

УДК 629.7.036:536.46

## СОСТАВ РАБОЧЕГО ТЕЛА В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ УСТАНОВКИ

В. В. Шумский, М. И. Ярославцев

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

Разработаны методика и система отбора пробы химически активного газа из гиперзвукового потока с высокими параметрами торможения. Приведены результаты экспериментального исследования состава рабочего тела на срезе сопла импульсной аэродинамической трубы ИТ-302М ИТПМ СО РАН. При нагреве в форкамере установки воздуха до 3000 К только за счет электрической дуги объемная концентрация кислорода в рабочей части установки уменьшается с 21 до 18 %, что в ряде испытаний газодинамических моделей с горением может потребовать введения в форкамеру кислорода, компенсирующего его уменьшение. При использовании, наряду с электрической дугой, водорода с целью увеличения энергетики установки определена степень завершения в форкамере реакции сгорания водорода с воздухом. При минимально возможном для установки ИТ-302М вкладе электрической энергии (из условий обеспечения стабильности горения дуги) полнота сгорания водорода составляет  $\approx 0.9$  для очень бедных водородовоздушных смесей, в которых концентрация водорода значительно ниже концентрационных пределов воспламенения при нормальных условиях. Полнота сгорания быстро приближается к единице при росте концентрации водорода в форкамере и увеличении вклада электрической энергии.

Ключевые слова: высокоэнтальпийная установка кратковременного режима, форкамера, электрический разряд, пробоотборник, отбор пробы газа, кислород, водород.

### ВВЕДЕНИЕ

В ряде работ, выполняемых в импульсных высокоэнтальпийных установках, требуется знать состав рабочего тела (РТ), обтекающего модели. Так, при исследовании газодинамических моделей с горением возникает вопрос о содержании кислорода в обтекающей модели в воздухе, так как при электродуговом нагреве в форкамере его доля уменьшается в результате окисления элементов конструкции. При использовании химической энергии для увеличения энергетики установки [1] требуется знать, насколько полно завершены химические реакции в форкамере (ФК) и каков состав РТ на срезе сопла.

Отбор газовых проб для последующего определения состава является наиболее распространенным способом определения степени завершенности химических реакций в газовом потоке. Пробу желательно отбирать в рабочей части установки на выходе из сопла. Специфика отбора проб в высокоэнтальпийных установках кратковременного режима заключается в

следующем.

1. Число Маха потока на срезе сопла  $M = 5 \div 10$ , температура торможения  $1000 \div 3000$  К, давление торможения от нескольких десятков до сотен бар. При таких параметрах, если рабочим телом на срезе сопла является замороженный химически активный газ, образовавшийся в ФК в результате неполных реакций, внутри пробоотборника могут возникнуть условия, вызывающие возобновление реакции в отобранной пробе. Поэтому методика отбора и конструкция системы отбора пробы должны исключать возможность вторичных реакций внутри системы.

2. Объем баллона, в который отбирается проба, и площадь входа в пробоотборник должны подбираться такими, чтобы в процессе натекания пробы давление в баллоне было в несколько раз меньше давления в канале пробоотборника для предотвращения запираания и срыва втекания в пробоотборник. При этом, поскольку давление отобранного в баллон газа получается значительно меньше атмосферного ( $0.1 \div 0.2$  бара), должно быть предусмотрено дожатие пробы до атмосферного давления (или несколько выше), чтобы можно было провести химический анализ пробы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-08-00138-а).

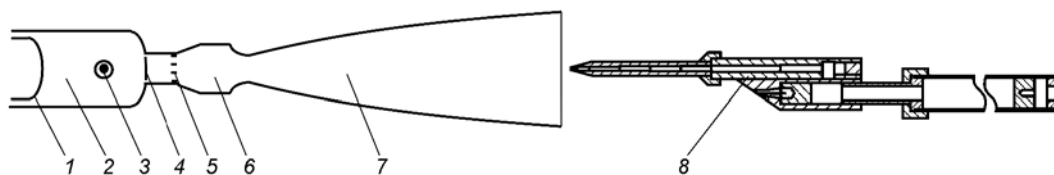


Рис. 1. Схема установки и расположение пробоотборника относительно сопла установки ИТ-302М:

1 — плунжер мультипликатора, 2 — первая ФК, 3 — электроды, 4 — диафрагма, 5 — дросселирующая решетка, 6 — вторая ФК, 7 — сопло, 8 — устройство для отбора пробы из рабочей части установки

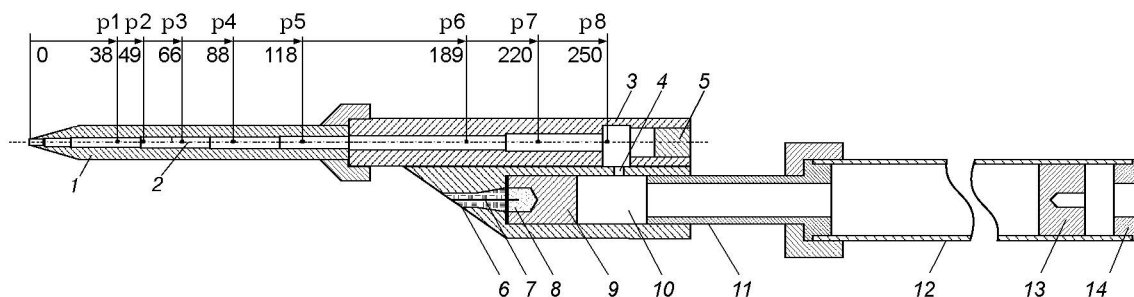


Рис. 2. Схема модели для отбора пробы газа из рабочей части:

1 — собственно пробоотборник (медь), 2 — канал пробоотборника, 3 — переходник (сталь), 4 — перепускное отверстие, 5 — хвостовая заглушка, 6 — изолятор, 7 — электрод, 8 — заряд взрывчатого вещества, 9 — клапан, 10 — полость клапана, 11 — переходник, 12 — баллон, 13 — поршень баллона, 14 — упорная втулка

3. Время рабочего режима установки  $\approx 100$  мс. Часть этого времени необходимо потратить на отбор пробы газа, при этом баллон должен быть закрыт практически мгновенно ( $\approx 1$  мс). Для «привязки» пробы к параметрам потока требуется жесткая синхронизация работы системы отбора с режимом установки. Механизм отсечки пробы и запирания баллона должен обеспечивать абсолютную герметичность объема с отобранном газом: исключать утечки из баллона в период нахождения рабочей части установки под глубоким вакуумом и натекание в баллон атмосферного воздуха после открытия рабочей части.

Решение перечисленных выше вопросов для гиперзвуковой аэродинамической импульсной трубы ИТ-302М ИТПМ СО РАН [1] при отборе пробы в рабочей части на срезе сопла составляло содержание методической части работы.

## 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОТБОРА ПРОБ ИЗ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ

### 1.1. Пробоотборник и схема проведения опытов

Схема проведения опытов, расположение пробоотборника в рабочей части установки и детали его конструкции показаны на рис. 1 и 2. Комплектация трубы следующая: первая форкамера, вторая форкамера, профилированное сопло, рассчитанное на число Маха на срезе сопла  $M_n = 6$ , диаметр среза сопла 300 мм.

В опытах с накачкой воздуха в первую ФК временем начала режима принят момент разряда конденсаторной батареи, в опытах с горючей смесью в первой ФК — момент принудительного вскрытия диафрагмы (необходимость в задержке вскрытия диафрагмы при химическом подогреве РТ и величина задержки обсуждаются в [1] и в § 2.1 настоящей статьи).

Схема внутренних каналов одного из вариантов модели приведена на рис. 2. Собственно

пробоотборная часть модели 1 выполнена массивной, из меди, для того чтобы обеспечить интенсивный отвод тепла от пробы. В этой части модели поток в течение всего времени отбора пробы должен сохраняться сверхзвуковым. Для компенсации нарастающего пограничного слоя канал пробоотборника выполнен расширяющимся: от  $2.5 \div 5.5$  мм на входе до  $7 \div 9$  мм на выходе в разных вариантах модели. Канал заканчивается стальным переходником 3, в котором поток тормозится до дозвуковой скорости, после чего проба через переходное отверстие 4 попадает в полость 10 корпуса пироклапана и через переходник 11 — в баллон 12. Объем баллона  $V_{\text{бал}} = 125 \div 570$  см<sup>3</sup>. Поршень 13 баллона служит для дожатия пробы до атмосферного давления после завершения опыта. Входное отверстие пробоотборника располагается по оси сопла установки. Для одного из вариантов пробоотборника между датчиками  $p_2$  и  $p_5$  были размещены три датчика тепловых потоков.

Перед экспериментом объем 8 поршня 9 заполняется смесью пороха с алюминиевой пудрой. Поршень перемещается вперед до упора. При этом весь газовый тракт модели (каналы пробоотборника 1 и переходников 3, 11, полости клапана 10 и баллона 12, дренажные трубки и полости датчиков давления) сообщается с рабочей частью установки.

Перед запуском аэродинамической трубы проводится вакуумирование газодинамического тракта установки, за исключением ФК, которая отделена от газодинамического тракта диафрагмой 4 (см. рис. 1). При этом вакуумируется и газовый тракт модели. После начала режима работы трубы происходит заполнение баллона 12 (см. рис. 2) отбираемой пробой (РТ установки). По достижении определенного давления в баллоне и при определенной структуре течения в канале, которая подбирается опытным путем по показаниям датчиков давления  $p_1$ – $p_8$  в зависимости от сочетания давления в рабочей части установки и в баллоне, подается сигнал на подрыв порохового заряда. Поршень смещается в крайнее заднее положение и отсекает полость клапана и баллон от канала пробоотборника.

В процессе отбора пробы за счет расширения канала, расположенного сразу за сечением входа пробоотборника, сверх- или гиперзвуковой поток, входящий в пробоотборник из рабочей части установки, ускоряется. При этом ста-

тические давление и температура отбираемой пробы падают по сравнению с теми значениями, которые они имели в месте отбора. Длина канала пробоотборника должна быть такой, чтобы за счет теплоотдачи к холодным стенкам модели температура торможения пробы уменьшилась до такой величины, при которой после торможения в конце канала не происходит повторной реакции непрореагировавшей части пробы. В этом заключается физический принцип действия пробоотборной части модели [2, 3].

## 1.2. Течение в канале пробоотборника

На рис. 3 и 4 приведены временные зависимости давления в дренажных точках  $p_2$  и  $p_5$  на стенке пробоотборника диаметром на входе  $d = 2.5$  мм ( $V_{\text{бал}} = 125$  см<sup>3</sup>). В этой методической серии опытов давление накачки воздуха в первую ФК  $p_{\phi 1}(н) = 50$  бар, напряжение зарядки конденсаторной батареи  $U = 3.8$  кВ,  $p_{\phi 1}(0) = 290$  бар,  $p_{\phi 2}(8) = 60$  бар,  $T_{\phi 1}(0) = 1600$  К; изменение параметров воздуха в течение режима представлено на рис. 5. Здесь и далее обозначения  $n, 0, t$  в скобках относятся соответственно к параметрам накачки среды в первую ФК, к начальному моменту режима, к моменту режима  $t$ , нижние индексы  $\phi_1, \phi_2, n$  — соответственно к параметрам в первой, второй

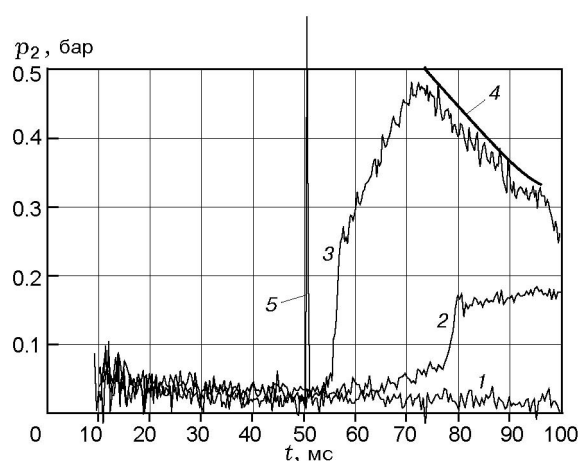


Рис. 3. Давление в дренажной точке  $p_2$ :

1 — опыт с открытой хвостовой заглушкой 5 (рис. 2), 2 — опыт с закрытой хвостовой заглушкой, но без срабатывания отсечного пироклапана, 3–5 — опыт с закрытой хвостовой заглушкой и срабатыванием отсечного пироклапана 9 (рис. 2), 4 — давление  $p_0$ , измеренное на срезе сопла установки, 5 — момент срабатывания отсечного пироклапана

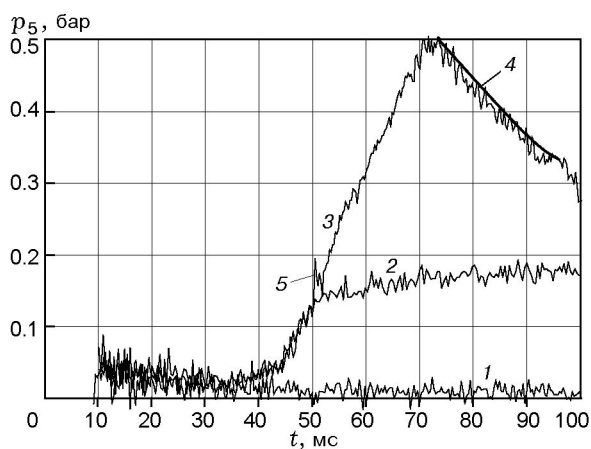


Рис. 4. Давление в дренажной точке р5: обозначения см. в подписи к рисунку рис. 3

ФК и набегающего на модель потока (параметрам в рабочей части установки).

При открытой хвостовой заглушке (5 на рис. 2) давление по всей длине канала в течение всего режима близко к давлению набегающего на модель потока (см. кривые 1 на рис. 3, 4). Это свидетельствует о том, что в этом опыте в течение всего режима поток в канале пробоотборника оставался сверхзвуковым и нигде в канале от входа в пробоотборник до выхода из переходника (3 на рис. 2) не происходило торможения потока. Пироклапан в этом опыте не включался, и давление в баллоне практически соответствовало статическому давлению в конце канала пробоотборника. То есть в течение всего режима практически не происходило натекания пробы в баллон.

Опыту с закрытой хвостовой заглушкой, но без включения пироклапана соответствуют кривые 2. Сразу после начала режима в рабочей части трубы в переходнике модели происходит торможение сверхзвукового потока. Начало торможения находится в районе дренажной точки р6: в дренажных точках р1–р5 давление остается тем же самым, что и в опыте с открытой хвостовой заглушкой. Начинается натекание отобранной пробы в баллон с повышением в нем давления.

В течение режима из-за повышения давления в баллоне процесс торможения в канале пробоотборника начинает перемещаться против потока. Ко времени  $t = 40 \div 45$  мс рост давления достигает медной части пробоотборника, в которой должен происходить отбор тепла от сверхзвукового потока (см. повышение

давления при  $t = 40 \div 45$  мс в дренажной точке р5 на кривой 2 рис. 4). К моменту времени  $t \approx 65$  мс начало повышения давления достигает дренажной точки р2 (см. кривую 2 рис. 3). Распределение давления в канале между дренажными точками р2–р8 типичное для псевдоскачка [4]. Нарастание давления в дренажных точках по длине канала пробоотборника в течение режима позволяет вычислить скорость перемещения псевдоскачка вверх по потоку из-за повышения давления в баллоне. Для данной конкретной конструкции эта скорость составила  $\approx 3$  м/с.

Пространственно-временные характеристики потока внутри пробоотборника определили выбор времени отбора пробы  $t < 45 \div 55$  мс, в течение которого на большей части длины собственно пробоотборника (медной части) сохраняется сверхзвуковой поток газа. Срабатывание клапана должно происходить именно до этого момента.

Давления, измеренные по длине канала (см. рис. 2) в медной части пробоотборника, позволяют оценить в нем уровень чисел Маха в случае, когда начало повышения давления еще не выходит из переходника в канал. Из уравнения расхода, записанного для сечения входа в пробоотборник и для любого сечения канала, следует

$$y(M_j) = \frac{p_n F_n}{p_j F_j} \sqrt{\frac{T_{0j}}{T_{0n}}} y(M_n), \quad (1)$$

где  $y(M)$  — газодинамическая функция [5],  $T_0$  — температура торможения, индекс  $j$  относится к сечению канала пробоотборника в точках измерения давления р1–р5,  $F_n$  — площадь струи, втекающей в пробоотборник. Так как пограничный слой занимает заметную часть сечения канала, то в эффективной площади поперечного сечения канала  $F_j$  должна учитываться толщина вытеснения пограничного слоя, зависящая от расстояния сечения  $j$  от входа в пробоотборник, а также от температурного фактора. Диаметр канала ступенчато увеличивается от  $d = 2,5$  мм в сечении входа до 5 мм в районе дренажной точки р5. В канале поток не только разгоняется за счет ступенчатого расширения, но и тормозится в косых скачках уплотнения, присоединенных к застойным зонам за уступами ступенек. Сложная картина течения в канале приводила к тому, что в течение  $10 \div 100$  мс отношение давлений  $p_n/p_j$

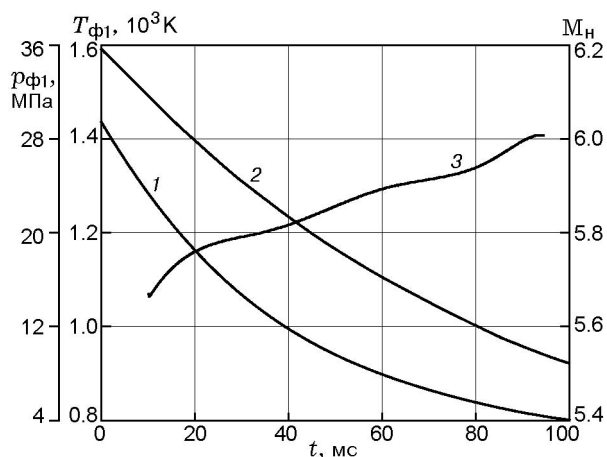


Рис. 5. Параметры набегающего на модель потока:

1 — давление в первой ФК, 2 — температура в первой ФК  $T_{ф1}$ , 3 — число Маха на срезе сопла  $M_n$

( $j = p1 \div p5$ ) составляло  $5 \div 0.7$ . С использованием этих значений  $p_n/p_j$  оценка по формуле (1) при расчете пограничного слоя по соотношениям [5] для плоской пластины при температурном факторе  $0.2 \div 0.4$  и  $T_{0j} = T_{0n}$  дает значения  $M_j = 7 \div 4.5$ . Сравнивая их со значениями  $M_n$ , приведенными на рис. 5, можно считать, что поток в сечениях канала медной части пробоотборника остается сверхзвуковым с числом Маха, близким или превышающим  $M_n$  в рабочей части установки.

Опыт, которому на рис. 3 и 4 соответствуют кривые 3–5, был проведен с отсечкой отобранной пробы в баллоне при срабатывании пироклапана в момент времени  $t = 50.4$  мс. Видно, что до момента срабатывания пироклапана в большей части медного канала пробоотборника течение действительно сверхзвуковое. То есть был выполнен основной принцип отбора пробы из сверхзвукового реакционного потока: охлаждение отобранной пробы должно происходить при сверхзвуковом течении внутри пробоотборника. После закрытия клапана давление по всей длине пробоотборника выравнивается и становится равным давлению за прямым скачком уплотнения  $p'_0$  (см. кривую 4). Пробоотборник начинает работать как трубка полного напора.

На рис. 6 показано изменение во времени давления в баллоне при различных вариантах работы системы отбора. При открытой хвостовой заглушке баллон, как указывалось выше,

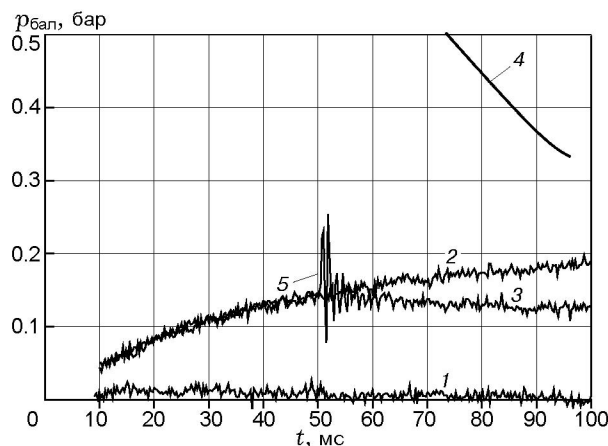


Рис. 6. Давление в баллоне:

обозначения см. в подписи к рисунку рис. 3

практически не наполнялся и давление в нем не повышалось в течение всего режима (кривая 1). При закрытой хвостовой заглушке, но без включения клапана давление в баллоне растет в течение всего режима (кривая 2). В опытах со срабатыванием клапана давление в баллоне после запираания пробы падает за счет теплоотвода к холодным стенкам баллона, после полного охлаждения газа до комнатной температуры оно уменьшается не более чем на 20 % от давления в момент закрытия клапана (кривая 3). То есть в момент закрытия клапана температура отобранного газа в баллоне не превышала 350 К при наблюдавшихся в данном опыте в диапазоне  $t = 0 \div 50.4$  мс значениях  $p_{0n} = p_{ф2} = 60 \div 20$  бар,  $T_0 = 1600 \div 1180$  К (см. рис 5).

Это свидетельствует о том, что, во-первых, в баллон поступает уже охлажденный газ; во-вторых, в переходниках 3, 11 (см. рис. 2), перепускном отверстии 4, в полости клапана 10 и в баллоне 12 возможен сильный теплоотвод от газа к холодным стенкам модели. В опытах с использованием воздуха в качестве РТ при параметрах воздуха, близких к приведенным на рис. 5, с отсечкой пробы в момент времени  $t = 40$  мс тепловой поток в районе датчиков составлял  $q_w \approx 75$  кВт/м<sup>2</sup> (среднее по показаниям трех датчиков). Расход воздуха через пробоотборник в этот момент  $G = 320$  г/с. При таком расходе по каналу 2 (см. рис. 2) температура воздуха падает на величину  $\Delta T = q_w S / c_p G \approx 450$  К, где  $S = 20$  см<sup>2</sup> — площадь боковой поверхности канала 2. То есть в сверхзвуковой части про-

боотборника при параметрах РТ, представленных на рис. 5, при натекании пробы в баллон за первые 40 мс режима температура воздуха уменьшалась на  $400 \div 500$  К. Падение ее до 350 К происходило на участке от выхода из канала пробоотборника до баллона в процессе торможения потока до дозвуковой скорости и наполнения баллона. При наличии перед пробоотборником потенциально реагирующего газа этот второй фактор, наряду с теплоотводом от сверхзвукового потока в канале пробоотборника, также может способствовать замораживанию пробы, если время торможения потока и заполнения баллона меньше времени индукции химической реакции, зависящего от давления и температуры в пробе.

Время нахождения частиц пробы в каналах пробоотборника от момента входа в модель до момента попадания в баллон не превышает  $2 \div 3$  мс для всего рассмотренного в статье диапазона параметров. Из них на медный канал со сверхзвуковым потоком приходится  $\approx 0.1$  мс, на канал в стальном переходнике —  $\approx 0.3 \div 0.4$  мс (рассчитывается как течение за прямым скачком), остальное приходится на полости перепускного отверстия, клапана, переходника (4, 10, 11 на рис. 2).

Общий уровень давления в баллоне (при имевших место параметрах работы трубы) всегда оставался значительно меньше атмосферного, что требовало после опыта дожатия пробы до атмосферного давления для проведения химического анализа.

В настоящей работе отобранные пробы анализировались на хроматографе «Кристалл 2000М». Перед каждым анализом выполнялась калибровка хроматографа с использованием поверочной газовой смеси государственного стандартного образца 1-го класса с содержанием компонентов, близким к ожидаемому. Это обеспечивало точность результатов анализа не хуже 2 % от измеряемой величины. Фактическая точность была выше, о чем свидетельствует высокая (разброс не более 2 %) повторяемость результатов многократных измерений.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

### 2.1. Содержание кислорода в рабочем теле установки

На рис. 7 приведены молярные доли кислорода  $r_{O_2}$  в опытах, в которых в качестве

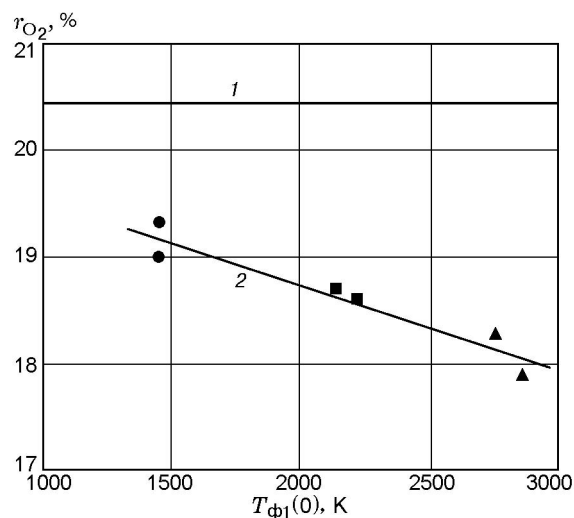


Рис. 7. Содержание кислорода в воздухе:

1 — содержание кислорода в воздухе, накачиваемом в первую ФК до опыта, 2 — содержание кислорода в воздухе, обтекающем модель

РТ установки использовался чистый воздух. Линия 1 соответствует содержанию кислорода в воздухе, который накачивался в первую ФК. В чистом сухом воздухе, обычно принимаемом для расчетов по газодинамическим моделям с горением, молярная доля кислорода равна 20.95 % [6]. В реальном атмосферном воздухе наличие водяных паров и углекислого газа снижает содержание кислорода, в описываемых опытах — до 20.4 % (линия 1). Символы и линия 2 показывают содержание кислорода в воздухе, отобранном в рабочей части установки с помощью пробоотборника 8 (см. рис. 1), в зависимости от температуры воздуха  $T_{\phi 1}(0)$ . Опыты проводили при  $p_{\phi 1}(н) = 36 \div 60$  бар,  $U = 4 \div 4.8$  кВ,  $p_{\phi 1}(0) = 330 \div 380$  бар, диаметр входа в пробоотборник  $d = 2.5 \div 5.5$  мм, объем баллона  $125 \div 570$  см<sup>3</sup>, время отбора пробы (момент закрытия пироклапана от начала режима)  $110 \div 40$  мс в зависимости от диаметра входа и объема баллона.

Из рис. 7 видно, что с увеличением температуры воздуха в первой ФК содержание кислорода в воздухе уменьшается. Происходит это по двум причинам. Во-первых, повышение температуры связано, как правило, с увеличением энергии электрического разряда за счет большего напряжения заряда конденсаторной батареи. Это приводит к большей мощности разряда и, следовательно, к большему выгоранию и окислению электродов. Во-вторых, меж-

ду электродами и корпусом ФК стоят изолирующие вставки, выполненные из фторопласта. Торцевые поверхности изоляторов выгорают тем больше, чем выше температура соприкасающегося с ними воздуха. Об этом же свидетельствует тот факт, что чем выше значение  $T_{\phi 1}(0)$ , тем больше углекислого газа содержится в отобранной пробе (до 2 % при  $T = 3000$  К). При каждом значении  $T_{\phi 1}(0)$  опыты проводили несколько раз. Из рис. 7 видна хорошая повторяемость, что свидетельствует о стабильности действия указанных выше факторов.

Для рассмотренного диапазона  $T_{\phi 1}(0) = 1000 \div 3000$  К зависимость уменьшения содержания кислорода в воздухе от температуры линейная. При воспроизводстве в установке ИТ-302М натуральных энталпий торможения при полете летательных аппаратов с  $M = 7 \div 9$  (температура торможения  $2300 \div 3600$  К) можно ожидать, что содержание кислорода в воздухе, обтекающем модели, уменьшится до  $18 \div 17$  %. Это может потребовать для ряда задач, связанных с изучением в газодинамических моделях процессов сжигания топлива, введения в первую ФК дополнительного кислорода, компенсирующего его выгорание в ФК установки.

## 2.2. Полнота сгорания водорода в форкамере установки

Полноту выгорания водорода в ФК исследовали при  $U = 2.5$  кВ (минимально возможное напряжение для установки ИТ-302М по условиям стабильности дуги) и  $U = 3$  кВ, вклад электрической энергии 250 и 370 кДж соответственно. При  $p_{\phi 1(n)} = 68$  бар это приводило к нагреву воздуха только за счет электрической дуги до 700 и 870 К соответственно. Диаметр входа в пробоотборник  $d = 5.5$  мм, объем баллона  $570$  см<sup>3</sup>, время отбора пробы (момент закрытия пироклапана от начала режима)  $47 \div 55$  мс. В случае  $U = 2.5$  кВ параметры в первой ФК в результате вклада электрической энергии и завершения горения водорода с воздухом составляли  $p_{\phi 1}(0) = 260 \div 209$  бар,  $T_{\phi 1}(0) = 1206 \div 813$  К при  $p_{\phi 1(n)} = 58 \div 68$  бар и  $r_{H_2} = 12.6 \div 2.5$  %. В случае  $U = 3.0$  кВ параметры были следующими:  $p_{\phi 1}(0) = 273 \div 250$  бар,  $T_{\phi 1}(0) = 1293 \div 985$  К при  $p_{\phi 1(n)} = 56 \div 68$  бар и  $r_{H_2} = 7.4 \div 2.6$  %.

При анализе результатов требуется оценить:

1) возможность вторичных реакций в водородовоздушной смеси при течении ее внутри пробоотборника;

2) возможность взаимодействия отбираемой пробы со стенками пробоотборника, выполненными из меди и стали, т. е. оценить роль реакций газ — твердое тело, в которых стенки могут играть роль катализатора; так, водород может выступать как восстановитель в реакциях с оксидами меди и железа, которые присутствуют на поверхности пробоотборника;

3) присутствие на срезе сопла значительных долей атомарных компонентов и радикалов;

4) выравнивание к моменту вскрытия диафрагмы плотности и состава РТ по объему первой ФК.

Относительно п. 1–4 оценки можно сказать следующее.

1. Возможность вторичных реакций в водородовоздушной смеси можно определить из сравнения времени нахождения пробы с водородом в канале пробоотборника с временем индукции и реакции при давлении, температуре и коэффициенте избытка воздуха, которые имеет смесь. В канале пробоотборника со сверхзвуковым потоком невозможны реакции водорода с воздухом из-за низких статических температур и давлений. Даже по максимальным оценкам после прохождения медной части пробоотборника и после торможения в псевдоскачке температура смеси не выше 900 К. При  $T < 900$  К время индукции и реакции водородовоздушной смеси при больших коэффициентах избытка воздуха составляет десятки миллисекунд [7]. Полное время нахождения пробы в каналах пробоотборника до момента попадания ее в баллон, когда она охлаждается до 350 К, не более  $2 \div 3$  мс (см. § 1). То есть времени для вторичных реакций недостаточно.

2. Реакции газ — твердое тело требуют развитых поверхностей, высокой температуры и времени превращения, как минимум, минуты или десятки минут [8, 9]. За время отбора пробы в опытах с водородом  $t = 47 \div 55$  мс слой металла, составляющий внутреннюю поверхность пробоотборника, который при  $t = 0$  имеет комнатную температуру, нагревался (по измерениям тепловых потоков, см. § 1) не более чем на несколько десятков градусов — именно для этого стенки пробоотборника сделаны массивными и из меди. В среднем весь металл пробоотборника нагревается на  $0.1 \div 0.2$  К.

Несколько миллисекунд, в течение которых проба контактирует с поверхностями пробоотборника, недостаточно для протекания реакции между газовой фазой и поверхностью. Таким образом, и температурный, и временной факторы не создают условий для реакции присутствовавшего в пробе водорода со стенками пробоотборника.

3. Диаметр ствола дуги с температурами  $T > 4000$  К (когда можно допустить, что внутри этой области весь водород, входящий в состав продуктов реакции и в несгоревшую часть водорода, и кислород полностью диссоциированы) равен нескольким сантиметрам [10, 11]. При расстоянии в опытах между электродами 6 см доля объема ФК, вовлеченная в полную диссоциацию в дуге, не превышает нескольких процентов от объема первой ФК  $V_{\phi 1} = 9.6$  дм<sup>3</sup>. Оценка времен рекомбинации Н и О (с использованием констант скорости и вида третьей частицы из [7, 12, 13] и в пренебрежении скоростью обратных реакций [7]) показала, что время, в течение которого начальные концентрации Н, О уменьшаются в 100 раз, составляет сотни микросекунд.

Во всех опытах с водородом вскрытие диафрагмы задерживалось на  $40 \div 60$  мс после электрического разряда в ФК. Зависимость  $p_{\phi 1}(t)$  для одного из опытов ( $p_{\phi 1}(н) = 68$  бар,  $U = 3.0$  кВ,  $p_{\phi 1}(0) = 276$  бар,  $T_{\phi 1}(0) = 1086$  К,  $r_{H_2}(н) = 4.5$  %) приведена на рис. 8. Мож-

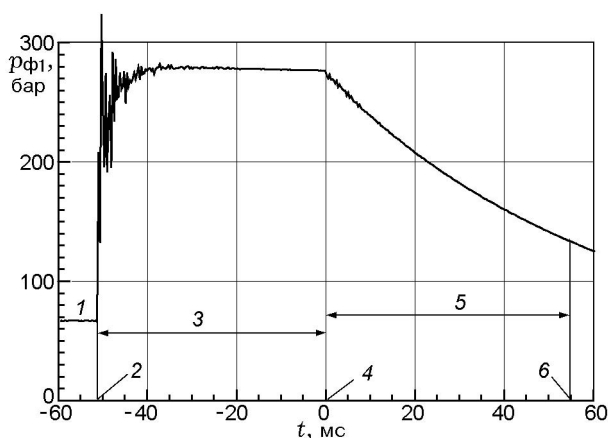


Рис. 8. Давление в первой ФК:

1 — давление накачки рабочего тела в первую ФК до опыта  $p_{\phi 1}(н)$ , 2 — момент разряда, 3 — задержка вскрытия диафрагмы, 51.5 мс, 4 — момент вскрытия диафрагмы — начало режима, 5 — время наполнения баллона, 55 мс, 6 — момент срабатывания отсечного пироклапана

но считать, что спустя  $\approx 20$  мс после разряда ( $t \approx -30$  мс) горение  $H_2$  в ФК прекратилось — на кривой  $p_{\phi 1}(t)$  имеется пологий максимум, который можно интерпретировать как обрыв реакции. После этого максимума давление в ФК начинает падать из-за отвода тепла от РТ к стенкам ФК. Через 51.5 мс после разряда на кривой  $p_{\phi 1}(t)$  четко выделяется момент вскрытия диафрагмы (позиция 4 на рис. 8). Этот момент и считается началом режима в газодинамическом тракте установки. Момент 6 срабатывания отсечного пироклапана регистрируется по напряжению, подаваемому на пиропатрон (7, 8 на рис. 2) пироклапана. В данном опыте время наполнения баллона (5 на рис. 8) составляло 55 мс.

Таким образом, оценки показали, что доля водорода, который разлагался на атомы и ионы под воздействием дуги, составляла несколько процентов от объема водорода, накачиваемого в ФК. И эта доля уменьшалась в 100 раз за сотни микросекунд. То есть времени задержки вскрытия диафрагмы  $40 \div 60$  мс с запасом хватало для почти полного исчезновения атомарных Н, О, образовавшихся в ФК под воздействием дуги, из состава РТ на срезе сопла.

4. В [10] отмечается, что по окончании разряда температура в ФК выравнивается за время  $\approx 1$  мс. Кроме того, косвенные факты (такие, как отсутствие аномалий при регистрации давлений в первой ФК, скорости, измеряемые РИВ-методом, и др.) также свидетельствуют о «быстром» (порядка миллисекунды) осреднении параметров по объему ФК. Это тем более справедливо при задержке вскрытия диафрагмы на  $40 \div 60$  мс после разряда.

На рис. 9 приведена доля непрореагировавшего водорода  $r_{H_2}/r_{H_2}(н)$  в зависимости от молярной концентрации водорода  $r_{H_2}(н)$ , накачиваемого в первую ФК совместно с воздухом, при двух значениях электрической энергии, вкладываемой в первую ФК. Здесь  $r_{H_2}$  — молярная концентрация водорода в пробе. Видно, что даже в случае очень бедных водородовоздушных смесей, концентрация водорода в которых ниже концентрационного предела воспламенения при нормальных условиях ( $r_{H_2}(н)$  до 2.5 %), доля несгоревшего водорода невелика — около 10 %. Расширение концентрационной границы связано с предварительным нагревом смеси за счет электрического разряда. С увеличением  $r_{H_2}(н)$  и вклада электрической энергии доля несгоревшего водорода быст-



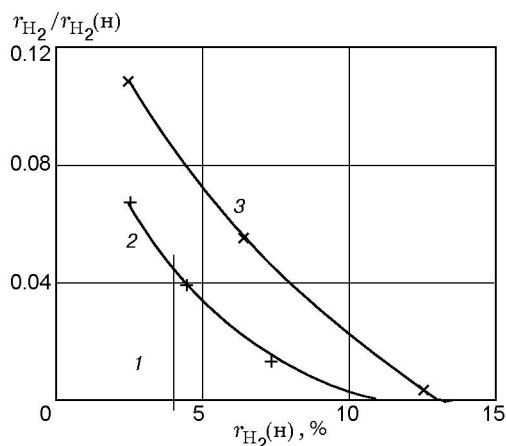


Рис. 9. Доля не прореагировавшего в ФК водорода в пробе, отобранной из рабочей части установки:

1 — нижняя концентрационная граница воспламенения водорода в воздухе при нормальных условиях, 2 — опыты при  $U = 3.0$  кВ, 3 — опыты при  $U = 2.5$  кВ

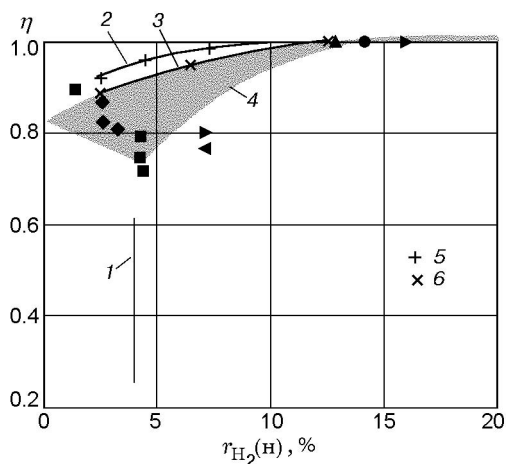


Рис. 10. Полнота сгорания водорода в первой ФК:

1 — нижняя концентрационная граница воспламенения водорода в воздухе при нормальных условиях; 2, 5 — опыты при  $U = 3.0$  кВ; 3, 6 — опыты при  $U = 2.5$  кВ; 4 и другие темные знаки — расчет  $\eta$  газодинамическим методом из [1],  $U = 2.5$  кВ

ро уменьшается и при  $r_{H_2(n)} = 10 \div 12$  % становится практически равной нулю. У очень бедных смесей пламя прекращает распространяться и не захватывает весь объем ФК.

На рис. 10 доля не сгоревшего в первой ФК водорода пересчитана на полноту сгорания  $\eta$ , определяемую по формуле

$$\eta = 1 - r_{H_2}/r_{H_2(n)}. \quad (2)$$

Сравним величину  $\eta$  с полнотой сгорания, оцененной в [1] газодинамическим методом. Суть оценки в [1] сводилась к сопоставлению расчетного значения давления  $p_{\phi 1}^{\text{расч}}$ , полученного в результате подвода тепла в изохорном процессе за счет электрического разряда и полного сгорания водорода, с экспериментальным значением  $p_{\phi 1}$ , и делался вывод о полноте выгорания водорода в ФК. Когда  $p_{\phi 1}^{\text{расч}}$  и  $p_{\phi 1}$  близки, то полнота сгорания практически равна единице, поскольку для определения  $p_{\phi 1}^{\text{расч}}$  использовались только исходная плотность и стандартная полная внутренняя энергия исходной смеси, а также вкладываемая электрическая энергия и не привлекались какие-либо допущения и тепловой эффект реакции. Когда  $p_{\phi 1} < p_{\phi 1}^{\text{расч}}$  и, следовательно,  $\eta < 1$ , для определения  $\eta$  приходилось привлекать допущения, которые приводили к большому разбросу значений  $\eta$ , тем большему, чем  $p_{\phi 1}$  меньше  $p_{\phi 1}^{\text{расч}}$  (см. [1]).

Как видно из рис. 10, полнота сгорания водорода, полученная по измерениям непрореагировавшего водорода в пробе, отобранной из рабочей части установки, достаточно хорошо совпадает с полнотой сгорания, определенной в ФК газодинамическим методом. Такое совпадение служит в то же время косвенным подтверждением отсутствия реакций внутри пробоотборника.

Заметим, что использование химической энергии для увеличения энергетики установки имеет смысл, только когда исчерпаны возможности подвода тепла за счет электрической энергии, т. е. при максимальном значении  $U$  (для установки ИТ-302М  $U_{\text{max}} = 5$  кВ) и при  $r_{H_2} > 5 \div 7$  %. Как следует из рис. 9 и 10, при этом  $\eta$  будет практически равна единице.

## ВЫВОДЫ

- Разработана система отбора пробы из рабочей части высокоэнтальпийной установки кратковременного режима, обеспечивающая жесткие требования по времени отбора и синхронизации с режимом установки в условиях высоких параметров торможения РТ.

- Методика отбора пробы с разгоном ее в длинном узком канале и теплоотводом от пробы к поверхностям внутреннего тракта пробоотборника обеспечивает предотвращение в пробе повторных химических реакций.

- В гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М с электродуговым по-

догревом РТ при нагреве воздуха до 3000 К содержание в нем кислорода уменьшается с 21 до 18 %, что для ряда испытаний с газодинамическими моделями с горением может потребовать введения в ФК кислорода, компенсирующего его выгорание.

• При горении очень бедных водородовоздушных смесей, концентрация водорода в котлах ниже концентрационных пределов воспламенения при нормальных условиях ( $r_{\text{H}_2}(\text{н})$  до 2.5 %), вследствие прекращения распространения пламени полнота сгорания водорода в ФК составляет  $\approx 0.9$ . Полнота сгорания быстро приближается к единице при увеличении концентрации водорода в ФК и вклада электрической энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шумский В. В., Ярославцев М. И. Химический нагрев рабочего тела высокоэнтальпийной установки кратковременного режима // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 31–43.
2. Рожицкий С. И., Строкин В. Н. К методике отбора газовой пробы из сверхзвукового реагирующего потока // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 4. — С. 492–498.
3. Левин В. М., Мироненко В. А., Солохин Э. Л. Устройство для отбора химически активной пробы газа: а. с. 463029. 1972.
4. Основы газовой динамики / под ред. Г. Эммонса. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
5. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1991.
6. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / под ред. В. П. Глушко. — М., 1973. — Т. 3.
7. Щетинков Е. С. Физика горения газов. — М.: Наука, 1965.
8. Некрасов Б. Н. Курс общей химии. — М.: Химгиз, 1962.
9. Барре П. Кинетика гетерогенных процессов. — М.: Мир, 1976.
10. Королев А. С., Бошняков Б. В., Друкер И. Г., Затолока В. В. Импульсные трубы в аэродинамических исследованиях. — Новосибирск: Наука, 1978.
11. Залесский А. М. Электрическая дуга отключений. — М.: Энергоиздат, 1963.
12. Гардинер У., мл. Химия горения. — М.: Мир, 1988.
13. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. — М.: Физматлит, 2003.

*Поступила в редакцию 22/II 2011 г.,  
в окончательном варианте — 12/VII 2011 г.*