в диапазоне $T_0 = 500 \div 1100$ К при $p_0 = 1,7$ и $2,5$ МПа [5]. Объемная концентрация присадок составляла $C = 0 \div 30$ %. В результате экспериментов установлено, что промотирующий эффект возрастает с понижением температуры и увеличением процентного содержания промотора в топливе. В низкотемпе-

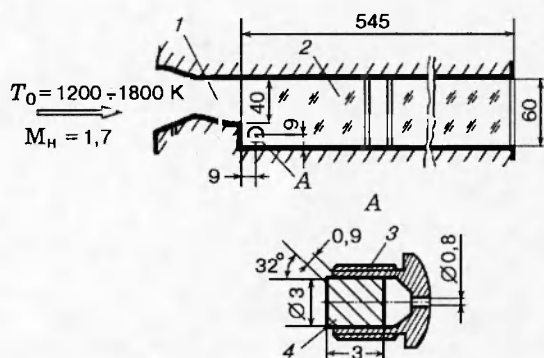


Рис. 1. Схема канала:

1 — сопло, 2 — кварцевые окна; А — топливная форсунка (шнеко-центробежная); 3 — корпус форсунки, 4 — четырехзаходный шнек

ратурном диапазоне промотирующее действие присадки сводится к повышению температуры смеси в зоне реакции за счет ускоренного окисления малых порций топлива. При высокой температуре отмечается ослабление промотирующего эффекта вплоть до небольшого увеличения периода задержки воспламенения при больших добавках промотора (30%). Механизм этого явления требует своего объяснения. Возможно, что определяющим фактором является динамика развития струи топлива (в бомбе) и динамика разрушения капли, ее распыления и испарения (в ударной трубе). Высокий уровень начальных температур приводит к возникновению предпламенных реакций в процессе развития смешения топлива с окислителем. На фоне уменьшения периода задержки воспламенения основного топлива роль присадок становится менее эффективной.

Аналогичные результаты были получены при исследовании самовоспламенения ме-

тановоздушных смесей и $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ при добавлении перекиси водорода ($\text{H}_2\text{O}_2 = 5 \div 10\% \text{CH}_4$) [6]. Достоверность выбранной кинетической схемы процесса подтверждена хорошим соответствием результатов расчета периода индукции и экспериментальных данных, полученных в ударных трубах. Как следует из [6], промотирующий эффект (для смесей $\text{CH}_4/\text{воздух}$) наблюдается в области температур $1200 \div 1850 \text{ K}$ и объясняется каталитическим влиянием на отдельные стадии химических реакций. С увеличением начальной температуры смеси происходит уменьшение влияния H_2O_2 на снижение периода задержки воспламенения.

Был поставлен прямой эксперимент по самовоспламенению керосина в потоке подогретого воздуха, поступающего в канал с внезапным расширением. Схема канала приведена на рис. 1. Несимметричный относительно оси канала сопловый блок формировал поток с числом Маха $M_n = 1,7$. Канал размером $40 \times 60 \times 545 \text{ мм}$ снабжен кварцевыми стеклами для оптических наблюдений. За уступом (в застойной зоне) на боковой поверхности была установлена шнеко-центробежная форсунка. В застойной зоне была также расположена хромель-алюмелевая термопара. Температура воздуха менялась в диапазоне $1200 \div 1850 \text{ K}$. Топливо в количестве $2,5 \div 8,5 \text{ г/с}$ подавалось в течение $1 \div 5 \text{ с}$. Опыты проводились со смесями: Т-А; Т-15; Т-15+(5 ÷ 30)% НЖС; Т-15+30% ЦГН; КО-20+30% НЖС; КО-20+20% ЦГН. Во всех опытах в пределах длины канала воспламенения не наблюдалось. При некоторых расходах замечено слабое голубоватое свечение. Температура за уступом уменьшалась на $400 \div 500 \text{ K}$, статическое давление по длине канала практически не менялось. При повышении температуры воздуха до

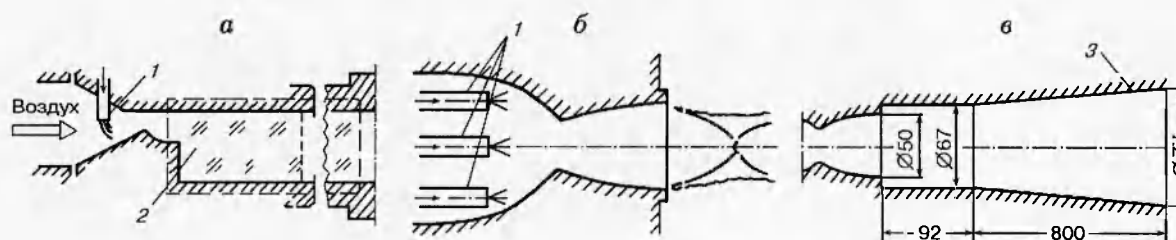


Рис. 2. Схемы организации горения керосина:

а — $M_n = 1,7$; б, в — $M_n = 2,2$; 1 — форсунки, 2 — окна, 3 — тонкостенный канал ($\delta = 1 \text{ мм}$)

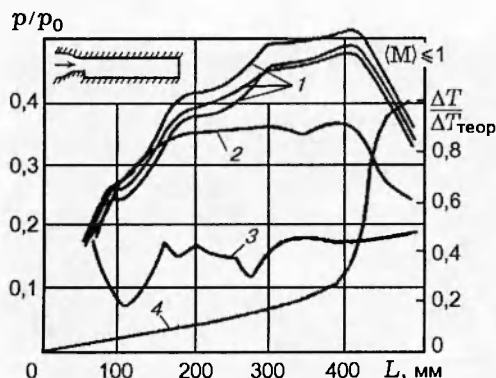


Рис. 3. Распределение давления при горении керосина в плоском канале (2) и доля выделившегося при горении тепла (4), $\Delta T_{\text{теор}} = 864 \text{ K}$:

1 — холодный поток: $\alpha = \infty$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $p_0 = 0,53 \div 0,67 \text{ МПа}$, канал задресселирован в выходном сечении на $20 \div 23 \%$; 2 — $\alpha = 2,25$, $T_0 = 1870 \text{ K}$, $p_0 = 0,53 \text{ МПа}$; 3 — $\alpha = \infty$, $T_0 = 1525 \text{ K}$, $p_0 = 0,54 \text{ МПа}$, канал не задресселирован

$\approx 2400 \text{ K}$ и впрыске бензина отмечено воспламенение вниз по потоку за уступом. Отрицательный результат, по-видимому, связан с малым временем пребывания топлива в канале, недостаточным для развития предпламенных процессов.

Определяющая роль предпламенных процессов, особенно испарения и смешения, может быть проиллюстрирована экспериментами, в которых подача керосина перенесена в дозвуковую часть сопла установки (рис. 2).

Грубая оценка времени пребывания капель аэрозоля керосина в сопле показала, что его достаточно для полного испарения и начала протекания предпламенных процессов ($\tau = 6 \div 7 \text{ мс}$). Впрыск керосина не вызвал изменения давления в форкамере (точность измерения $\pm 0,25 \%$), т. е. подвод массы компенсировался уменьшением температуры за счет испарения.

Процесс воспламенения керосина в канале регистрировался уже при низких температурах воздуха ($T_0 = 1200 \text{ K}$, рис. 3). Наблюдения свидетельствуют о развитии процесса горения в зависимости от коэффициента избытка воздуха α . Для одного из режимов приведено распределение параметров по длине канала. Как следует из рисунка, при $\alpha = 2,25$ процесс горения завершается полностью. В канале реализуется псевдоскачковый режим горения. Использование информации о распределении давления вдоль канала без горения (при дросселировании канала) и при горении позволило определить эффективность процесса. Примерно 25% керосина сгорает в сверхзвуковой части потока. Минимальное среднее значение числа Маха в канале равно $\langle M \rangle = 0,77$. В выходном сечении скорость потока увеличивается и достигает значения, соответствующего среднему числу Маха $\langle M \rangle = 1,0$. Наибольшее количество тепла выделяется на участке длиной 100 мм от конца канала.

Для улучшения предпламенной подготовки керосина (и в частности, смешения) перед соплом было установлено три топливных фор-

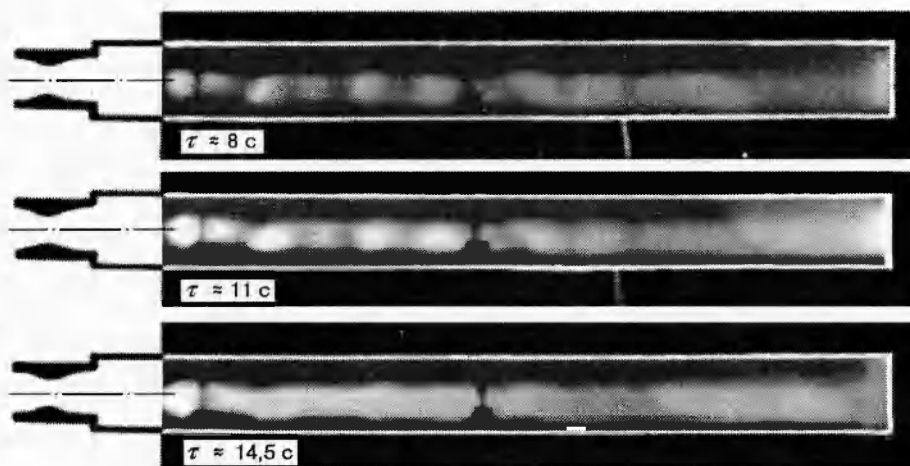


Рис. 4. Иллюстрации прогрева стенки канала:

τ — время от начала подачи керосина

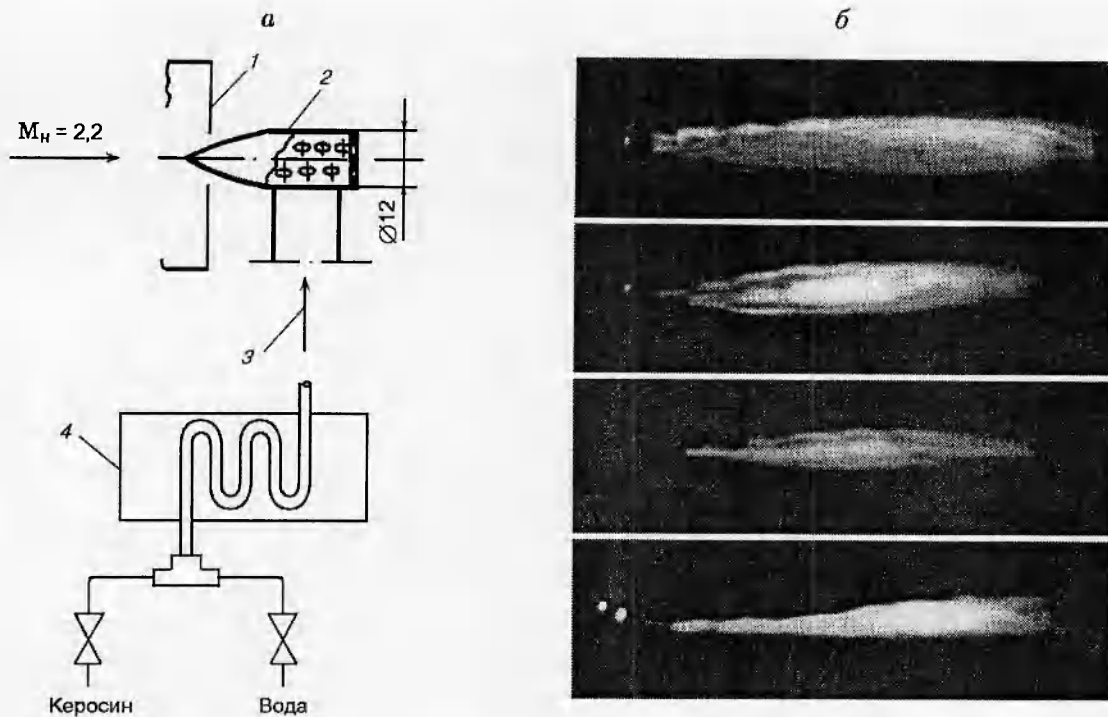


Рис. 5. Схема экспериментов с горением продуктов перегрева керосина (а) и фотографии факелов (б):

$T_0 = 2300$ К, $p_0 = 0,94$ МПа, расход керосина $G_k = 17,0$ г/с, температура керосина 920 К; 1 — сопло, 2 — инжектор, 3 — подвод топлива, 4 — омический подогреватель

сунки (см. рис. 2, б). Фотографии течения струи (в открытом потоке) показали, что после прохождения трансзвуковой и сверхзвуковой частей сопла топливоздушная смесь занимает приблизительно 70 % диаметра потока. Наблюдения в открытом потоке свидетельствуют о возможном начале процесса разложения керосина. Факел имеет ярко-желтый цвет. Догорание керосиновоздушной смеси (с той же схемой подачи) в тонкостенном стальном осесимметричном расширяющемся канале (см. рис. 2, в) иллюстрирует ряд последовательных фотографий, сделанных во время опытов (рис. 4). Наблюдаемое свечение стенки канала в какой-то степени отражает внутреннюю газодинамическую структуру. В этих опытах при $\alpha = 1,43$ ($M_n = 2,2$, $T_0 \approx 2000$ К) измерениями установлено общее увеличение давления на стенке, которое в большей части канала примерно в два раза превышало давление для случая без горения. Характер изменения давления свидетельствовал о слабом тепловыделении и невысокой полноте сгорания (оценка дает значение ≈ 30 %). Можно сделать вывод, что предвари-

тельное хорошее смешение керосина с воздухом не способствует интенсификации тепловыделения при $\alpha > 1,0$. Отсутствие локальных областей с $\alpha \approx 1,0$ и, следовательно, значительного локального теплоподвода является основной причиной плавного роста давления на стенке канала. Псевдоскачкового режима горения не возникает.

Определенная предпламенная подготовка керосина может быть осуществлена путем его нагрева при высоком давлении перед инъекцией в воздушный поток. Уровень перегрева может быть достаточно высоким для начала его разложения. Для этих целей был использован омический подогреватель мощностью несколько десятков киловатт, в котором керосин с расходом от 5 до 20 г/с подавался по трубе из нержавеющей стали, являющейся одновременно нагревательным элементом. Степень подогрева могла меняться (до 1100 К при давлении до 3,0 МПа), время пребывания керосина в подогревателе $0,5 \div 2$ с. Температура керосина могла изменяться плавно путем регулирования мощности. В процессе опытов контролирова-

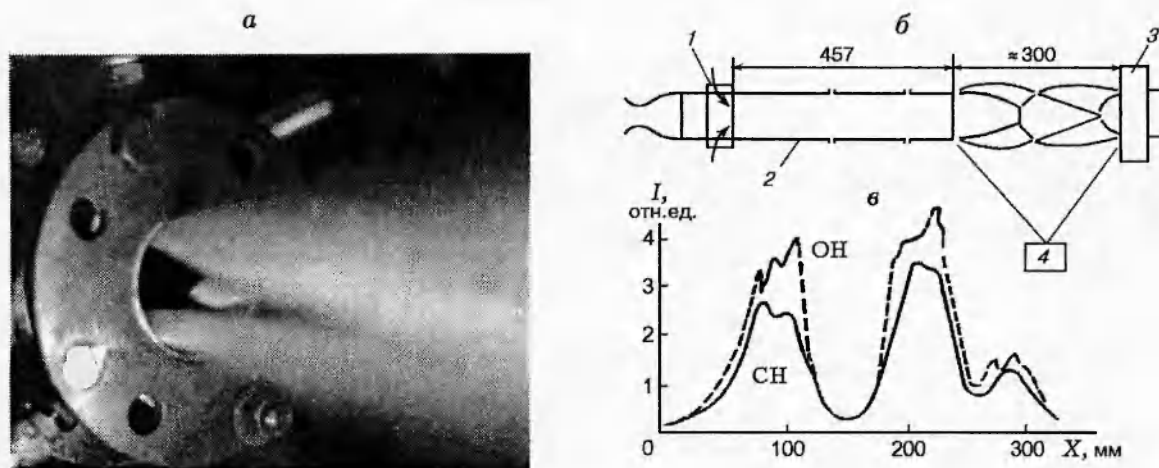


Рис. 6. Интенсивность излучения факела керосина:

a — инжекция воды в сверхзвуковой поток через три инжектора; *б* — схема канала постоянного сечения: 1 — секция впрыска керосина, 2 — канал, 3 — выхлоп, 4 — тепловизор; *в* — характеристики излучения факела керосина: I_{OH} , I_{CH} — относительная интенсивность излучения радикалов OH и CH соответственно

лась температура нагревательного элемента. Схема экспериментов с организацией горения в свободной воздушной струе при $M_n = 2,2$, $T_0 = 1500 \div 2300$ К и $p_0 = 0,5 \div 0,9$ МПа приведена на рис. 5. Для впрыска керосина в поток был применен инжектор с нормальной подачей топлива (веером струй) в поток воздуха. Этот способ подачи ранее использовался для стабилизации пламени при инжекции водорода. Срыв горения не происходил даже при низких температурах воздуха за счет образования мощной зоны отрыва.

При подаче жидкого керосина в области вниз по потоку от места инжекции наблюдается аэрозольное облако паров с четко выраженными границами. Визуализация течения происходила за счет подсвечивания электрической дугой, горящей в электродуговом подогревателе воздуха. По мере увеличения температуры керосина размеры аэрозольного облака сокращались. При температуре свыше 720 К происходило заметное изменение цвета инжестируемого газа (процесс фиксировался на бытовую видеокамеру). Самовоспламенения не было вплоть до температуры воздуха 2300 К. Как видно из рис. 5, вместо керосина можно подавать воду. Возможно осуществление режима с инжекцией смеси паров воды и керосина. Стабильное воспламенение топливной смеси произошло при $T_0 = 1500$ К, $p_0 = 0,56$ МПа (температура нагревательного элемента 1120 К, давление $p = 3$ МПа). При постепенном вы-

теснении керосином воды из нагревательного элемента происходят перестройка и погасание факела. Наблюдаемый процесс иллюстрируют фотографии, полученные с монитора и приведенные на рис. 5. Можно предположить, что наблюдаемый в экспериментах результат (воспламенение и устойчивое горение) связан с механизмом конверсии керосина в присутствии паров воды. К сожалению, не были проведены эксперименты по поиску оптимальных параметров для обеспечения устойчивого воспламенения и определения эффективности сгорания керосина.

Как уже отмечалось выше, одним из способов интенсификации горения керосина может быть комбинированная подача с химически более активным газом — водородом. Эта серия экспериментов была выполнена в осесимметричном канале. На первой стадии исследований отработывалась система инжекции жидкости. Впрыск осуществлялся через три центробежные форсунки (отверстия диаметром 2,7 мм), снабженные аэродинамическим щитком, выступающим на 12 мм в поток. Степень загромождения площади поперечного сечения составила $\approx 10,7\%$. На рис. 6 приведена фотография, иллюстрирующая инжекцию воды в сверхзвуковой поток. Там же приведена схема канала постоянного сечения, который набирался из трех секций длиной 200, 150 и 107 мм соответственно. Из распределения статического давления на стенке вдоль канала для режи-

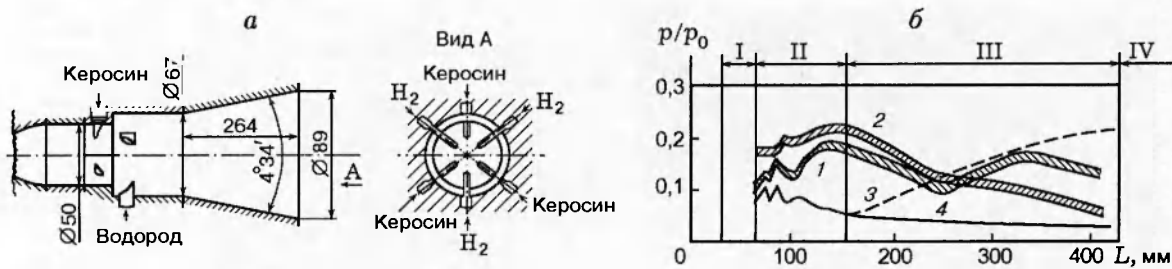


Рис. 7. Схема канала (а) и результаты испытаний (б) при инъекции керосина и водорода ($M_H = 2,2$, $p_0 = 0,7$ МПа):

I — секция подачи керосина, II — секция подачи водорода, III — конический участок, IV — цилиндрическая секция (диффузор); режимы испытаний: с горением: 1 — без диффузора, $T_0 = 1870 \div 1900$ К; 2 — с диффузором, $T_0 = 1970 \div 2000$ К; без горения: 3 — без диффузора, 4 — с диффузором

ма с параметрами $M_H = 2,2$, $p_0 = 0,73$ МПа, $T_0 = 1450$ К и $\alpha = 1,8$ следовало, что непосредственно перед впрыском керосина поток становился дозвуковым и процесс горения был устойчивым. Прямые измерения интенсивности излучения продуктов сгорания за пределами канала (см. рис. 6) свидетельствуют о формировании структуры, характерной для истечения нерасчетных струй. Наличие волновых структур подтверждается прямыми фотографиями.

Основной этап экспериментов по воспламенению и горению керосина с добавлением водорода был проведен на модели осесимметричного расширяющегося канала. Водород инжектировался через три щелевых пилона (рис. 7). На входе в топливоподающую секцию водорода имелся уступ 8,5 мм, наличие которого компенсировало загромождение потока пилонами и способствовало стабилизации пламени. Керосин, как описано выше, вводился через низконапорные центробежные форсунки с аэродинамическим щитком, способствующим увеличению дальности жидкой струи и интенсификации смешения. К секции постоянного сечения пристыковывался конический участок длиной 264 мм. В части опытов к коническому участку присоединялся участок постоянного сечения. Массовое соотношение расходов водорода и керосина равно $G_{H_2}/G_K \approx 0,22$. Этого было достаточно для стабильного воспламенения и поддержания горения керосина. Результаты измерения статического давления приведены на рис. 7. Суммарный коэффициент избытка воздуха равен $\alpha = 1,0$. При отсутствии цилиндрической секции (диффузора), в конической секции формируется псевдоскачок. При горении псевдоскачок перемещается навстречу потоку и фиксируется уступом (см. рис. 7, кри-

вая 1). Анализ распределения давления показал, что в участке постоянного сечения реализуется трансзвуковое течение с последующим ускорением потока в начале расширяющегося участка и догоранием во вновь формируемом течении типа псевдоскачка.

При наличии цилиндрического диффузора давления в форкамере достаточно для реализации сверхзвукового течения во всем канале при отсутствии подачи топлива (см. рис. 7, кривая 4), а распределение давления при горении (кривая 2) типично для таких конфигураций. Грубая оценка полноты сгорания дает значения $\eta \approx 0,6 \div 0,8$.

Изменение расположения инжекторов подачи водорода и керосина так, чтобы они находились друг за другом, существенно сказывается на протекании процесса горения. Процесс воспламенения затягивается, и горение начинается в расширяющемся участке.

Анализируя представленные результаты по горению керосина в свободной струе и в канале, следует отметить, что горение в канале реализуется при меньших начальных уровнях температуры потока воздуха. Этот факт, по видимому, связан с существенной ролью волновых структур.

Отмечая трудности организации эффективного сжигания керосина, необходимо выделить главный недостаток — большая длина зоны его горения по сравнению с водородом при одинаковых начальных условиях. Ниже приведены результаты анализа экспериментального исследования [7] горения водорода и керосина в канале. На основе разработанной одномерной методики расчета параметров течения для псевдоскачкового режима горения [8] были вычислены значения средних по длине зоны горе-

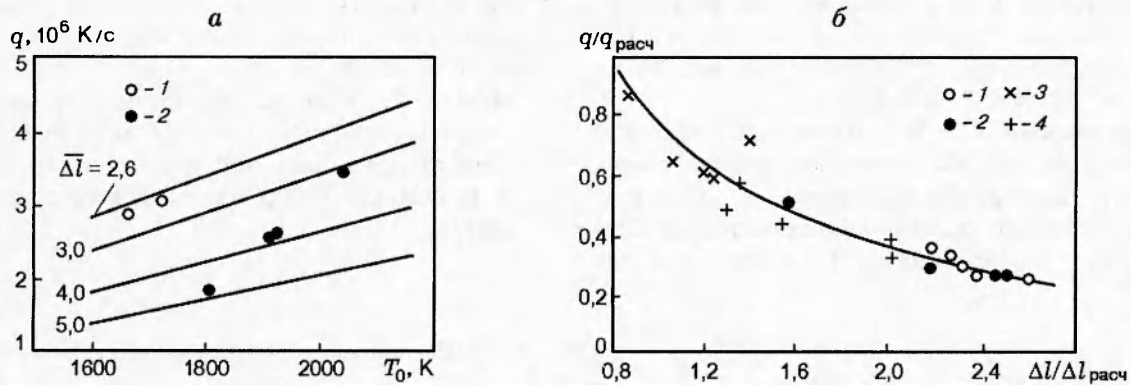


Рис. 8. Сравнительные интегральные характеристики горения водорода и керосина:

a — сопоставление скоростей тепловыделения при горении водорода и керосина; $M_n = 2,4$, $\theta = 1,33$ (относительный теплоподвод от сгорания топлива); 1 — водород, 2 — керосин (опыты [7]); b — взаимосвязь относительной средней скорости тепловыделения с относительной длиной зоны горения (эксперименты [9]), $T_0 = 1860 \div 2200 \text{ K}$; 1,2 — длина канала $L_k = 0,77 \text{ м}$, 3,4 — $L_k = 0,48 \text{ м}$; 1,3 — подача топлива со стенки, 2,4 — через пилонь

ния скоростей тепловыделения (q) в зависимости от начальной температуры для различных значений относительной длины зоны горения ($\bar{\Delta l} = \Delta l/D$, где D — диаметр канала) (рис. 8). Минимальное значение $\bar{\Delta l} = 2,6$ соответствует максимально возможной скорости горения для данного числа Маха. Там же нанесены точки, полученные при обработке экспериментальных данных. Из рис. 8, a следует, что скорость реакции горения водорода достаточна для реализации предельно малой длины зоны горения. Для сгорания керосина необходима значительно большая длина, особенно при невысоких уровнях начальных температур. Анализ опытов [9] по горению керосина при $M_n \approx 2,5$ и $T_0 = 1860 \div 2200 \text{ K}$ в канале диаметром 90 мм позволил установить взаимосвязь относительной средней скорости тепловыделения с относительной длиной зоны горения (см. рис. 8, b) для различных режимных ($\alpha = \text{var}$) и конструктивных (длина камеры, способ подачи) параметров. Здесь $q_{\text{расч}}$ — максимальная скорость тепловыделения, а $\Delta l_{\text{расч}}$ — минимальная длина зоны горения, что фактически соответствует горению водорода. Видно, что суммарные характеристики горения керосина существенно хуже, чем для водорода.

В заключение следует заметить, что проблема применения керосина для ГПВРД далека от завершения. Не все способы интенсификации горения хорошо изучены. Количество экспериментальных исследований не позволяет сделать однозначный вывод относительно ре-

комендаций для практического использования. Кроме того, применение тех или иных способов организации процесса горения тесно связано с назначением летательного аппарата.

Анализ экспериментальных исследований, приведенный в статье, выполнен в рамках программы научного сотрудничества между ИТПМ СО РАН (г. Новосибирск) и Университетом г. Рима «La Sapienza» (Италия).

ЛИТЕРАТУРА

1. Gurianov E. P., Harsha P. T. AJAX, New Directions in Hypersonic Technology // AIAA Paper. 1996. N 96-4609.
2. Кудринский В. З., Костюк В. Е., Шутенко И. А., Панов А. А. Экспериментальное исследование нормального распространения пламени в гомогенной смеси продуктов конверсии пропана с воздухом // Рабочие процессы в камерах сгорания ВРД. Казань: КАИ, 1987. С. 13–18.
3. Аннушкин Ю. М., Маслов Г. Ф. Эффективность горения водородо-керосинового топлива в прямоточном канале // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 30–32.
4. Волощенко О. В., Мещеряков Е. А., Острась В. Н., Серманов В. Н. Анализ особенностей процесса газогенерации и конверсии углеводородных топлив в двухрежимном ГПВРД // Труды ЦИАМ. 1995. № 2572. С. 3–19.
5. Бузуков А. А. Промотирующее влияние алкилнитратов на самовоспламенение керосино-воздушной смеси // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 3. С. 12–20.

6. Golovitchev V. I., Pilia M. L., Bruno C. Auto-ignition of methane mixtures: The effect of hydrogen peroxide // J. Propulsion and Power. 1996. V. 12, N 4. P. 699–707.
7. Барановский С. И., Левин В. М., Турецев А. И. Сверхзвуковое горение керосина в цилиндрическом канале // Структура газофазных пламен. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1988. Ч. 1. С. 114–120.
8. Третьяков П. К. Псевдоскачковый режим горения // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 6. С. 33–38.
9. Mestre A., Viaud L. Combustion supersonique dans un canal cylindrique // Supersonic Flow, Chemical Processes and Radiative Transfer / D. B. Olfe and V. Zakkay (Eds). Pergamon Press, 1964. P. 93–111.

Поступила в редакцию 9/II 1999 г.
