

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ МОДЕЛИ НА СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОТОЧНЫХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ В ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКЕ

В. К. Баев, В. В. Шумский

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

При числе Маха $M = 5$ в высокоэнтальпийной установке кратковременного режима с двойной форкамерой исследовано влияние абсолютных размеров моделей прямооточного воздушно-реактивного двигателя на газотермодинамику подвода тепла и суммарные силовые характеристики внутреннего тракта. Сравниваются результаты, полученные на моделях с диаметром захвата струи воздуха 73,5 и 23 мм. Увеличение примерно в три раза линейных размеров не влияет на газотермодинамические зависимости: основные закономерности рабочего процесса и тягово-экономических характеристик одинаковы для указанных моделей. Увеличение абсолютной величины уступа с 2,5 до 10 мм способствует предотвращению срыва втекания воздуха в модель за счет стабилизирующей роли уступа.

В [1–3] выполнен цикл исследований на моделях прямооточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) с диаметром захвата струи воздуха $d_0 = 23$ мм. При числе Маха набегающего на модели потока $M_n = 5$ были изучены особенности рабочего процесса и тягово-экономических характеристик двигательных трактов с двухрежимной камерой сгорания (КС) в режиме подвода тепла в среднем к дозвуковому потоку. Цель настоящей работы — проверить, как влияет увеличение размеров модели на рабочий процесс и тягово-экономические характеристики. Кроме того, в ней исследуется возможность работы модели не на газообразном водороде, а на жидком горючем. Поскольку условия самовоспламенения жидкостей, как правило, хуже, чем газообразного водорода, представляется интересным определить границы самовоспламенения жидкого горючего в модели гиперзвукового ПВРД с двухрежимной КС. В качестве жидкого горючего использовалось сложное бороорганическое соединение [4].

Модель. Для этих исследований была разработана специальная модель (рис. 1), линейные размеры которой примерно в три раза больше, чем у моделей работ [1–3] ($d_0 = 73,5$ мм).

Модель представляла собой комбинацию воздухозаборника, КС и конического сопла с центральным телом. Воздухозаборник — осе-

симметричный, двухскачковый, внешне-внутреннего сжатия, с относительной площадью горла $f_2 = F_2/F_0 = 0,25$. Характеристики воздухозаборника получены в результате двумерного расчета при невязком обтекании контура воздухозаборника и осреднении в горле (сечение 2 — выход из воздухозаборника, вход в КС) с использованием уравнений сохранения расхода, импульса и энергии. Осредненные характеристики потока в сечении 2 при $M_n = 5$ приведены в таблице.

M_2	$\varphi_{вз}$	$\sigma_{вз}$	p_2/p_n	$p_{2,ц.т.}/p_n$	$p_{2,об}/p_n$	T_2/T_n
3,08	1	0,73	9,33	0,77	11,9	2,07

Здесь и далее F — площадь поперечного сечения потока (внутреннего тракта); $\varphi_{вз}$, $\sigma_{вз}$ — коэффициенты расхода и восстановления полного давления в воздухозаборнике; p , T — давление и температура; индексы «ц.т.», «об» относятся к параметрам на поверхности центрального тела и обечайки, индексы 2, 4, 5, a — к соответствующим сечениям внутреннего тракта модели, индекс «н» — к параметрам набегающего на модель потока (см. рис. 1). Из таблицы видно, что поток на входе в КС сверхзвуковой.

КС выполнена по схеме двухрежимной с относительной степенью расширения $F_k = F_5/F_2 = 2,15 \div 2,4$. Горючее впрыскивалось через 48 инжекторов, расположенных на пилонках: газообразный водород — навстречу пото-

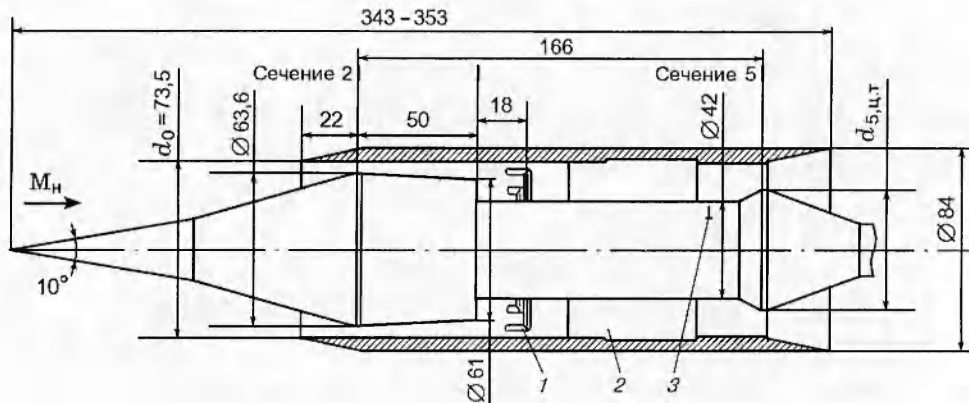


Рис. 1. Модель:

1 — инжекторы, 2 — пилоны, 3 — место измерения давления в КС

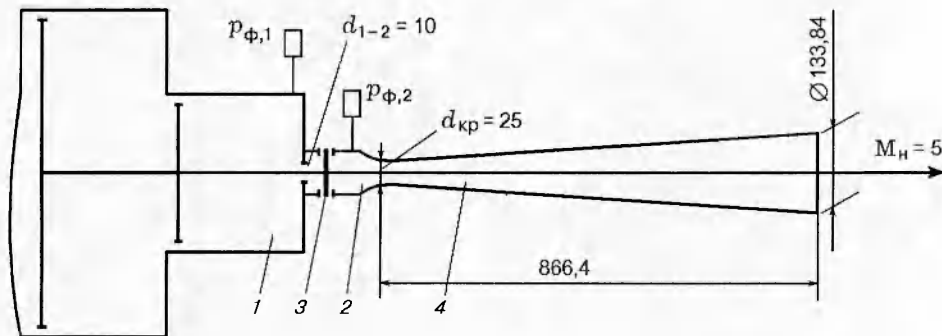


Рис. 2. Установка с двойной форкамерой:

1, 2 — первая, вторая форкамеры, 3 — диафрагма, 4 — профилированное сопло с $M_H = 5$

ку, жидкое горючее — под углом 135° к оси модели.

Экспериментальная установка. Так же, как в работе [3], опыты проводили в высокоэнтальпийной установке кратковременного режима ИТ-302М ИТПМ СО РАН с использованием профилированного сопла, рассчитанного на число Маха $M_H = 5$. При работе высокоэнтальпийной установки со сравнительно низким для таких установок значением $M_H = 5$ увеличение размеров модели является серьезной проблемой. Этого можно достигнуть либо за счет увеличения размеров сопла (а следовательно, за счет существенного уменьшения времени режима τ : $\tau \sim 1/d_{кр}^2$, где $d_{кр}$ — диаметр критического сечения сопла установки), либо за счет уменьшения давления торможения p_0 (что дает возможность при одной и той же энергетике установки увеличивать объем форкамеры V_ϕ или применять двойную форкамеру). В настоящих опытах выбран второй путь:

увеличение размеров модели за счет применения в установке ИТ-302М двойной форкамеры (рис. 2). Первая — штатная форкамера установки ИТ-302М с $V_\phi \approx 8$ дм³, вторая — цилиндр с внутренним диаметром 50 мм, внутри которого размещалась диафрагма. Первая форкамера отделена от второй одним отверстием $d_{1-2} = 10$ мм. В критическом сечении сопла и в отверстии между форкамерами устанавливается скорость звука. Поэтому исходя из уравнения сохранения расхода должно выполняться соотношение (при допущении, что показатель адиабаты $\kappa = \text{const}$ и температуры торможения равны — $T_{ф,1} = T_{ф,2}$):

$$\frac{p_{ф,1}}{p_{ф,2}} = \frac{F_{кв}}{F_{1-2}} = \left(\frac{d_{кр}}{d_{1-2}} \right)^2 = \left(\frac{25}{10} \right)^2 = 6,25.$$

Работа установки с двойной форкамерой имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при испытании моделей ПВРД.

На рис. 3 приведены отношения измерен-

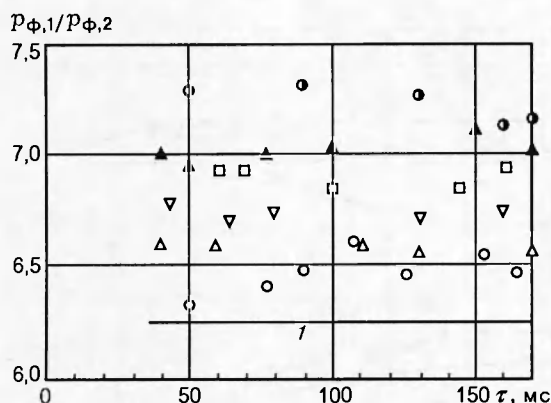


Рис. 3. Отношение измеренных давлений в первой и второй форкамерах:
1 — $F_{кр}/F_{1-2} = 6,25$

ных давлений в форкамере в опытах с настоящей моделью. Видно, что для каждого опыта отношение $p_{ф,1}/p_{ф,2} = const$ выдерживается с большой точностью: линии, которые можно провести через значки одного вида, параллельны оси τ . Однако от опыта к опыту эта величина колеблется от 6,3 до 7,3, хотя эксперименты проводили в довольно узком диапазоне значений $p_{ф,2}$ и $T_{ф,1}$.

Объясняется это следующей причиной. Давление во второй форкамере измерялось в том месте, где еще не произошло полного торможения воздуха, расстояние от отверстия между форкамерами до места измерения давления $p_{ф,2}$ меньше длины псевдоскачка, требуемого для перевода сверхзвукового потока в дозвуковой [5, 6]. В этом смысле газодинамика второй форкамеры и газодинамика начального участка двухрежимной КС имеют много общего. Геометрия раскрытия диафрагмы носит случайный характер, что при неполном торможении воздуха по-разному сказывалось на давлении воздуха в месте его измерения.

По результатам опытов можно сделать следующие выводы:

1. Место измерения давления $p_{ф,2}$ должно находиться на расстоянии от отверстия между форкамерами большем, чем длина псевдоскачка.

2. Длина второй форкамеры должна быть больше протяженности псевдоскачка, чтобы воздух перед входом в сопло установки был заторможен до дозвуковой скорости и был обеспечен равномерный профиль скоростей.

3. Диаметр второй форкамеры должен быть значительно больше $d_{кр}$, чтобы измеряе-

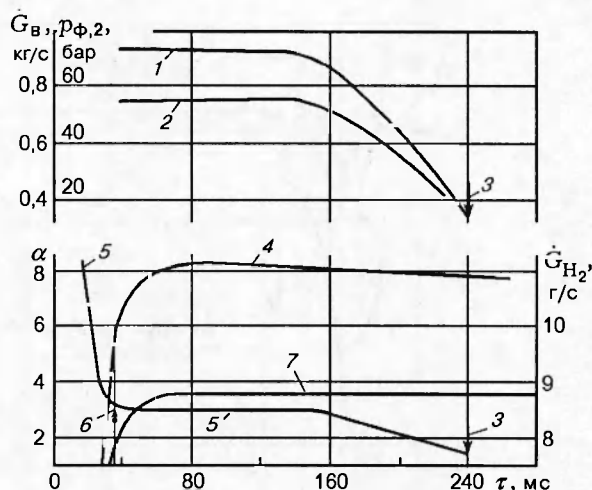


Рис. 4. Параметры, характеризующие работу модели в опыте, осциллограмма которого представлена на рис. 5:

1 — $G_{в}$; 2 — $p_{ф,2} = p_{0,н}$; 3 — срыв втекания воздуха в модель и прекращение горения; 4 — G_{H_2} ; 5 — α ; 6 — перестройка течения в КС; 7 — минимальный расход G_{H_2} , в опытах с настоящей моделью

мое давление на стенке второй форкамеры было близким к давлению торможения. Например, из анализа газодинамических функций следует: для того, чтобы измеряемое на стенке давление $p_{ф,2}$ отличалось от давления торможения не более чем на 1%, отношение диаметра второй форкамеры к $d_{кр}$ должно быть не менее 2,2 (в месте измерения давления $M \leq 0,12$).

Применение двойной форкамеры целесообразно в случае, когда уменьшением давления торможения набегающего на модель воздуха можно увеличить или время режима, или размеры модели.

Параметры, характеризующие работу модели, приведены на рис. 4, типичная осциллограмма опыта с подачей водорода в модель — на рис. 5. На этих рисунках и далее \dot{G} — массовый расход; α — коэффициент избытка воздуха; F_M — продольная сила, измеряемая однокомпонентными весами; p_k — давление внутри модели (место измерения p_k см. на рис. 1); индексы H_2 , «в» относятся к водороду и воздуху.

Время режима с постоянными параметрами набегающего на модель воздуха составляло ≈ 150 мс, после чего до $\tau \approx 240$ мс обтекание модели осуществлялось в режиме классической импульсной трубы с падающими параметрами. Давление и температура торможения набегающего на модель воздуха равнялись

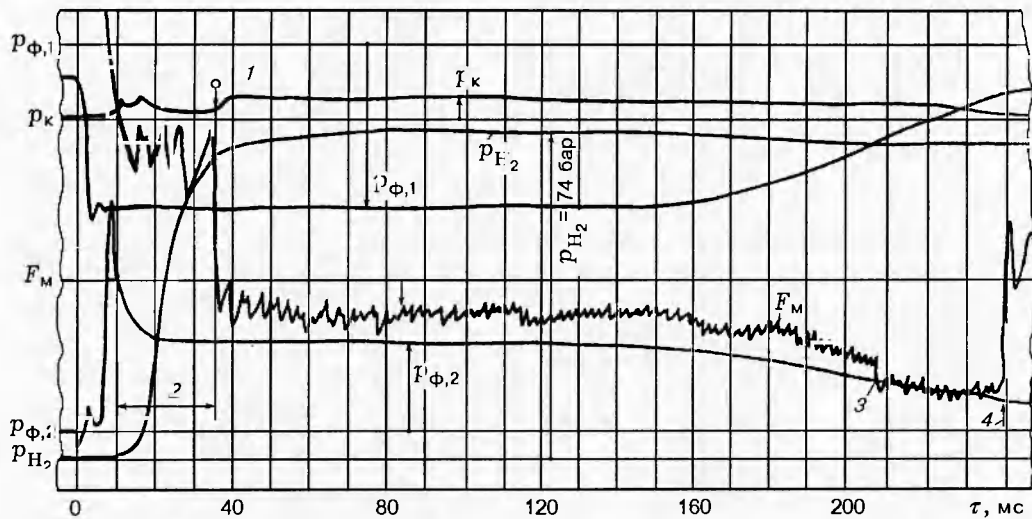


Рис. 5. Осциллограммы параметров, характеризующих работу модели с подачей водорода в КС:

1 — конец перестройки течения в КС; 2 — перестройка течения в КС; 3 — ступенчатое увеличение тяги, вызванное смещением псевдоскачка; 4 — срыв втекания воздуха в модель и прекращение горения

соответственно $p_{0,н} = p_{ф,2} = 35 \div 65$ бар и $T_{0,н} = T_{ф,1} = T_{ф,2} = 1300$ К.

Заметим, что допущение $T_{ф,1} = T_{ф,2}$ не выполняется от момента разрыва диафрагмы до момента наполнения второй форкамеры. Причина заключается в том, что при наполнении второй форкамеры воздух совершает работу сжатия над находящимся в ней газом. В течение некоторого времени, пока объем 2 (см. рис. 2) наполняется, это приводит к повышению температуры $T_{ф,2}$ относительно $T_{ф,1}$ — так называемый перегрев во второй форкамере [7]. Однако при соотношениях $V_{ф,2}/V_{ф,1} = 0,025$ и $F_{кр}/F_{1-2} = 6,25$ можно считать, что время наполнения объема 2 не более нескольких миллисекунд. Поэтому для основной части режима будет выполняться условие $T_{ф,1} = T_{ф,2} = T_{0,н}$ (в пренебрежении температурным дроссельным эффектом и тепловыми потерями в стенке).

Самовоспламенение водорода. Во всех опытах с подачей водорода в настоящую модель наблюдалось самовоспламенение. Из анализа данных по всем ранее выполненным испытаниям моделей ПВРД [1–3, 8, 9] следует, что самовоспламенение водорода начиналось сразу же после подачи его в модель и в очень широком диапазоне значений α . Поэтому будем считать, что и для настоящей модели очаги воспламенения водорода появляются сразу после подачи первых порций водорода в КС.

Подача водорода в модель начинается при $\tau = 10 \div 15$ мс, и затем давление перед форсунками монотонно нарастает в течение $20 \div 25$ мс, выходя на «полку» к $\tau \approx 40$ мс (см. рис. 5). Такова особенность срабатывания принятой в настоящей модели системы подачи по сравнению с системой подачи в моделях работ [1–3, 8, 9], в которых нарастание давления горючего происходило с крутым фронтом сразу после начала режима в рабочей части установки.

В промежутке времени от 15 до $\approx (40 \div 60)$ мс расход водорода через модель увеличивается, растет относительный теплоподвод и происходит перестройка течения в КС. Последнее хорошо видно на осциллограммах силы F_m и давления p_k в модели КС (см. 1 на рис. 5). Заметим, что время (считая от начала подачи водорода в КС), затраченное на перестройку течения при «вялом» нарастании расхода водорода через модель, составляет $20 \div 30$ мс (см. 2 на рис. 5), т. е. хорошо совпадает с данными, полученными на моделях в [1–3, 8, 9] при ступенчатой подаче горючего в КС. Это еще раз подтверждает определяющую роль формирования и движения псевдоскачка в направлении горла воздухозаборника, вызванного увеличением относительного подогрева рабочего тела.

Ступенчатое увеличение тяги. Срыв втекания воздуха в модель. Режим с постоянными параметрами набегающего на модель воздуха длится до $\tau = 140 \div 150$ мс (см. рис. 4, 5). За-

тем, когда поршень установки приходит в конечное положение и начинается истечение из остаточного постоянного объема первой форкамеры, значения $p_{ф,1}$, $p_{ф,2}$, $T_{ф,1} = T_{ф,2} = T_{0,н}$, G_v уменьшаются, но $p_{н2}$, а следовательно, и G_{H_2} остаются примерно постоянными. Поэтому при $\tau > 140 \div 150$ мс коэффициент избытка воздуха уменьшается от значения $\alpha \approx 3$ на «полке» параметров (см. кривую 5 на рис. 4). Уменьшение α и $T_{0,н}$ приводит к росту относительного подогрева рабочего тела в тракте модели и к росту F_m . Причем в диапазоне $\tau = 195 \div 210$ мс наблюдалось ступенчатое увеличение тяги (см. 3 на рис. 5), вызванное ступенчатым смещением псевдоскачка в район сечения 2 — к началу КС. Механизм перемещения псевдоскачка на начальном участке КС подробно описан в работах [8, 9].

Срыв втекания воздуха в модель наступал при $\tau = 225 \div 250$ мс. При этом происходит срыв пламени в КС, хотя водород продолжает поступать в КС. В момент срыва $\alpha = 1,3 \div 1,7$, $T_{0,н} = 930 \div 990$ К, $T_n = 160 \div 173$ К, комплекс $\beta\sqrt{T_{0,5}/T_{0,н}} = 1,7 \div 1,8$ рассчитан в предположении полноты сгорания $\xi = 0,8$ (β — относительное увеличение массы рабочего тела в тракте модели). Считалось, что водород сгорает полностью, но 20% тепла, выделяемого при сгорании водорода, теряется в стенки КС (см. [9]). Данные по срыву втекания, полученные на настоящей модели, очень хорошо согласуются с результатами работ [3, 8, 9], полученными при $M_n = 5 \div 7,9$, $\alpha = 0,22 \div 1,7$, $F_k = 1,884 \div 2,2$. Причем срыв втекания так же, как в работах [3, 8, 9], не зависел от значений τ , α , $T_{0,н}$, T_n непосредственно перед срывом, а определялся исключительно величиной $\beta\sqrt{T_{0,5}/T_{0,н}}$.

Так же, как и в работах [3, 8, 9], комплекс $\beta\sqrt{T_{0,5}/T_{0,н}}$ непосредственно перед срывом значительно меньше предельно возможного по термическому запиранию КС. Как показано в [3, 8, 9], срыв втекания в модель связан не с термическим запиранием КС, а с выходом начала псевдоскачка на поверхности сжатия воздухозаборника.

Таким образом, исследования, проведенные с настоящей моделью при $M_n = 5$ на водородном горючем, подтвердили общие закономерности работы двухрежимной КС в режиме подвода тепла к дозвуковому потоку в КС, подробно изученные в работах [1–3] для указанного значения M_n на моделях меньшего разме-

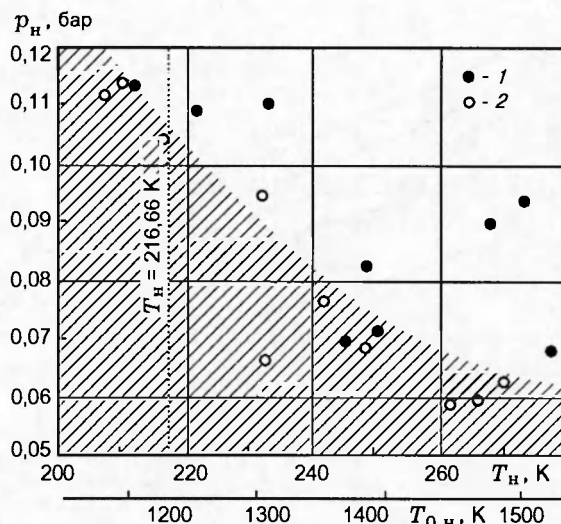


Рис. 6. Граница самовоспламенения жидкого горючего в модели:

1 — есть самовоспламенение; 2 — нет самовоспламенения (заштрихованная область)

ра. В этом смысле увеличение поперечного размера модели каких-либо неожиданностей в работе КС на режиме подвода тепла к дозвуковому потоку не выявило: определяющими для работы КС факторами, как и для моделей с $d_0 = 23$ мм, являются относительный теплоподвод, уровень гидравлических потерь в КС, место расположения псевдоскачка на начальном участке КС, длина начального участка.

Границы самовоспламенения жидкого горючего. В отличие от опытов с водородом при впрыске жидкого горючего его самовоспламенение происходило не всегда. Для определения границы самовоспламенения изменяли давление накачки воздуха в первую форкамеру и энергию разряда конденсаторной батареи. Это приводило к тому, что в разных опытах в момент впрыска горючего модель обтекалась воздухом с разными значениями p_n , T_n , $T_{0,н}$, что позволяло определить границы самовоспламенения.

Экспериментальные данные по самовоспламенению жидкого горючего внутри модели приведены на рис. 6. Видно, что с увеличением температуры T_n граница раздела «самовоспламенение — отсутствие самовоспламенения» смещается в область меньших давлений.

Интересно сравнить границу самовоспламенения внутри модели с границей самовоспламенения, полученной в опытах с пластиной [10]. На пластине, имевшей уступ 10 мм и козы-

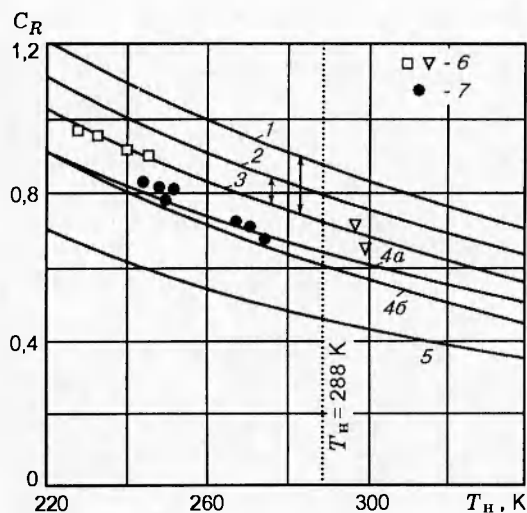


Рис. 7. Коэффициент внутренней тяги при работе моделей на жидком горючем:

φ_c — коэффициент скорости сопла, $\sigma_{гк}$ — коэффициент восстановления полного давления в КС, связанный с гидравлическими потерями и потерями на трение (см. [3, 9]); 1–3, 6 — модель работ [1–3], $d_0 = 23$ мм, $f_2 = 0,266$, $F_k = 1,96$, $\alpha = 1$, $F_a/F_0 = 1,7$; 1–3 — расчет, $\sigma_{гк} = 0,9$, $\varphi_c = 0,98$; 1 — $F_k = 1,61$ (минимально возможное расширение КС при $T_n = 220$ К, $\sigma_{гк} = 0,9$, $\xi = 0,9$); 2 — $F_k = 1,55$ (минимально возможное расширение КС при $T_n = 220$ К, $\sigma_{гк} = 0,9$, $\xi = 0,8$); 3 — $\xi = 0,8$; 6 — экспериментальные точки; 4а, 4б, 5, 7 — настоящая модель; $F_k = 2,4$; $F_a/F_0 = 1,31$; 4а, 4б, 5 — расчет, $\sigma_{гк} = 0,9$, $\varphi_c = 0,98$; 4а — $\xi = 0,8$, $\alpha = 0,65$; 4б — $\xi = 0,8$, $\alpha = 1$; 5 — $\xi = 0,7$, $\alpha = 0,65$; 7 — экспериментальные точки, $\alpha = 0,62 \div 0,7$

рек, температура самовоспламенения (погасания) жидкого бороорганического горючего составляла $T_{0,n} \sim 1600$ К, статическое давление над пластиной $0,5 \div 1$ бар. Степень повышения давления в настоящей модели $p_k/p_n = 50 \div 70$, т. е. для $p_n \approx 0,06$ бар (см. правый нижний угол на рис. 6) $p_k = 3 \div 4$ бар. На рис. 6 граница самовоспламенения, соответствующая указанному давлению набегающего на модель воздуха, составляла $T_{0,n} \sim 1500$ К. Таким образом, с учетом зависимости границы самовоспламенения от давления имеет место не только качественное, но и количественное совпадение данных по самовоспламенению жидкого бороорганического горючего над пластиной (при наличии уступа и скачков уплотнения) и внутри модели.

Тягово-экономические характеристики модели. На рис. 7 приведен коэффициент внутренней тяги модели

$$C_R = \frac{F_M}{q_n F_0} - C_{x,волн} - C_{x,тр},$$

где q_n — скоростной напор набегающего на модель воздуха; $C_{x,волн}$, $C_{x,тр}$ — коэффициент волнового сопротивления передней части обечайки модели и коэффициент трения наружной поверхности обечайки, определяются расчетным путем (см., например, [3]).

На рис. 7 проведены три расчетные кривые. Кривая 5 соответствует подводу тепла, выделившегося при сгорании горючего с полной сгорания $\xi = 0,7$, кривые 4а, 4б — с $\xi = 0,8$. Видно, что так же, как для модели работ [1–3] с $d_0 = 23$ мм, экспериментальные точки для настоящей модели с $d_0 = 73,5$ мм хорошо ложатся на кривую $\xi = 0,8$. Это свидетельствует о том, что с учетом потерь тепла в холодные стенки модели физическая полнота сгорания жидкого горючего в проведенных опытах была не ниже $0,9 \div 0,95$.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных, полученных на настоящей модели, с результатами, полученными на модели работ [1–3], показывает, что увеличение тягово-экономических характеристик за счет уменьшения F_k , теплоизоляции стенок внутреннего тракта и регенерации теплоты, наблюдавшееся для модели с $d_0 = 23$ мм, (см. 1, 2 на рис. 7) имеет место и при увеличении размеров модели.

Таким образом, опыты показали, что основные закономерности рабочего процесса и тягово-экономических характеристик внутреннего тракта, изученные прежде на моделях с $d_0 = 23$ мм, сохраняются и при увеличении размеров модели в три раза. Это, прежде всего, высокая полнота сгорания в двухрежимной КС на режиме подвода тепла к дозвуковому потоку и совпадение расчетных и экспериментальных значений тягово-экономических характеристик. Это относится и к газообразному водороду, и к жидкому горючему.

Опыты с моделью увеличенных размеров выявили и некоторые отличия от результатов, полученных на моделях с $d_0 = 23$ мм. В опытах с настоящей моделью при $F_k = 2,15$ не наблюдалось срыва втекания воздуха в модель. Для модели с $d_0 = 23$ мм уже при $F_k = 2,24$ требовалось перераспределение подачи горючего по длине КС с тем, чтобы избежать срыва втекания, хотя длина КС (абсолютная) и длина начального участка КС (в калибрах высоты горла воздухозаборника) были примерно одинаковыми для обеих моделей: 168 мм для на-

стоящей модели, 160 мм в [1–3], относительная длина начального участка КС соответственно 10 и 14. Тем самым на отсутствие срыва втекания воздуха в модель влияло абсолютное значение высоты уступа (10 мм для настоящей модели и 2,5 мм для моделей работ [1–3]). При подаче горючего ниже уступа последний стабилизирует псевдоскачок на начальном участке КС, препятствуя его перемещению вверх по потоку. Об этом же косвенно свидетельствует наличие скачка тяги в опытах с настоящей моделью на водороде (см. 3 на рис. 5). Он вызван скачкообразным смещением псевдоскачка из-за увеличения теплоподвода в КС при работе установки в режиме с уменьшающимися физическими параметрами набегающего воздуха при $\tau > 150$ мс (в опытах с жидким горючим запаса жидкости в модели хватало лишь на часть времени работы установки с постоянными параметрами; поэтому режим с увеличением $\beta\sqrt{T_{0,5}/T_{0,n}}$ не реализовывался).

Заключение. 1. При увеличении примерно в три раза линейных размеров модели прямого ВРД (с $d_0 = 23$ мм до $d_0 = 73,5$ мм) каких-либо неожиданностей в работе модели не наблюдалось. Определяющими факторами работы КС и модели в целом являются относительный теплоподвод, уровень гидравлических потерь в КС, место расположения псевдоскачка на начальном участке, длина начального участка КС.

2. Испытанная конфигурация двухрежимной КС обеспечивает высокую полноту сгорания (не ниже 0,9) газообразного водорода и жидкого горючего, а также совпадение расчетных и экспериментальных значений тягово-экономических характеристик.

3. Увеличение абсолютной величины уступа до 10 мм на модели с $d_0 = 73,5$ мм по сравнению с высотой уступа 2,5 мм на моделях с $d_0 = 23$ мм оказывает стабилизирующее воздействие на предотвращение срыва втекания воздуха в модель, позволяя проводить опыты на моделях с меньшими значениями \bar{F}_k без принятия специальных мер по перераспределению подачи горючего по длине КС.

4. В координатах p_n, T_n определены границы самовоспламенения жидкого бороорганического горючего в модели гиперзвукового ПВРД с двухрежимной КС. Данные по самовоспламенению жидкого горючего внутри модели со сложной структурой течения в КС количественно совпадают с данными, полученными на значительно более простой модели (пласти-

не при наличии уступа и скачков уплотнения в потоке над ней).

5. Работа высокоэнтальпийной установки кратковременного режима с двойной форкамерой позволяет существенно увеличивать время режима или размеры моделей, расширяя тем самым вниз диапазон значений M_n набегающего на модели воздуха. Однако при этом требуется учитывать влияние специфики работы двойной форкамеры на достоверность определения параметров набегающего потока.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 97-01-00506).

ЛИТЕРАТУРА

1. Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И. Исследование силовых характеристик и параметров потока в тракте модели с горением // ПМТФ. 1984. № 1. С. 103–109.
2. Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И. Некоторые методические аспекты исследования газодинамических моделей с теплоподводом в импульсной аэродинамической трубе // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 45–54.
3. Баев В. К., Шумский В. В. Влияние газодинамики двухрежимной камеры сгорания на силовые характеристики модели с горением // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 49–63.
4. Захаркин Л. И., Пономаренко А. А., Охлабыстин О. Ю. Синтез углеводородных производных барена // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1964. № 12. С. 2210–2212.
5. Neumann E. P., Lustwerk F. Supersonic diffuser for wind tunnel // J. Appl. Mech. 1949. V. 16, N 2. P. 195–202.
6. Острась В. Н., Пензин В. И. Экспериментальное исследование силы трения в канале при наличии псевдоскачка // Учен. записки ЦАГИ. 1974. Т. 5, N 2. С. 151–155.
7. Антонов В. М., Жохов В. А. Явление перегрева газа в импульсной аэродинамической установке // Учен. записки ЦАГИ. 1985. Т. 16, № 2. С. 41–49.
8. Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И. Исследования газодинамики моделей с горением в импульсной аэродинамической трубе // ПМТФ. 1983. № 6. С. 58–66.
9. Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И. Исследование распределения давления и теплообмена в газодинамической модели с горением, обтекаемой высокоэнтальпийным потоком воздуха // ПМТФ. 1985. № 5. С. 56–65.

10. **Баев В. К., Пронин Ю. А., Шумский В. В.** Самовоспламенение жидких веществ в сверхзвуковом потоке воздуха // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 4. С. 22–26.

Поступила в редакцию 2/IV 1998 г.
