

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 629.7.036 : 536.46 + 53.084.83 + 53.082.721

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ГАЗОВОГО ПОТОКА В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТРУБАХ*

В. Д. Анцыгин¹, С. М. Борзов¹, А. А. Маслов²,
О. И. Потатуркин¹, В. В. Шумский², М. И. Ярославцев²

¹ *Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: antsign@iae.nsk.su*

² *Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1*

Предложена методика отбора пробы в гиперзвуковых аэродинамических установках импульсного действия. Показано, что созданный на ее основе пробоотборник обеспечивает отвод тепла с целью «замораживания» пробы и способствует получению достоверной информации о составе гиперзвукового газового потока. Разработана и создана система диагностики многокомпонентных газовых смесей на основе малогабаритных сенсоров. Апробация этой системы на гиперзвуковой импульсной трубе ИТ-302М показала, что результаты измерений верно отражают тенденцию изменения концентрации кислорода в зависимости от энергии потока, однако дают заниженные значения относительно истинных приблизительно на 2 %. Обсуждаются возможные причины такого поведения сенсора.

Ключевые слова: гиперзвуковые потоки, аэродинамические импульсные трубы, отбор пробы, измерение компонентного состава смеси, малогабаритные сенсоры.

Введение. При исследованиях в аэродинамических трубах газодинамических моделей с горением требуется воспроизводить натурные давления и температуры торможения [1], так как от них значительно зависят скорости химических реакций, условия воспламенения, особенно самовоспламенения, и закономерности выделения тепла по длине модели. Если целью испытаний является определение тяговых характеристик, то необходимо также учитывать относительный подогрев рабочего тела моделей, от которого напрямую зависят их силовые параметры. Подогрев пропорционален отношению энтальпии торможения продуктов сгорания в модели к энтальпии торможения набегающего потока. Поэтому при испытаниях газодинамических моделей с горением, кроме обычных для аэродинамического эксперимента требований — выдерживать критерии Маха, Рейнольдса и др., — необходимо выдерживать абсолютные значения энтальпии, давления и температуры. Для гиперзвуковых скоростей воспроизводить в комплексе указанные параметры возможно только в высокоэнтальпийных установках кратковременного действия [2, 3].

Опыт применения таких установок для исследования моделей гиперзвуковых воздушно-реактивных двигателей показал, что создание потоков с требуемыми параметрами за счет только электрического разряда или только адиабатического сжатия, как правило, невозможно [4, 5]. Поэтому были рассмотрены альтернативные пути решения этой проблемы. Основные идеи связаны с использованием для повышения энтальпии рабочего

*Работа выполнена при поддержке Президиума СО РАН (Заказной междисциплинарный интеграционный проект № 4).

тела (РТ) установки тепла от сгорания горючих газов, накачиваемых в форкамеру (ФК) вместе с воздухом [6, 7]. Эксперименты на гиперзвуковой аэродинамической импульсной трубе ИТ-302М показали [7], что применение водорода, пропана, закиси азота позволяет создавать РТ высокоэнтальпийной установки с натурными параметрами торможения (числами Маха $M = 4-7$) как при полете летательного аппарата. Однако в этой работе вопрос о наличии в рабочем теле несгоревших в ФК горючих компонентов до конца не решен. Газодинамический метод определения полноты сгорания, использованный в [7], дает надежное значение полноты сгорания только при высоких концентрациях горючих компонентов. Для «бедных» горюче-воздушных смесей, когда полнота сгорания меньше единицы, газодинамический метод дает лишь приблизительную оценку. Отбор газовых проб для последующего определения состава является естественным и наиболее удобным способом определения степени завершенности химических реакций в газовом потоке. Анализировать отобранную пробу можно различными способами, но желательно иметь методику и аппаратуру, позволяющие выполнять экспресс-анализ РТ установки, независимо от вида проводимых исследований.

Целью данной работы является создание методов пробоотбора в гиперзвуковых высокоэнтальпийных установках кратковременного действия, экспериментальное исследование малогабаритных сенсоров, создание и апробация на аэродинамической импульсной трубе ИТ-302М системы анализа компонентного состава газовой смеси.

Схема проведения экспериментов и особенности определения состава газовой смеси с помощью отбора проб. Эксперименты проводились на импульсной трубе [8] следующей комплектации: первая ФК, вторая ФК, профилированное сопло с диаметром среза 300 мм, рассчитанное на число Маха на срезе $M = 6$, и рабочая часть установки, в которой размещается испытываемая модель. Первая ФК отделяется от остального газодинамического тракта установки стальной диафрагмой толщиной 2 мм. Перед началом эксперимента в первую ФК накачивается либо чистый воздух в случае использования энергии электрического разряда, либо смесь воздуха с горючими газами при использовании дополнительно химической энергии от сгорания горючих газов. В данной работе рассматривается нагрев только с помощью электрического разряда. Давление воздуха, накачиваемого в первую ФК при комнатной температуре, варьировалось в диапазоне 35–70 бар, напряжение зарядки конденсаторной батареи — в диапазоне 2,5–4,8 кВ. После разряда конденсаторной батареи давление в первой ФК в разных опытах повышалось до 180–375 бар, температура воздуха — от комнатной до 700–2860 К. При повышении давления в ФК диафрагма разрывается и РТ установки начинает поступать из ФК через сопло, создавая в рабочей части гиперзвуковой поток. Поскольку истечение происходит из замкнутого объема первой ФК, то температура и давление торможения воздуха в течение режима непрерывно уменьшаются. Однако число Маха потока в рабочей части установки практически не изменяется, поскольку оно определяется преимущественно геометрией сопла.

Специфика отбора пробы на срезе сопла установки заключается в следующем:

1. Время обтекания модели в установке ~ 100 мс. За определенную часть данного интервала времени необходимо произвести отбор пробы газа в емкость (баллон) и практически мгновенно (за ~ 1 мс) закрыть баллон. Поскольку длительность времени обтекания невелика и параметры РТ установки изменяются со временем, то требуется жесткая синхронизация работы системы пробоотбора с режимом работы установки.

2. Число Маха потока на срезе сопел $M = 5-10$, температура торможения 1000–3000 К, давление торможения составляет несколько десятков и сотен бар. Если полнота реакции в отбираемой пробе меньше единицы, при таких параметрах внутри пробоотборника могут возникнуть условия, вызывающие догорание отобранного газа. Поэтому методика отбо-

ра и конструкция пробоотборника должны исключить возможность догорания продуктов внутри него, т. е. должно обеспечиваться надежное «замораживание» пробы.

3. Объем баллона, в который отбирается проба, и площадь входа в пробоотборник должны подбираться таким образом, чтобы в процессе натекания давление в баллоне было в несколько раз меньше давления в канале пробоотборника для предотвращения быстрого перемещения псевдоскачка в канале вверх по потоку и срыва втекания. При отборе пробы на срезе сопла давление отобранного в баллон газа получается меньше атмосферного (0,1–0,2 бара), поэтому для проведения химического анализа необходимо предусмотреть сжатие пробы до атмосферного давления.

4. Используемые сенсоры должны сохранять свою работоспособность после кратковременного вакуумирования, поскольку перед началом эксперимента рабочая часть установки и находящаяся в ней система пробоотбора откачивается до давления $\sim 10^{-2}$ мм. рт. ст.

5. Механизм отсечки пробы и запираания баллона должен обеспечивать абсолютную герметичность объема с отобранном газом.

Схема отбора проб. Отбор проб из гиперзвукового потока осуществлялся с помощью специально разработанной модели, схема внутренних каналов одного из вариантов которой приведена на рис. 1. Пробоотборная часть 1 модели выполнена массивной из меди для того, чтобы обеспечить интенсивный отвод тепла от забираемой пробы. В этой части модели поток в течение всего времени отбора пробы должен сохраняться сверхзвуковым. Канал пробоотборника 2 изготовлен расширенным от $d = 2,5$ – $5,5$ мм на входе до $d = 7$ – 9 мм на выходе (в разных вариантах модели) для компенсации нарастающего пограничного слоя. Канал заканчивается стальным переходником 3, соединенным с полостью 10 корпуса пироклапана переходным отверстием 4, и хвостовой заглушкой 5. Пироклапан 9 снабжен зарядом взрывчатого вещества 8 и электродом 7, изолированным от корпуса с помощью изолятора 6. Полость пироклапана через переходник 11 соединена с баллоном 12. Поршень 13 баллона служит для сжатия пробы после завершения опыта до атмосферного давления, 14 — упорная втулка поршня.

Перед экспериментом объем 8 пироклапана заполняется смесью пороха с алюминиевой пудрой. Поршень пироклапана перемещается вперед до упора. При этом газовый тракт модели (каналы пробоотборника и переходников 3, 11, полости пироклапана и баллона, дренажные трубки, полости всех датчиков) сообщается с рабочей частью установки.

Перед запуском аэродинамической трубы проводится вакуумирование рабочей части установки. При этом вакуумируется и газовый тракт модели. После начала обтекания модели начинается заполнение баллона отбираемой пробой. Образуется псевдоскачок [9], переводящий сверх- или гиперзвуковой поток в дозвуковой. По достижении определенного давления в баллоне и при требуемой структуре течения в канале подается сигнал на подрыв порохового заряда (момент подрыва определяется опытным путем по показаниям

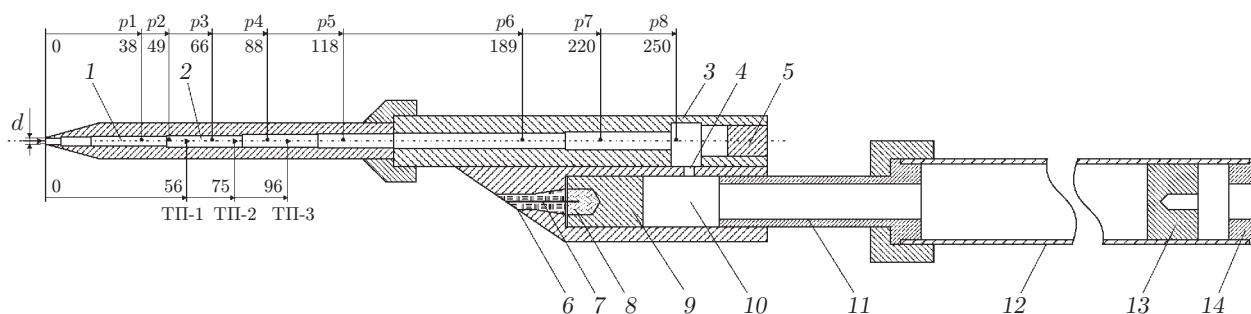


Рис. 1

датчиков давления $p1-p8$). Поршень пироклапана смещается в крайнее заднее положение и отсекает баллон от канала пробоотборника.

Ось пробоотборника совпадает с осью сопла установки, а его входное отверстие d располагается на расстоянии 10–15 мм от среза сопла вниз по потоку.

Течение в пробоотборнике. Давление, измеренное в точках $p1-p5$ по длине канала пробоотборника, позволяет оценить в нем значения чисел Маха исходя из уравнения расхода, записанного для сечения входа в пробоотборник и любого сечения канала. Эти оценки показывают, что для случая, когда псевдоскачок еще не достиг канала, поток остается сверхзвуковым с числом Маха, близким или превышающим число Маха в рабочей части установки. При этом статическое давление и температура отбираемой пробы дополнительно падают по сравнению с теми значениями, которые они имели в месте отбора. Проба «замораживается». Длина канала выбирается такой, чтобы за счет теплоотдачи холодным стенкам пробоотборника температура торможения пробы уменьшилась и после торможения не происходило повторной реакции непрореагировавшей части пробы [10].

На рис. 2 приведены значения давлений в некоторых точках тракта в ряде экспериментов с моделью. При открытой хвостовой заглушке давление как в точке $p5$ (кривая 1), так и по всей длине канала до его выхода из модели в течение всего режима близко к давлению набегающего потока. Это свидетельствует о том, что нигде в канале 2 и переходнике 3 не происходит торможения потока до дозвуковой скорости. Натекание пробы в баллон практически отсутствует.

При закрытой хвостовой заглушке в переходнике 3 возникает псевдоскачок, который в момент времени $t = 45-50$ мс из переходника начинает перемещаться в канал. Давление в точке $p5$ постепенно увеличивается (кривая 3) и к концу режима выравнивается с давлением за прямым скачком уплотнения на срезе сопла (кривая 4). Такое пространственно-временное поведение потока внутри пробоотборника определило выбор времени отбора пробы $t = 45-50$ мс, в течение которого по длине собственно пробоотборника сохраняется сверхзвуковой поток газа. Срабатывание клапана должно происходить именно до этого момента. До срабатывания клапана происходит натекание пробы в баллон и давление повышается (кривая 2). После запираания пробы пироклапаном давление в баллоне падает за счет теплоотвода к холодным стенкам.

Падение давления после охлаждения газа до комнатной температуры составляло величину не более 20 % от давления в момент закрытия клапана. Отсюда из закона Шарля следует, что при имевшихся в данном эксперименте параметрах ($t = 0-50,4$ мс,

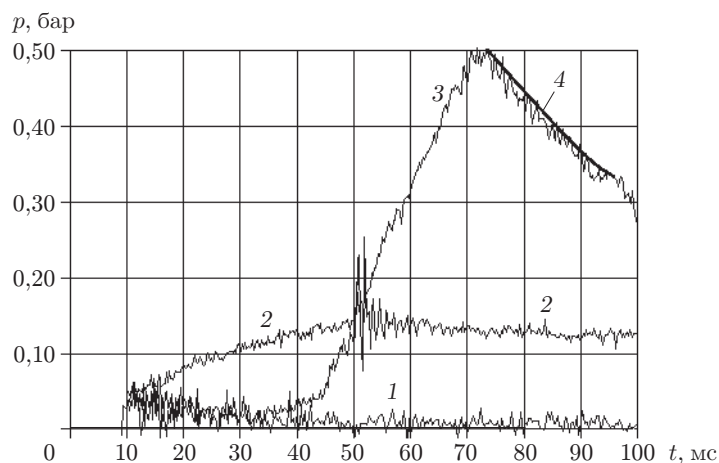


Рис. 2

$p = 300\text{--}95$ бар, $T = 1600\text{--}1180$ К) в момент закрытия клапана температура отобранного газа в баллоне не превышала 350 К. Это свидетельствует о том, что, во-первых, в баллон поступает уже охлажденный газ, во-вторых, в переходниках, в переходном отверстии, в полости клапана и в самом баллоне происходит сильный теплоотвод от газа к холодным стенкам модели. Анализ тепловых потоков показал, что при прохождении пробы по каналу ее температура падала на величину 400–500 К. Остальное снижение до температуры 350 К происходило от выхода из канала до баллона в процессе торможения потока до дозвуковой скорости и наполнения баллона. При наличии перед пробоотборником реагирующего газа этот (второй) фактор, наряду с теплоотводом от сверхзвукового потока в канале, также может способствовать замораживанию пробы, если время торможения потока и заполнения баллона меньше времени индукции химической реакции, зависящего от давления и температуры в пробе.

Таким образом, проведенные исследования показали, что созданная система отбора из потока в рабочей части обеспечивает сверхзвуковое течение газа (в том числе и дальнейший его разгон) в узком длинном канале, отбор тепла с целью замораживания и недопущения повторного догорания, т. е. получение представительной пробы.

Общий уровень давления в баллоне (при имевшихся параметрах работы трубы) всегда оставался значительно меньше атмосферного, что требовало после эксперимента сжатия пробы до атмосферного давления в целях проведения анализа ее состава.

Сенсоры и регистрирующая аппаратура. Исходя из требований малых размеров и способности выдерживать разрежение до 10^{-2} мм. рт. ст., для измерения концентрации кислорода был выбран твердоэлектродный сенсор KGZ-10 фирмы “Honeywell” (США) с чувствительным элементом из окиси циркония, для измерения концентрации водорода — МДП-емкостный сенсор Д-1, созданный в Московском инженерно-физическом институте. Чувствительный элемент сенсора кислорода KGZ-10 состоит из двух дисков окиси циркония. Между ними находится измерительный объем. Один из дисков выполняет роль селективной помпы, которая последовательно закачивает и откачивает кислород в измерительный объем. Второй диск используется для измерений разности парциальных давлений кислорода в измерительном объеме сенсора и в окружающей среде. При этом время, за которое концентрация в измерительном объеме меняется от минимума до максимума, пропорционально концентрации кислорода в окружающей среде. Основным элементом сенсора Д-1 является МДП-структура $\text{Pd-Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-Si}$, электрическая емкость которой изменяется при взаимодействии с водородом. Для измерения концентрации водорода необходимо определить приращение емкости, которое возникает при подаче его в контролируемый объем.

Для исследования сенсоров газов разработана и создана система тестирования, которая представлена на рис. 3. В ее состав входят: четырехканальный генератор газовой смеси (поток до 1,4 л/мин, погрешность каждого компонента менее 10 ppm (миллионная доля)); блок хранения и регулируемой подачи газов; измерительная камера с системой вакуумирования (1); блок управления и обработки данных (2).

Формирование требуемой газовой смеси осуществляется путем смешивания отдельных компонентов, подаваемых на входы генератора. Перед началом эксперимента магистраль системы вакуумирования и измерительная секция откачиваются форвакуумным насосом. В бустерной секции посредством генератора создается смесь требуемого состава. Затем клапан между магистралью системы вакуумирования и измерительной камерой закрывается, а клапан между секциями открывается. Происходит перераспределение газовой смеси между бустерной и измерительной секциями. При этом за счет компенсатора давление выравнивается с атмосферным. Далее осуществляется измерение сигналов сенсоров.

Данная система позволяет тестировать газовые сенсоры в условиях, близких к условиям проведения измерений параметров газовых потоков с горением в установках крат-

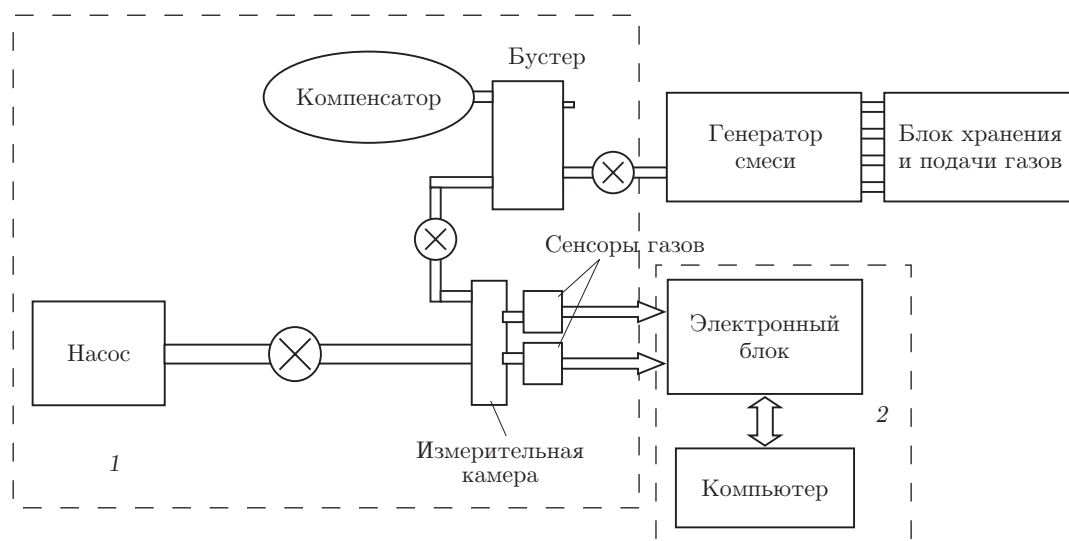


Рис. 3

ковременного действия. Единственным отличием исследований на реальных установках является подача смеси не от генератора, а из баллона пробоотборника.

В целях исследования влияния концентрации измеряемых газовых компонентов на чувствительный элемент сенсоров осуществлялась регистрация их показаний при подаче смеси азота с соответствующим газом в различных пропорциях.

Установлено, что интервал времени между импульсами тока, регистрируемыми с чувствительного элемента сенсора KGZ-10, прямо пропорционален концентрации кислорода в исследуемой газовой смеси (рис. 4).

Зависимость емкости сенсора Д-1 от концентрации водорода имеет нелинейный характер (рис. 5). Сенсор обладает наибольшей чувствительностью в области концентрации водорода до ~ 100 ppm, а при больших концентрациях чувствительность (следовательно, и точность измерений) резко снижается. При этом в отсутствие водорода емкость МДП-структуры для партии сенсоров имеет значение порядка 600–900 пф и довольно большой разброс угла диэлектрических потерь.

Для обеспечения функционирования сенсоров разработана и создана модульная система анализа компонентного состава газовой смеси, обеспечивающая подключение до восьми датчиков различного типа. Электронный блок системы состоит из процессорного модуля

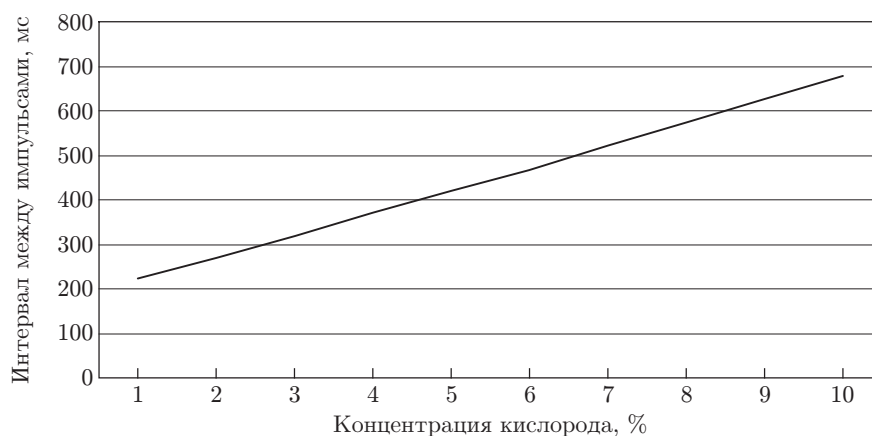


Рис. 4

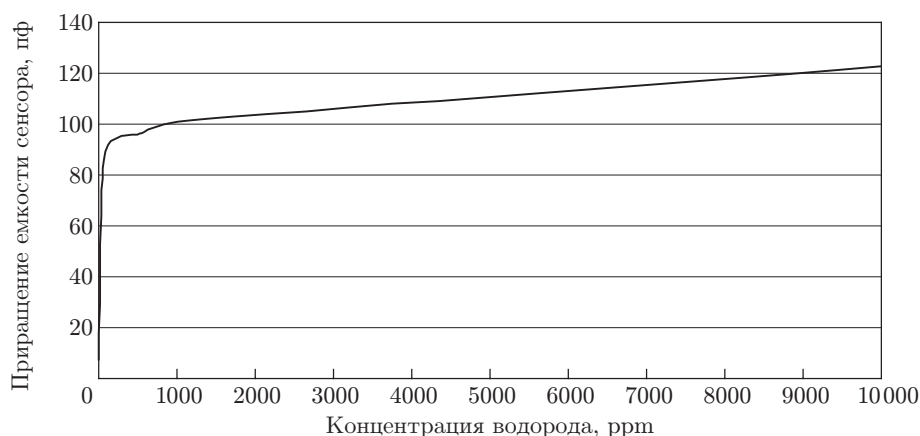


Рис. 5

и плат предварительного усиления и преобразования сигналов сенсоров. Все электронные компоненты подсистемы расположены в едином корпусе, выполненном в виде крейта. Процессорный модуль разработан на основе микроконтроллера ATmega103, который позволяет одновременно обрабатывать сигналы всех входящих в состав электронного блока аналоговых модулей и передавать полученные данные по каналу RS-232 в компьютер.

Каждый сенсор располагается в отдельной измерительной камере. Подача контролируемой смеси в измерительные объемы осуществляется из баллона пробоотборника по металлическим трубкам, впаянным в торец каждой измерительной камеры. Суммарный объем всех измерительных камер и соединительных трубок не превышает 15 см³.

Установлено, что все исследуемые сенсоры сохраняют свою работоспособность после кратковременного (~10 мин) пребывания в вакууме. Однако у МДП-датчиков водорода наблюдаются изменения емкости и угла диэлектрических потерь, что требует калибровки сенсора после каждого цикла откачка—измерение или изменения конструкции измерительной камеры и использования системы дополнительных клапанов. По этой причине апробация разработанного метода пробоотбора и системы анализа в реальных условиях проводилась на примере измерения концентрации кислорода.

Измерение концентраций кислорода в рабочем теле установки. С помощью изложенной выше методики определено содержание кислорода в РТ установки для случая, когда в первую ФК накачивался чистый воздух. Мольные доли кислорода r в проведенных экспериментах в зависимости от температуры T воздуха в первой ФК после электрического разряда приведены на рис. 6. Кривая 1 соответствует содержанию кислорода в воздухе, который накачивался в первую ФК. В чистом сухом воздухе, обычно принимаемом для газотермодинамических расчетов, мольная доля кислорода равна 20,95 % [11]. В реальном атмосферном воздухе наличие водяных паров и углекислого газа снижает содержание кислорода. В данных экспериментах снижение происходило до 20,4 % (кривая 1).

Из рис. 6 видно, что с увеличением температуры воздуха в первой ФК содержание кислорода в пробе уменьшается (символы и кривая 2). Происходит это по двум причинам. Во-первых, увеличение 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, между электродами и корпусом ФК стоят изоляторы, выполненные из фторопласта. Торцевые поверхности изоляторов выгорают тем больше, чем выше температура соприкасающегося с ними воздуха. Об этом также свидетельствует следующий факт: чем выше T в начале обтекания, тем большее количество углекислого газа содержится в отобранной пробе. При каждом значении T эксперименты проводились

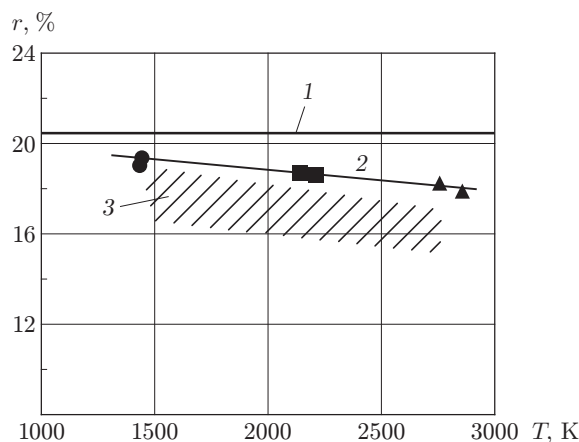


Рис. 6

несколько раз. Из рис. 6 видна хорошая повторяемость измерений, что подтверждает стабильность действия факторов, влияющих на выгорание кислорода в ФК.

Химический анализ проб, взятых из баллона 12 (см. рис. 1) и изображенных на рис. 6 символами и кривыми 1, 2, проводился на хроматографе. Перед каждым анализом выполнялась калибровка хроматографа с использованием поверочной газовой смеси 1-го класса с содержанием кислорода 20,82 %. Это обеспечивало точность получения результатов анализа не хуже 2 % от измеряемой величины. Фактическая точность была выше, о чем свидетельствует высокая (менее 2 %) повторяемость многократных измерений, выполненных во всем диапазоне рассмотренных выше параметров работы установки. Это позволило в данном исследовании принимать результаты, полученные на хроматографе, за истинные значения концентрации кислорода.

Измерения концентрации кислорода с помощью малогабаритного сенсора привели к неожиданным результатам. В начальный момент измерений показания сенсора TGZ-10 в 2–2,5 раза превышают истинную концентрацию, а затем плавно уменьшаются и в течение 8–10 ч стабилизируются на некотором уровне ниже ожидаемого. Как видно из рис. 6, установившиеся показания (область 3) верно отражают тенденцию изменения концентрации, однако дают значительную ошибку. Значения концентрации кислорода в пробах, полученные с помощью TGZ-10, систематически ниже истинных примерно на абсолютных 2 %.

Отметим, что данные эффекты зафиксированы только при проведении экспериментов на импульсной трубе, при измерениях на системе тестирования газовых сенсоров они не наблюдаются: показания TGZ-10 устанавливаются в течение десятка секунд после запуска смеси и воспроизводятся с точностью 0,3 %. Основным отличительным моментом проведения измерений на трубе является наличие мощного электрического разряда, запускающего ударную волну. Можно предположить, что одной из причин наблюдаемого релаксационного поведения сенсора TGZ-10 может быть распад озона, образующегося при разряде в ФК, на высокотемпературной поверхности сенсора. Как известно, время жизни озона при комнатных температурах составляет около 10 ч, тогда как при нагреве до 200 °С — секунды. В свою очередь, отклонение установившихся значений концентрации кислорода от истинных может объясняться тем, что в смеси после взрыва имеются горючие компоненты, которые, связываясь с кислородом на поверхности сенсора, уменьшают регистрируемые прибором значения.

Заключение. Разработана методика отбора пробы из потока в рабочей части гиперзвуковой аэродинамической импульсной трубы. Показано, что созданная на ее основе система обеспечивает дальнейший разгон потока в расширяющейся начальной части узкого

длинного канала, отбор от потока тепла с целью замораживания и получение представительной пробы.

На основе малогабаритных сенсоров разработана и создана система диагностики, предназначенная для измерения концентрации кислорода и водорода в многокомпонентных газовых смесях. Проведена ее апробация на гиперзвуковой аэродинамической импульсной трубе ИТ-302М. Установлено, что полученные значения верно отражают тенденцию изменения концентрации кислорода, однако имеют отклонение от значений аналитических лабораторных измерений. Причины этого отклонения являются предметом дополнительного детального изучения.

При воспроизводстве в установке ИТ-302М натуральных энтальпий, соответствующих полетам летательных аппаратов с $M = 7-9$ (температура торможения 2300–3600 К), следует ожидать, что содержание кислорода в воздухе, обтекающем модели, будет уменьшаться на несколько абсолютных процентов. Это может потребовать для ряда задач, связанных с изучением процессов сжигания топлива в газодинамических моделях, введения в первую форкамеру дополнительного кислорода, компенсирующего его выгорание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И.** Некоторые методические аспекты исследования газодинамических моделей с тепломассоподводом в импульсной аэродинамической трубе // ФГВ. 1987. **23**, № 5. С. 45–54.
2. **Кислых В. В.** Высокоскоростные импульсные трубы. Сравнительный анализ и перспективы развития // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Жуковский: ЦАГИ, 2004. С. 467–468.
3. **Топчийн М. Е., Харитонов А. М.** Аэродинамические трубы для гиперзвуковых исследований // ПМТФ. 1994. **35**, № 3. С. 66–81.
4. **Третьяков П. К., Шумский В. В.** Газодинамика течений с подводом массы и энергии. Современные проблемы аэрогидромеханики // Сб. тр. Симпозиума, посвященного 85-летию со дня рождения академика В. В. Струминского. М.: РАН ИПРИМ, 1999. Т. 2. С. 75–85.
5. **Гулько Ю. П., Звезгинцев В. И., Мажуль И. И. и др.** Испытания модели гиперзвукового прямооточного двигателя в аэродинамической трубе при больших числах Маха и Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика. 2003. **10**, № 3. С. 321–345.
6. **Шумский В. В.** Использование в высокоэнтальпийных установках химического подогрева и адиабатического сжатия для расширения диапазона исследований газодинамических моделей с горением // Изв. СО АН СССР. Сер. Технические науки. 1990. Вып. 5. С. 149–156.
7. **Шумский В. В., Ярославцев М. И.** Химический нагрев рабочего тела высокоэнтальпийной установки кратковременного режима // ФГВ. 2007. **43**, № 5. С. 31–43.
8. **Шумский В. В., Ярославцев М. И.** Экспериментальное исследование создания и нагрева за счет химических реакций рабочего тела импульсной аэродинамической трубы // Современные проблемы аэрогидромеханики: Сб. тр. Всеросс. симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения академика В. В. Струминского. М.: ИПРИМ РАН, 2004. С. 27–37.
9. **Основы газовой динамики** /Под ред. Г. Эммонса. М.: ИЛ, 1963.
10. **Рожицкий С. И., Строкин В. Н.** К методике отбора газовой пробы из сверхзвукового реагирующего потока // ФГВ. 1974. **10**, № 4. С. 492–498.
11. **Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания** /Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука, 1973. Т. 3. 624 с.

Поступила в редакцию 10 ноября 2008 г.