

ХИМИЧЕСКИЙ НАГРЕВ РАБОЧЕГО ТЕЛА ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ УСТАНОВКИ КРАТКОВРЕМЕННОГО РЕЖИМА

В. В. Шумский, М. И. Ярославцев

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

Экспериментально исследована работа высокоэнтальпийной установки кратковременного режима при использовании в качестве рабочего тела продуктов реакций пропана, водорода, закиси азота с воздухом и кислородом. Зажигание смесей производилось либо электрической дугой, либо поджигающим устройством, работающим по форкамерно-факельному принципу при локальном воспламенении смеси от одного очага воспламенения, расположенного в центре форкамеры. Подтверждено, что использование комбинированного (электрического и химического) нагрева рабочего тела позволяет полностью решить вопрос воспроизведения натуральных значений давления и энтальпии торможения для условий полета летательного аппарата с числами Маха $4 \div 7$. Нижние концентрационные пределы зажигания при воспламенении от электрической дуги оказались ниже литературных данных, полученных при нормальных условиях. Сгорание трехкомпонентных (горючее + кислород + воздух) смесей с водородом при молярной доле водорода $r_{\text{H}_2} > 0.1$ и смесей с пропаном при $r_{\text{C}_3\text{H}_8} > 0.027$ завершалось за $5 \div 8$ мс с полнотой сгорания, близкой к единице. Время завершения химических реакций при зажигании от поджигающего устройства значительно выше, чем при зажигании от электрической дуги. Существенно уменьшить время сгорания при зажигании от поджигающего устройства можно за счет увеличения количества очагов воспламенения; использования смесей с большим содержанием горючего, чем требуется для воспроизведения натурной энтальпии; замены в исходной смеси части горючего закисью азота.

Ключевые слова: высокоэнтальпийная установка, форкамера, электрический разряд, форкамерно-факельное устройство, химический подогрев, водород, пропан, закись азота, натурные параметры полета.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–6] были рассмотрены основные газодинамические, термодинамические и конструктивные вопросы, связанные с созданием и работой высокоэнтальпийной установки кратковременного режима, позволяющей воспроизводить натурные, постоянные в течение $0.1 \div 0.5$ с параметры полета летательного аппарата для диапазона чисел Маха от 4 до $7 \div 8$. При $M < 6$ рассматривался, в том числе, полет в плотной среде со скоростным напором до ≈ 20 бар. Как правило, в установках с размерами сопел $\gtrsim 0.5$ м для воспроизводства натуральных условий полета при $M = 4 \div 8$ не хватает энергетики для нагрева рабочего тела только за счет электрического разряда или адиабатического сжатия. Приходится привлекать иные источники увеличения энтальпии, в том числе сжигание горючих. В [1–4] было показано, что нагрев рабочего тела за счет химической реакции позволяет решить все проблемы энергетики такой установки с достаточно большим

объемом форкамеры — $V_{\text{ф}} = 50 \div 100$ дм³.

Применение водорода, пропана и их комбинаций с закисью азота для создания рабочего тела позволяет в широких пределах изменять его свойства, обеспечивая содержание в ней доли кислорода, равной его доле в атмосферном воздухе. Это особенно важно для исследования на моделях задач, связанных с процессами горения и выделения тепла за счет сгорания горючих. Причем содержание воды и углекислого газа в рабочем теле может быть существенно уменьшено заменой в исходной смеси части водорода или пропана закисью азота [1–4]. В принципе в качестве рабочего тела может быть получен и чистый воздух, если исходная смесь состоит из закиси азота, азота и воздуха [7, 8]. Применение высокоэнтальпийных установок кратковременного режима для исследований газодинамических моделей с горением позволяет обеспечивать в экспериментах натурные значения давления, энтальпии (температуры) торможения, чисел Маха и Рей-

нольдса одновременно, что практически невозможно в установках стационарного типа. Этим объясняется увеличение количества исследований, проводимых как с целью расширения возможностей таких установок, так и с целью повышения точности и информативности измерений в них (см., например, обзорные работы [9–11]).

При использовании химических реакций принципиальной трудностью воспроизведения натуральных параметров для чисел $M = 3.5 \div 5$ является необходимость получения сравнительно невысоких энтальпий торможения, что требует применения очень бедных смесей водорода или пропана с воздухом. Бедные горючие смеси трудно воспламеняются. Кроме того, времена индукции и реакции очень бедных смесей возрастают по сравнению со стехиометрическими составами. А главное, в бедных смесях существенно уменьшается скорость перемещения зоны экзотермической реакции. Все это может привести к недопустимо большому времени сгорания горючего в исходной смеси с большими потерями тепла в холодные стенки форкамеры.

Для воспроизведения значений натуральных энтальпий при $M > 6 \div 7$ используются хотя и бедные смеси, но с достаточно большим содержанием горючих. В таких водородовоздушных, пропановоздушных смесях и особенно в смесях с закисью азота при некоторых условиях возможно развитие взрывообразного процесса. Взрывообразные процессы или должны исключаться из штатных режимов установки, или

необходимо предусматривать специальные мероприятия для обеспечения безаварийной работы.

Анализ затронутых выше проблем и составляет цель настоящего экспериментального исследования.

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опыты проводились в высокоэнтальпийной установке ИТ-302М ИТПМ СО РАН [4, 6]. Перед опытом в форкамеру установки (рис. 1) через систему обратных клапанов последовательно накачивались компоненты смеси: кислород — водород — воздух в трехкомпонентных смесях с водородом в качестве горючего или пропан — кислород — воздух в смесях с пропаном в качестве горючего. Количество кислорода выбиралось таким, чтобы в продуктах реакции массовая доля кислорода (в предположении полного сгорания горючего) равнялась $g_{O_2} = 0.231$, т. е. соответствовала массовой доле кислорода в чистом сухом атмосферном воздухе.

В ряде опытов часть горючего заменялась закисью азота. В принципе исходные смеси с закисью азота должны быть четырехкомпонентными: горючее, закись азота, воздух и компенсирующий кислород или азот (при разложении закиси азота образуется избыточный кислород, который частично, полностью или с избытком компенсирует кислород, выгорающий

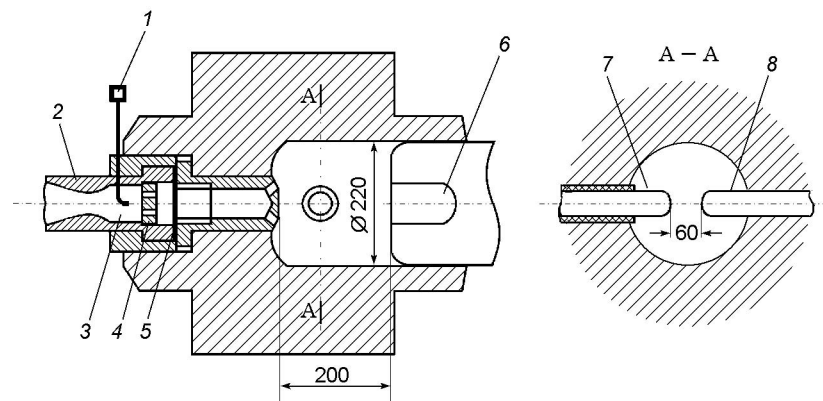


Рис. 1. Форкамера и сопло установки ИТ-302М:

1 — система измерения давления во второй форкамере, 2 — сопло, 3 — вторая форкамера, 4 — дросселирующая решетка между форкамерами, 5 — диафрагма форкамеры, 6 — плунжер мультипликатора, 7 — положительный электрод, 8 — отрицательный электрод

из исходной смеси; поэтому компенсировать надо либо недостаток кислорода, либо (азотом) его избыток). Поскольку в настоящей работе исследовались в основном энергетические характеристики, а теплофизические свойства кислорода, азота и воздуха близки, то с целью упрощения эксперимента с закисью азота в исходные смеси не добавлялся компенсирующий кислород (или азот). Поэтому исходная смесь, накачиваемая в форкамеру, была трехкомпонентной. В этом случае массовая доля кислорода g_{O_2} в составном рабочем теле несколько отличается от массовой доли кислорода в атмосферном воздухе.

Инициирование химической реакции проводилось либо электрической дугой при разряде конденсаторной батареи, либо поджигающим устройством, выполненным по форкамерно-факельному принципу [12, с. 520]. В каждом опыте измерялись давления накачки исходных компонентов в форкамере и давление в ней в течение режима (p_{Φ}).

В высокоэнтальпийных установках с подводом тепла за счет электрической дуги разрушение диафрагмы обычно происходит при нарастании давления в форкамере в изохорном процессе ($v = \text{const}$) и считается, что процесс $v = \text{const}$ и разрушение диафрагмы происходят практически мгновенно и совпадают. Для подвода тепла только за счет электрического разряда это оправданно, так как длительность разряда меньше миллисекунды и отклонение на первых миллисекундах от вертикали кривой $p_{\Phi}(\tau)$ и небольшие ее колебания обычно объясняются инерционностью измерительного канала и его успокоением. При химическом подгреве вскрытие диафрагмы необходимо задерживать до завершения всех реакций в объеме форкамеры. В настоящих опытах система задержки позволяла вскрывать диафрагму в любой момент после начала подвода тепла. За начало отсчета времени $\tau = 0$ принято: в случае воспламенения смеси от электрической дуги — начало электрического разряда, а в случае воспламенения смеси от поджигающего устройства — момент подачи напряжения на разрядник. Во всех опытах этот момент практически совпадает с моментом начала роста давления в форкамере.

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Исходная смесь $H_2 + O_2 + \text{воздух}$

В [3] было получено, что при создании рабочего тела только за счет химической реакции для воспроизводства в установке натуральных параметров полета в диапазоне от $M = 4$, $H = 20$ км до $M = 7$, $H = 27$ км (H — высота полета) необходимы водородовоздушные смеси с молярной долей водорода от $r_{H_2} = 5.3\%$ (для $M = 4$) до $r_{H_2} = 17.3\%$ (для $M = 7$). В случае химического и электрического подгрева значение r_{H_2} для $M = 4$ может уменьшаться до $\approx 1.5\%$ в зависимости от доли тепла, выделяемого электрической дугой [4]. Поэтому в опытах с исходной смесью $H_2 + O_2 + \text{воздух}$ значения r_{H_2} варьировались в диапазоне $1.4 \div 14\%$.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости $p_{\Phi}(\tau)$ в опытах с различными значениями r_{H_2} . Кривая 7 соответствует нагреву рабочего тела только за счет электрической энергии (250 кДж). В этом опыте в форкамеру накачивался только воздух. Разница между кривыми 1–6 и кривой 7 характеризует увеличение давления за счет подвода тепла, выделяющегося при сгорании водорода.

Экспериментальные данные по одновременному влиянию давления и температуры на концентрационные границы зажигания смесей для различных источников поджигания весьма немногочисленны. Обычно концентрационные границы зажигания определяются при комнат-

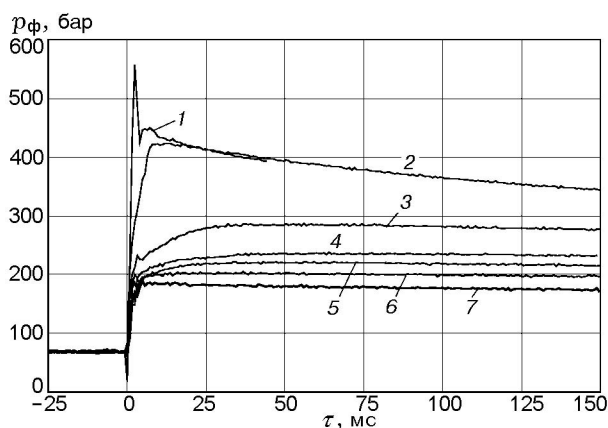


Рис. 2. Давление в форкамере в зависимости от времени для исходной смеси $H_2 + O_2 + \text{воздух}$:

$r_{H_2}, \%$: 1 — 14.3, 2 — 12.9, 3 — 7.1, 4 — 4.3, 5 — 2.9, 6 — 1.4, 7 — 0

ной температуре смеси и давлениях, ненамного превышающих атмосферное [12, 13]. Именно с ориентацией на эти источники в работе [3] использовалось значение нижней концентрационной границы зажигания водородовоздушной смеси $r_{\text{H}_2} = 4\%$. В то же время, как следует из рис. 2, в настоящих опытах фиксировалось воспламенение и горение водородовоздушной смеси вплоть до $r_{\text{H}_2} = 1.4\%$. По-видимому, здесь сыграли роль несколько факторов. Во-первых, подвод электрической энергии $Q_{\text{эл}} \approx 250$ кДж (за счет разряда конденсаторной батареи установки, заряжаемой до $U = 2.5$ кВ) в замкнутом объеме к смеси массой ≈ 0.8 кг приводил к ее нагреву на $\approx 400^\circ$ еще до начала движения фронта реакции по объему форкамеры (время горения дуги и, следовательно, время выделения тепла в процессе $v = \text{const}$ за счет электрического разряда не превышает $0.5 \div 0.8$ мс). Во-вторых, в зоне электрической дуги происходило образование радикалов OH, NO, атомарных кислорода и азота. В-третьих, в зоне дуги из-за температуры в несколько тысяч градусов молекулярный водород разлагался на атомарный. По существу, первоначально происходило воспламенение не молекулярного водорода, а атомарного. Эти факторы и привели к расширению нижней концентрационной границы зажигания водородовоздушной смеси.

Момент достижения максимального давления на кривых $p_{\text{ф}}(\tau)$ считался временем завершения химической реакции ($\tau_{\text{хим}}$). Одновременно с опытами по совместному подводу тепла за счет электрической энергии и химических реакций проводились опыты на чистом воздухе при вкладе только электрической энергии, примерно равной энергии $Q_{\text{эл}} + Q_{\text{хим}}$ в опытах с горючим. Здесь $Q_{\text{хим}}$ — количество тепла, выделяющегося за счет химической реакции. Темпы падения давления за счет отвода тепла к стенкам форкамеры как в опытах на чистом воздухе, так и в опытах с горючим (начиная с максимума на кривых $p_{\text{ф}}(\tau)$ для опытов с горючим) практически повторяют друг друга. Это свидетельствует о том, что химическая реакция в основном заканчивается к моменту достижения максимума на кривых $p_{\text{ф}}(\tau)$, что и позволяет считать этот максимум временем завершения химической реакции в форкамере.

Даже при $r_{\text{H}_2} < 4\%$ подвод тепла завершился за $30 \div 40$ мс, из них ≈ 0.5 мс — время разряда (см., например, кривые 5, 6 на рис. 2). Это вполне приемлемо для высокоэнтальпий-

ных установок с временем режима $0.1 \div 0.5$ с.

Поскольку как подвод тепла к рабочему телу, так и отвод его в стенки форкамеры в диапазоне $\tau = 0 \div \tau_{\text{хим}}$ происходит в процессе $v = \text{const}$, то на случай химических реакций можно распространить обычно применяемый в импульсных трубах прием определения давления $p_{\text{ф}}(0)$ при $\tau = 0$: экстраполировать кривую $p_{\text{ф}}(\tau)$ на момент $\tau = 0$ с учетом при $\tau > \tau_{\text{хим}}$ темпа падения давления за счет теплоотвода в стенки. Тем самым определяется то экспериментальное значение $p_{\text{ф}}(0)$, которое имело бы место, если бы теплоотвод отсутствовал. При этом время теплоподвода не имеет значения. Это справедливо только для опытов в замкнутом объеме (что имело место во всех опытах, обсуждаемых в статье).

Опыты при некоторых значениях r_{H_2} повторялись по два-пять раз. Повторяемость опытов достаточно хорошая: при одном и том же r_{H_2} разница между максимумами на кривых $p_{\text{ф}}(\tau)$ и разница между давлениями $p_{\text{ф}}(0)$ не превышала 5 %.

Зная начальное давление компонентов в форкамере, начальную температуру смеси (293 К) и количество водорода G_{H_2} в форкамере, можно определить, сколько в процессе $v = \text{const}$ было бы подведено тепла $Q_{\text{ф}} = Q_{\text{хим}} + Q_{\text{эл}}$ при полноте сгорания водорода $\eta = 1$ и соответственно какое при этом должно бы быть давление $p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0)$. Сравнивая экспериментальные ($p_{\text{ф}}(0)$) и расчетные ($p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0)$) значения, можно сделать вывод о полноте сгорания водорода. Расчеты $p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0)$ выполнялись аналогично изложенному в [3] по методике работы [14] с учетом для индивидуальных веществ зависимости диссоциации и внутренних степеней свободы от температуры и давления, но без учета межмолекулярных взаимодействий. Термодинамические свойства индивидуальных веществ брали из [15].

При $r_{\text{H}_2} > 12\%$ значения $p_{\text{ф}}(0)$ и $p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0)$ практически совпадают. То есть при $r_{\text{H}_2} > 12\%$ полнота сгорания водорода близка к единице. При $r_{\text{H}_2} < 7\%$ расчетные значения $p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0)$ выше, чем экспериментальные $p_{\text{ф}}(0)$. Это свидетельствует о том, что при $r_{\text{H}_2} < 7\%$ полнота сгорания водорода меньше единицы. Путем подбора $Q_{\text{ф}}$ таким образом, чтобы $p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0) = p_{\text{ф}}(0)$ при $\tau = 0$, определяется значение $Q_{\text{хим}} = Q_{\text{ф}} - Q_{\text{эл}}$. Это дает возможность оценить полноту сгорания водорода в опытах с $r_{\text{H}_2} < 7\%$:

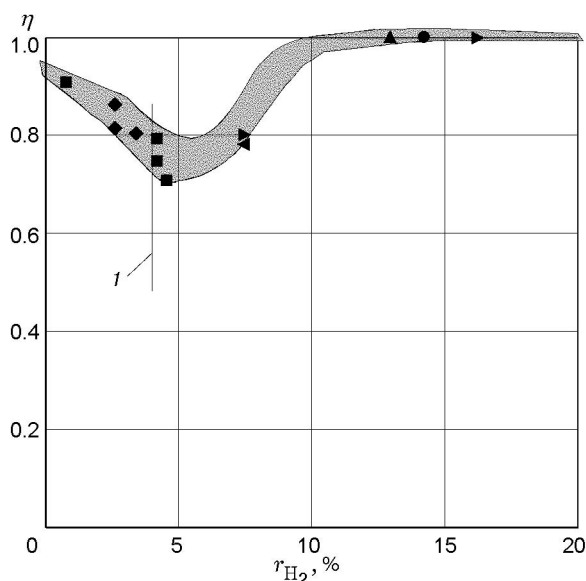


Рис. 3. Полнота сгорания исходной смеси $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{воздух}$:

1 — нижняя концентрационная граница при нормальных условиях $r_{\text{H}_2} = 4 \div 4.19\%$ [12, с. 723; 13, с. 105]

$$\eta = Q_{\text{хим}} / H_u G_{\text{H}_2}, \quad (1)$$

где H_u — низшая теплота реакции при $p = \text{const}$.

Определенная таким образом полнота сгорания в зависимости от r_{H_2} приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что при $r_{\text{H}_2} \lesssim 10\%$ полнота сгорания меньше единицы. Необходимо, однако, заметить следующее. Величина η напрямую связана с разностью между расчетными значениями $p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0)$ и определяемыми в эксперименте значениями $p_{\text{ф}}(0)$. Когда расчетные и экспериментальные значения близки, то по смыслу η практически равна единице, поскольку $p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0)$ определялось из термодинамического расчета, в котором используются стандартные полные внутренние энергии исходной смеси и продуктов реакции, и для определения $p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0)$ не привлекается величина H_u . Когда $p_{\text{ф}}(0) < p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0)$, то $\eta < 1$ (определялось для опытов с $r_{\text{H}_2} < 7\%$ по формуле (1)). Но при этом несколько неопределенной является величина теплового эффекта реакции в процессе $v = \text{const}$ при переменных значениях давления p ($70 \div 500$ бар) и температуры ($300 \div 1400$ К). При определении η в области $r_{\text{H}_2} < 7\%$ принималось $H_u = 120$ МДж/кг, что, строго говоря, справедливо только для изобарного процесса (1 бар) и

температуры 300 К. Поэтому приведенные для $r_{\text{H}_2} < 7\%$ значения η надо рассматривать как приближенные и оценочные. По существу η является не полнотой сгорания (по смыслу определения η из формулы (1)), а полнотой подвода тепла в процессе $v = \text{const}$ по отношению к величине H_u , определенной при охлаждении продуктов реакции до нормальных условий [16, с. 160], т. е. ее можно считать нижней оценкой величины η .

Исходная смесь пропан + O_2 + воздух

Методология исследования смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2 + \text{воздух}$ была той же, что в предыдущем параграфе.

Для воспроизведения в установке натуральных параметров полета в диапазоне от $M = 4$, $H = 20$ км до $M = 7$, $H = 27$ км необходимы пропановоздушные смеси с содержанием пропана от $r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0.66\%$ (для $M = 4$) до 2.5% (для $M = 7$) [3]. При наличии химического и электрического подогрева величина $r_{\text{C}_3\text{H}_8}$ может уменьшаться до $0.3 \div 0.5\%$ в зависимости от доли тепла, выделяющегося в электрической дуге [4]. Молярная доля пропана в стехиометрической пропановоздушной смеси составляет 4% . То есть так же, как для водородовоздушных смесей, для воспроизведения натуральных параметров должны использоваться бедные пропановоздушные смеси. Поэтому в опытах с исходной смесью $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2 + \text{воздух}$ молярная доля пропана варьировалась в диапазоне $0.57 \div 2.7\%$.

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости давления $p_{\text{ф}}(\tau)$ в опытах с различными значениями $r_{\text{C}_3\text{H}_8}$. Кривая 4 характеризует увеличение давления в первой форкамере только за счет электрической энергии ($Q_{\text{эл}} = 243$ кДж) — в этом опыте в форкамеру накачивался только воздух. Разница между кривыми 1–3 и кривой 4 характеризует увеличение давления за счет подвода тепла, выделяющегося при сгорании пропана. При нормальных условиях нижняя концентрационная граница зажигания пропановоздушных смесей $r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 2.37\%$ [13]. Однако в настоящих опытах, так же как и в опытах с водородом, воспламенение и сгорание пропана фиксировались при более низких концентрациях горючего. Причины этого обсуждались в предыдущем параграфе.

Время завершения реакции при инициировании ее электрическим разрядом сильно зависит от концентрации горючего. При концентрациях пропана больше нижнего концентрационного предела, известного по литературными данными для нормальных условий, время завершения реакции в форкамере не превышает $5 \div 10$ мс. При снижении концентрации до нижнего концентрационного предела это время существенно возрастает и составляет величины $\tau_{\text{хим}} = 25 \div 40$ мс. Полнота сгорания пропана при $r_{\text{C}_3\text{H}_8} > 2.37\%$ практически равняется единице и начинает уменьшаться только при $r_{\text{C}_3\text{H}_8}$, меньших нижней концентрационной границы при нормальных условиях: до 0.7 при $r_{\text{C}_3\text{H}_8} \approx 0.5\%$.

По поводу зависимости η от доли горючего в исходной смеси (как пропана, так и водорода) можно заметить следующее. Одной из целей экспериментов было определение, по возможности в чистом виде, влияния в исходной смеси доли горючего на вклад химической реакции в энергетику установки при зажигании от электрической дуги. Это требовало в опытах минимально возможного предварительного нагрева исходной смеси за счет электрического разряда, т. е. минимально возможного значения $Q_{\text{эл}}$. Минимальное напряжение зарядки конденсаторной батареи, дающее стабильно устойчивый разряд в форкамере установки, $U = 2.5$ кВ. Оно и определяло использовавшуюся в опытах величину $Q_{\text{эл}} \approx 250$ кДж. В уста-

новках типа импульсных труб с конденсаторной батареей напряжение U может изменяться в широких пределах (для установки ИТ-302М $U = 2.5 \div 5$ кВ, $Q_{\text{эл}} \sim U^2$). Увеличение U и, следовательно, предварительного нагрева исходной смеси за счет $Q_{\text{эл}}$ приведет к уменьшению $\tau_{\text{хим}}$ и увеличению η для тех смесей, для которых в настоящих опытах наблюдалось $\eta < 1$. Кроме того, как было отмечено в предыдущем параграфе, η представляет по существу не полноту сгорания, а полноту подвода тепла в процессе $v = \text{const}$ по отношению к H_u .

Исходная смесь горючее + N₂O + воздух

Реакция разложения закиси азота начинается при 770 К и полностью заканчивается при 1170 К [17, с. 70]. Поэтому давление накачки исходной смеси (41 бар) и напряжение зарядки конденсаторной батареи ($U = 3$ кВ) выбирали такими, чтобы в случае двухкомпонентной смеси N₂O + воздух за счет разряда только конденсаторной батареи можно было достигнуть температуры исходной смеси ≈ 1100 К, необходимой для окончания разложения N₂O. Такой опыт необходим для того, чтобы из общей энергии, подводимой в трехкомпонентной смеси за счет химической реакции горючего и N₂O, выделить тепло и от сжигания горючего, и от разложения N₂O.

На рис. 5 приведены результаты опытов при наличии N₂O в исходной смеси. Кривая 3

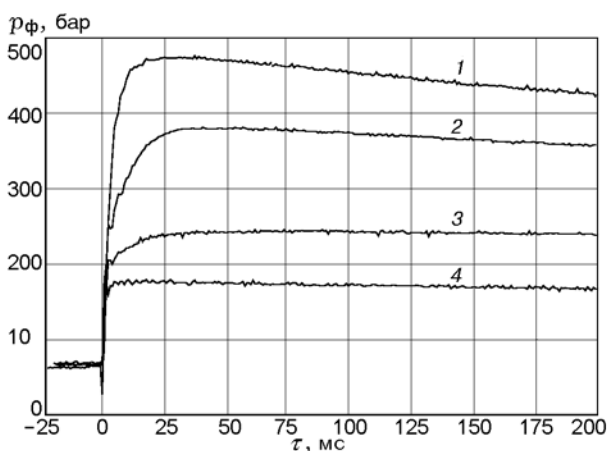


Рис. 4. Давление в форкамере в зависимости от времени режима для исходной смеси C₃H₈ + O₂ + воздух:

$r_{\text{C}_3\text{H}_8}$, %: 1 — 2.14, 2 — 1.43, 3 — 0.57, 4 — 0 (чистый воздух)

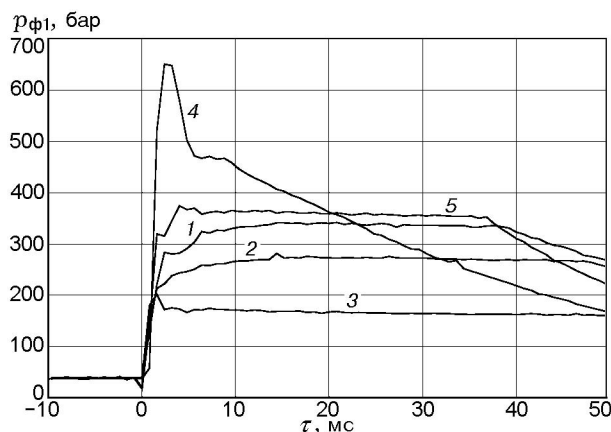


Рис. 5. Давление в форкамере в зависимости от времени режима для смесей с закисью азота:

1 — $r_{\text{H}_2} = 9.8\%$, $r_{\text{N}_2\text{O}} = 34\%$; 2 — $r_{\text{H}_2} = 0$, $r_{\text{N}_2\text{O}} = 34\%$; 3 — $r_{\text{H}_2} = 0$, $r_{\text{N}_2\text{O}} = 0$ (чистый воздух); 4 — $r_{\text{H}_2} = 12.2\%$, $r_{\text{N}_2\text{O}} = 58\%$; 5 — $r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 1.2\%$, $r_{\text{N}_2\text{O}} = 34\%$

характеризует увеличение давления в форкамере только за счет тепла $Q_{эл} = 319$ кДж, выделяющегося при разряде конденсаторной батареи, — в этом опыте накачивался только воздух. Это тепло нагревает воздух до температуры 1130 К, достаточной для начала и завершения реакции разложения закиси азота в опытах с двухкомпонентной смесью (кривая 2). Разница между кривыми 2 и 3 характеризует выделение тепла только за счет разложения закиси азота. Разница между кривыми 3 и 1, 5 связана с увеличением давления как за счет тепла, выделяющегося при сгорании горючего (водорода или пропана), так и за счет тепла, выделяющегося при разложении закиси азота.

Оценка полноты выделения тепла для опыта с водородом и закисью азота (см. кривую 1 на рис. 5) дает значение $\eta \approx 0.91$. При этом тепловой эффект реакции разложения закиси азота принимался $H_u = 1.86$ МДж/кг. В то же время в отсутствие водорода в исходной смеси (кривая 2 на рис. 5) $\eta \approx 0.74$. Вероятной причиной неполного разложения закиси азота являлось то, что в слоях смеси, непосредственно прилегающих к холодным стенкам форкамеры, температура не достигала значений, необходимых для разложения N_2O . Аналогичное явление с расслоением рабочей смеси по температуре из-за тепловых потерь в стенке наблюдается в установках адиабатического сжатия с тяжелым поршнем [18]. В то же время наличие в этих слоях сгорающего водорода повышает температуру смеси и, как следствие, полноту выделения тепла.

В смесях с закисью азота так же, как и в смесях горючее — воздух без закиси азота, возможно воспламенение и сгорание горючих при концентрациях горючих, меньших нижней концентрационной границы при нормальных условиях.

Таким образом, выполненные опыты подтверждают, что и в смеси $H_2 + N_2O +$ воздух, и в смеси $C_3H_8 + N_2O +$ воздух температура за счет сгорания горючих может быть поднята до такой величины, при которой начнется и будет продолжаться реакция разложения закиси азота. А это подтверждает возможность замены в исходной смеси части горючего закисью азота с целью уменьшения содержания воды и углекислого газа в рабочем теле.

Сравнивая с близкими по молярной доле пропана опыты с закисью азота и без нее (см. кривые 2 на рис. 4 и 5 на рис. 5), можно от-

метить, что смесь с закисью азота «более реакционна». Время завершения реакций в опыте без закиси азота $\tau_{хим} \approx 35$ мс, в то время как в опыте с закисью азота $\tau_{хим} \approx 4$ мс. Видимо, сказался цепной механизм разложения закиси азота и влияние углерода на этот механизм [19], так как для смеси с водородом такого крутого роста давления (до концентраций водорода и закиси азота, при которых начинается взрывообразное выделение тепла, см. ниже) не наблюдается.

Кривые 1, 2, 5 на рис. 5 свидетельствуют о «спокойном» характере протекания реакций сгорания горючих и разложения закиси азота. Однако увеличение в исходной смеси доли водорода и закиси азота (см. кривую 4 на рис. 5) привело к качественно иной картине разложения закиси азота. В опыте с увеличенным содержанием водорода и закиси азота последняя разлагалась с тепловым взрывом, который привел к незапланированному разрушению диафрагмы 5 (см. рис. 1) и, как следствие, к разрушению дросселирующей решетки 4 между форкамерами. В процессе эксплуатации установки нельзя полностью исключить режимы, при которых возможно взрывообразное развитие химической реакции. Поэтому к системе принудительного вскрытия диафрагмы предъявляется требование не разрушаться при взрывообразном характере химической реакции.

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПОДЖИГАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Процесс в поджигающем устройстве

На рис. 6 приведена схема использованного в настоящих опытах поджигающего устройства (ПУ). Оно представляет собой длинный коаксиальный канал, заполняемый реагирующей смесью, накачка компонентов в который производилась через систему обратных клапанов. Объем ПУ — 100 см³. Смесью в ПУ отделялась от смеси в форкамере с помощью диафрагмы из майлара, поджимаемой к переднему торцу ПУ с помощью штока. Поджигание смеси в ПУ осуществлялось электрическим разрядником с энергией разряда ≈ 50 Дж (за счет разряда конденсатора емкостью 100 мкФ, заряжаемого до напряжения 1.2 кВ).

Конструкция форкамеры установки ИТ-302М такова, что реально разместить

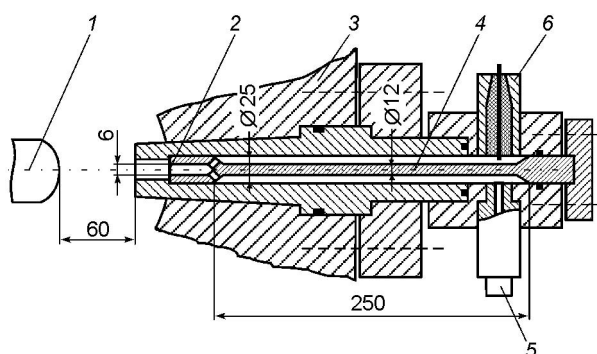


Рис. 6. Схема поджигающего устройства и расположение его в форкамере:

1 — положительный электрод, 2 — диафрагма ПУ, 3 — корпус форкамеры, 4 — шток, поджигающий диафрагму, 5 — система заправки компонентов, 6 — электрический разрядник для зажигания смеси

в ней ПУ можно лишь на месте отрицательного электрода (см. позицию 8 на рис. 1). Причем из-за недостатка места поджигание осуществлялось лишь одной струей, напротив которой на расстоянии 60 мм находился положительный электрод 1 (рис. 6; см. также позицию 7 на рис. 1). Таким образом, воспламенение можно было реализовать только локально, в одном месте форкамеры. Это заранее предопределяло низкую эффективность данного ПУ.

В качестве поджигающей смеси использовались продукты сгорания водорода с кислородом. Поскольку в ПУ перед накачкой водорода и кислорода присутствовал атмосферный воздух, то в составе исходной смеси всегда был воздух с парциальным давлением 1 бар. Полное давление накачки исходной смеси в ПУ

$$p_{\text{ПУ}}(н) = p_{\text{ПУ},\text{H}_2} + p_{\text{ПУ},\text{O}_2} + 1,$$

где $p_{\text{ПУ},\text{H}_2}$ и $p_{\text{ПУ},\text{O}_2}$ — парциальные давления водорода и кислорода, накачиваемых в ПУ.

На рис. 7 приведены давления в ПУ в зависимости от времени τ . Эти опыты проводились с форкамерой без диафрагмы без накачки в нее смеси и с открытой рабочей частью установки. За начало отсчета времени τ взят момент подачи напряжения на разрядник, практически совпадающий с моментом роста давления в ПУ. Тонкими линиями 1а–4а для каждого опыта проведены аппроксимирующие зависимости. Использовалась смесь, по составу близкая к стехиометрической.

Из рис. 7 видно, что сгорание водородокислородной смеси в ПУ в процессе $v \approx \text{const}$ и

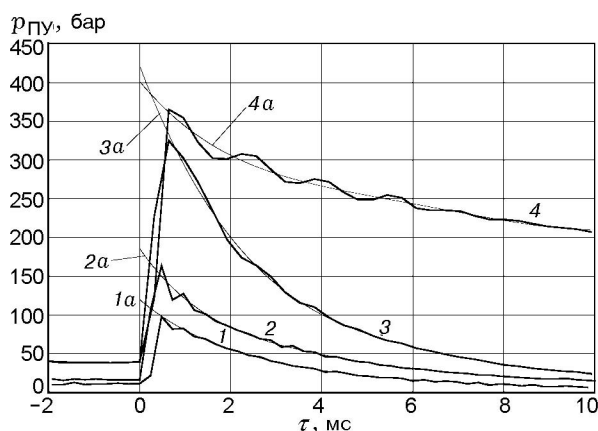


Рис. 7. Давление в поджигающем устройстве в зависимости от времени:

1–4 — $p_{\text{ПУ}} = f(\tau)$, 1а–4а — аппроксимационный полином; 1 — $p_{\text{ПУ},\text{H}_2} = 8$ бар, $p_{\text{ПУ},\text{O}_2} = 3.6$ бар; 2 — $p_{\text{ПУ},\text{H}_2} = 10$ бар, $p_{\text{ПУ},\text{O}_2} = 6.7$ бар; 3, 4 — $p_{\text{ПУ},\text{H}_2} = 30$ бар, $p_{\text{ПУ},\text{O}_2} = 10$ бар, 4 — в замкнутом объеме

нарастание давления завершалось за время не более 1 мс. Из сравнения измеренных значений $p_{\text{ПУ}}(0)$ с расчетными $p_{\text{ПУ}}^{\text{расч}}(0)$ и анализа темпа нарастания давления в ПУ можно заключить, что сгорание водородокислородной смеси осуществлялось в ПУ с высокой полнотой сгорания.

Опыты с зажиганием с помощью поджигающего устройств исходной смеси в форкамере осуществлялись при давлениях накачки смеси в форкамеру $p_{\text{ф}}(н) = 43 \div 70$ бар. Падение давления продуктов сгорания в ПУ от $p_{\text{ПУ}}(0)$ до $43 \div 70$ бар происходило за время не более $3 \div 6$ мс (см. рис. 7). То есть даже если предположить, что после воспламенения первых порций смеси в форкамере давление в ней не растет, истечение продуктов сгорания из поджигающего устройств в форкамеру продолжается не более $3 \div 6$ мс. Далее процесс горения в форкамере должен развиваться за счет формирования фронта пламени от источника поджигания.

Основным поджигающим компонентом в продуктах сгорания ПУ являлся перегретый водяной пар с температурой ≈ 3900 К в начальный момент истечения. Однако необходимо заметить следующее. В холодные стенки ПУ отводилось большое количество тепла, что видно из зависимости $p_{\text{ПУ}}(\tau)$ для опыта, выполненного в замкнутом объеме ПУ (см. кривую 4 на рис. 7). В этом опыте вместо разрушаемой майларовой диафрагмы устанавливалась металлическая заглушка.

При этом давление в ПУ за 6 мс падало от ≈ 400 до ≈ 250 бар. Для процесса $v = \text{const}$ это соответствует падению температуры с 3900 до 2700 К. Причиной таких больших тепловых потерь явились развитые поверхности коаксиального канала ПУ с большим отношением длины к диаметру, что обусловливалось конструктивными особенностями форкамеры установки.

Исходная смесь $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{воздух}$

На рис. 8 и 9 приведены давления в форкамере при зажигании водородовоздушной смеси от ПУ. В опыте, соответствующем кривой 3, давление регистрировалось до момента времени 230 мс, в опыте, соответствующем кривой 1, — до 1020 мс. Этим и объясняется, что кривые 1, 3 на рис. 8, а также кривая 4 на рис. 8, 9 не доведены до конца оси τ .

Как следует из рис. 8, при зажигании с помощью ПУ время завершения реакции в форкамере существенно зависит от параметров продуктов сгорания в ПУ. С увеличением давления в поджигающем устройстве время завершения реакции уменьшается: от точки *C* до точки *B* на кривых 2 и 1. Это связано в основном с двумя факторами. Во-первых, увеличивается степень нерасчетности истечения продуктов сгорания из ПУ и, следовательно, очаг зажигания занимает больший объем. Во-вторых, уве-

личивается энергия зажигания. Для кривых 3, 2, 1 на рис. 8 вклад энергии от ПУ составлял $Q_{\text{ПУ}} = 5, 7$ и 16.8 кДж соответственно.

Полное время выделения тепла в форкамере определяется временем, которое необходимо, чтобы прореагировала вся исходная смесь, накачиваемая в форкамеру. Оно зависит от трех составляющих: времени воспламенения [12, с. 218], времени собственно химической реакции и времени, которое требуется для перемещения зоны горения по всей горючей смеси. Оценка времени воспламенения и времени реакции для температур и давлений, имевших место в данных опытах, дает значения не более нескольких миллисекунд. Поэтому основную часть периода $\tau_{\text{хим}}$ составляет время распространения зоны реакции по форкамере.

Влияние способа воспламенения, концентрации горючих, температуры и давления исходной смеси качественно соответствует приведенным в литературе данным по скорости распространения зоны горения [12, 13, 20–22]. Однако уменьшение времени $\tau_{\text{хим}}$ при зажигании от электрического разряда по сравнению с зажиганием от ПУ оказалось более сильным, чтобы его можно было объяснить только увеличением температуры, давления и концентрации исходной смеси, что видно из сравнения кривых 1, 2 с кривой 4 на рис. 8, 9. Кривые 4 соответствуют зажиганию исходной смеси с помощью электрического разряда конден-

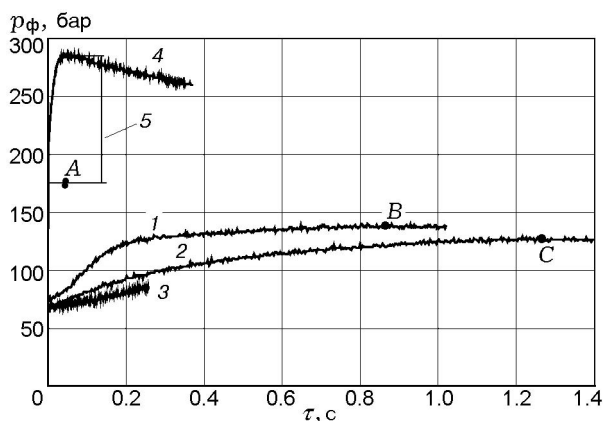


Рис. 8. Давление в форкамере в зависимости от времени режима для исходной смеси $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{воздух}$, $r_{\text{H}_2} = 0.071$:

1–3 — воспламенение от ПУ: 1 — $p_{\text{ПУ, H}_2} = 30$ бар, 2 — $p_{\text{ПУ, H}_2} = 10$ бар, 3 — $p_{\text{ПУ, H}_2} = 8$ бар; 4 — воспламенение от электрического разряда, см. кривую 3 на рис. 2; 5 — повышение давления за счет электрического разряда ($Q_{\text{эл}} = 243$ кДж)

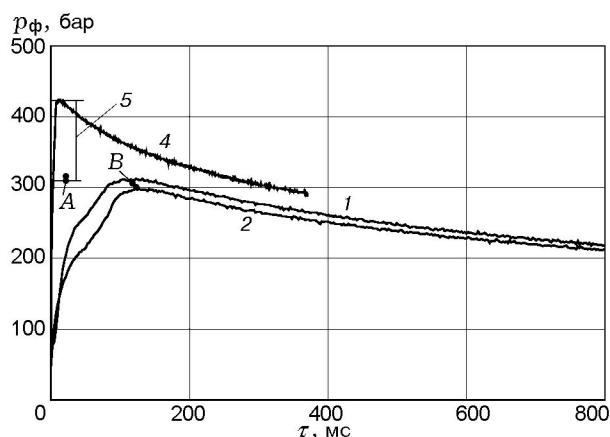


Рис. 9. Давление в форкамере в зависимости от времени режима для исходной смеси $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{воздух}$:

1, 2 — воспламенение от ПУ, $p_{\text{ПУ, H}_2} = 30$ бар, $r_{\text{ПУ, H}_2} = 0.129$; 4 — воспламенение от электрического разряда, см. кривую 2 на рис. 2; 5 — повышение давления за счет $Q_{\text{эл}} = 258$ кДж

саторной батареи, заряжавшейся до напряжения $U = 2.5$ кВ (кривые 4 на рис. 9, 10 перенесены соответственно с кривых 3, 2 рис. 2). Видимо, сказывается еще и влияние ударной волны, идущей от мощного разряда, за счет чего исходная смесь турбулизуется сильнее, чем от ПУ (вклад энергии от дуги $240 \div 320$ кДж, от ПУ — максимально 16.8 кДж).

Повышение за счет электрического разряда температуры исходной смеси на 400 К приводит к увеличению давления в процессе $v = \text{const}$ на $108 \div 115$ бар, с 70 до $178 \div 185$ бар. Если от максимума на кривых 4 отложить вниз значение $108 \div 115$ бар (отрезок 5), то получим точки А на рис. 8, 9. Эти точки должны соответствовать тому давлению, которое имело бы место при зажигании исходной смеси в условиях, создаваемых электрической дугой, но без вклада электрической энергии $Q_{\text{эл}} \approx 250$ кДж, приводящей к нагреву исходной смеси на 400 К. Таким образом, точки А, В, С на рис. 8 и точки А, В на рис. 9 определяют максимумы на кривых $p_{\text{ф}}(\tau)$, соответствующие завершению сгорания горючего в форкамере. Если соединить эти точки условной кривой, то будет видно, что темп падения кривой во времени соответствует темпу падению кривой $p_{\text{ф}}(\tau)$ после завершения химической реакции за счет потерь тепла в стенки в процессе $v = \text{const}$. То есть можно сказать, что с учетом тепловых потерь в стенки в опытах с $r_{\text{H}_2} = 0.071$ при зажигании от ПУ полнота сгорания была такой же, как и при зажигании от электрического разряда. То же самое относится и к полноте сгорания в опытах с $r_{\text{H}_2} = 0.129$.

Опыты, соответствующие кривым 1, 2 на рис. 9, выполнялись при одних и тех же параметрах накачки смеси в форкамеру и ПУ. Из рис. 9 видна хорошая повторяемость: кривые $p_{\text{ф}}(\tau)$ для этих опытов практически совпадают.

Поскольку с увеличением r_{H_2} время завершения реакции $\tau_{\text{хим}}$ падает, то еще одним из способов уменьшения $\tau_{\text{хим}}$ является накачка в форкамеру смеси с большим значением r_{H_2} , чем требуется для получения необходимых значений $p_{\text{ф}}(0)$ и натурной энтальпии торможения при числе Маха полета, воспроизводимых в установке. Затем выбирается такая задержка во вскрытии диафрагмы, при которой за счет теплоотдачи в холодные стенки форкамеры давление и энтальпия падают до необходимых значений.

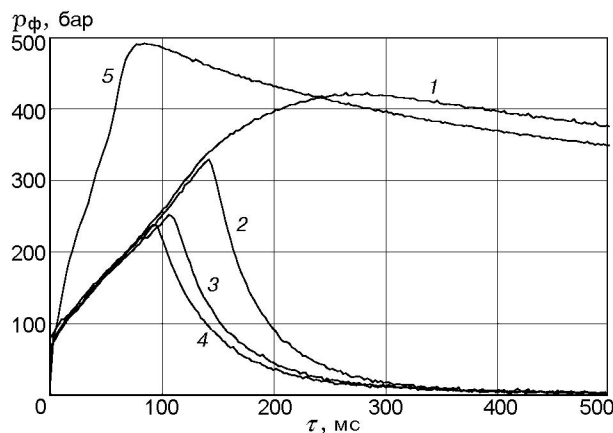


Рис. 10. Давление в форкамере в зависимости от времени режима для исходной смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2 + \text{воздух}$:

1-4 — $r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0.0214$, $\tau_{\text{диаф}} > 500$ мс (1), $\tau_{\text{диаф}} = 142$ (2), 108 (3), 94 мс (4); 5 — $r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0.0286$

Исходная смесь $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2 + \text{воздух}$

На рис. 10 приведены результаты опытов с поджиганием пропановоздушной смеси в форкамере форкамерно-факельным ПУ. Относительно исходной смеси с пропаном справедливо все, что в предыдущем параграфе было сказано относительно смеси с водородом в качестве горючего. Отметим только, что время $\tau_{\text{хим}}$ в опытах с пропаном были меньше, чем в опытах с водородом.

Преждевременное вскрытие диафрагмы нежелательно не только при взрывообразном характере химической реакции, но и при нормальном ее развитии. На рис. 10 приведены результаты опыта (кривая 1), в котором диафрагма вскрывалась в момент времени $\tau_{\text{диаф}}$ значительно больший, чем $\tau_{\text{хим}}$. Максимум кривой 1 соответствует завершению сгорания пропана ($\tau_{\text{хим}} = 270$ мс), и затем давление в форкамере падает за счет отвода тепла в стенки. В опытах, соответствующих кривым 4, 3, 2, вскрытие диафрагмы осуществлялось при $\tau_{\text{диаф}} < \tau_{\text{хим}}$. Из рис. 10 видно, что при вскрытии диафрагмы горение в форкамере сразу же прекращается и начинается истечение из нее рабочего тела с темпом падения давления, характерным для режимов без горения. Таким образом, чтобы избежать преждевременного прекращения подвода тепла в форкамеру, вскрытие диафрагмы задерживающим устройством должно происходить после завершения в ней всех реакций.

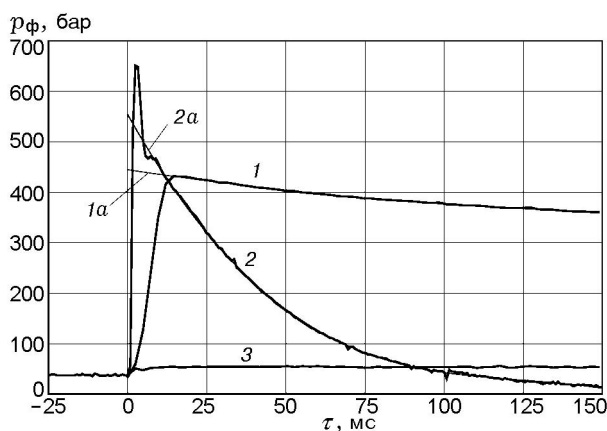


Рис. 11. Давление в форкамере в зависимости от времени режима для исходной смеси водород + закись азота + воздух:

1 — $r_{\text{H}_2} = 12\%$, $r_{\text{N}_2\text{O}} = 56\%$; 2 — $r_{\text{H}_2} = 12.2\%$, $r_{\text{N}_2\text{O}} = 58\%$, см. 4 на рис. 5, воспламенение от электрического разряда $Q_{\text{эл}} = 319$ кДж; 3 — $r_{\text{H}_2} = 0$, $r_{\text{N}_2\text{O}} = 56\%$; 1а, 2а — аппроксимация полиномом

Исходная смесь с закисью азота

Кривая 1 на рис. 11 соответствует опыту с заменой части горючего закисью азота и с зажиганием от форкамерно-факельного ПУ. Состав смеси для этого опыта ($r_{\text{H}_2} = 12\%$, $r_{\text{N}_2\text{O}} = 58\%$) специально выбран тем же самым, что и в опыте с зажиганием от электрической дуги (см. кривую 2 на рис. 11 и кривую 4 на рис. 5), в котором протекание химической реакции проходило взрывообразно. Как видно из рис. 11, при зажигании смеси от ПУ взрывообразного характера реакции не наблюдалось, горение водорода и разложение закиси азота проходило с нормальным распространением экзотермической реакции по объему форкамеры.

Проведенные опыты показали, что добавка закиси азота в исходную смесь способствует значительно более быстрому завершению химической реакции в объеме форкамеры. Например, в опытах с $r_{\text{H}_2} = 0.12$ время реакции уменьшалось с 130 мс (см. кривые 1, 2 на рис. 9) до 15 мс (кривая 1 на рис. 11).

Таким образом, добавка N_2O в исходную смесь может служить третьим способом уменьшения времени реакции. Напомним, что первый, физически ясный способ связан с распределением очагов зажигания по объему форкамеры, второй — с увеличением концентрации горючих в исходной смеси по сравнению с требуемой для воспроизведения натурной энталь-

пии.

На рис. 11 приведены также результаты опыта (кривая 3), в котором в составе исходной смеси не было горючего. Попытка «запустить» реакцию разложения N_2O только за счет тепла, выделяющегося при разложении первых порций N_2O в районе высокотемпературных продуктов сгорания, истекающих из ПУ, не дала положительных результатов: наблюдалось лишь незначительное повышение давления в форкамере за счет тепла, вносимого из ПУ ($Q_{\text{ПУ}} = 16.8$ кДж). Необходимым условием эффективного разложения закиси азота является наличие в исходной смеси горючего, от сгорания которого температура смеси по всему объему форкамеры повышается до значений, гарантирующих начало и продолжение термического разложения N_2O .

Расчетное давление в форкамере для опыта, соответствующего кривой 1 на рис. 11 за счет подвода тепла в процессе $v = \text{const}$ после завершения всех реакций (сгорания H_2 и разложения N_2O) с полной $\eta = 1$, должно быть $p_{\text{ф}}^{\text{расч}}(0) = 445$ бар. Из рис. 11 видно, что это расчетное давление близко к экспериментальным значениям (к $p_{\text{ф}}(0)$ на аппроксимирующей кривой 1а при $\tau = 0$ и к давлению на кривой 1 при $\tau_{\text{хим}}$). То есть можно сказать, что в этом опыте полнота сгорания водорода и полнота разложения закиси азота близки к единице. Этот факт подтверждает сделанный ранее вывод, что при $r_{\text{H}_2} \gtrsim 12\%$ водород сгорает полностью. Кроме того, в слоях, прилегающих к холодным стенкам форкамеры, сгорающий водород обеспечивает температуру, достаточную для полного разложения закиси азота. Такого не наблюдалось, если в составе исходной смеси в форкамере не содержалось горючего или его концентрация в смеси была меньше, чем требовалось для обеспечения $\eta \approx 1$.

ВЫВОДЫ

1. Для воспроизведения натуральных давления и энтальпии торможения при полете летательного аппарата с $M = 4 \div 7$ экспериментально подтверждена возможность создания рабочего тела высокоэнтальпийной установки кратковременного режима за счет сжигания трехкомпонентных смесей $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{воздух}$, $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2 + \text{воздух}$ при бедных составах горючезвоздушных смесей. Показана возможность замены в исходной смеси части горючего закисью азота с целью уменьшения со-

держания воды и углекислого газа в рабочем теле установки.

2. Необходимым условием эффективного подвода тепла за счет экзотермической химической реакции является задержка вскрытия диафрагмы, отделяющей форкамеру от остального газодинамического тракта, по отношению к моменту воспламенения исходной горючей смеси. Наличие задержки позволяет полностью завершить химическую реакцию и добиться полноты сгорания, близкой к единице.

3. В организации процесса выделения тепла за счет химических реакций, как по временным характеристикам, так и по темпу нарастания давления в форкамере, чрезвычайно важную роль играет источник зажигания исходной смеси.

4. При зажигании исходных смесей с помощью электрического разряда с энергией $Q_{эл} = 240 \div 320$ кДж получено:

— даже для очень бедных горючевоздушных смесей, концентрация горючих в которых ($r_{H_2} = 1 \div 2$ %, $r_{C_3H_8} = 0.4$ %) меньше нижнего концентрационного предела зажигания при нормальных условиях, время завершения химической реакции в форкамере объемом 9.6 дм³ не превышает 30 \div 40 мс, что вполне приемлемо для высокоэнтальпийных установок с временем режима 0.1 \div 0.5 с. Сгорание трехкомпонентных смесей с водородом при $r_{H_2} > 0.1$ и трехкомпонентных смесей с пропаном при $r_{C_3H_8} > 0.027$ завершается за время = 5 \div 8 мс;

— в смесях с закисью азота при больших концентрациях водорода и закиси азота может развиваться взрывообразная реакция, что требует от системы принудительного вскрытия диафрагмы выдерживать действие волны давления, которая может сформироваться в реагирующей исходной смеси.

5. При зажигании исходных смесей с помощью форкамерно-факельного ПУ объемом 100 см³ при локальном воспламенении смеси от одного очага воспламенения, расположенного примерно в центре форкамеры, установлено:

— полнота сгорания при зажигании от ПУ близка к полноте сгорания при зажигании от электрической дуги;

— время завершения реакций при зажигании смесей от ПУ значительно выше, чем время завершения реакции при зажигании от электрической дуги с энергией $Q_{эл} = 250$ кДж. Существенно уменьшить время сгорания при зажигании от ПУ можно, кроме физически яс-

ного способа, связанного с распределением очагов зажигания по объему форкамеры, за счет следующих мероприятий: 1) накачки в форкамеру смеси с большим содержанием горючего, чем требуется для воспроизводства натурной энтальпии; в этом случае выбирается такая задержка во вскрытии диафрагмы, при которой за счет теплоотдачи в холодные стенки энтальпия рабочего тела падает до необходимого значения; 2) замены в исходной смеси части горючего закисью азота.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. техн. наук. 1990. Вып. 5. С. 149–157.
2. Носов М. М., Аношин М. И. Импульсная аэродинамическая труба с химическим подогревом // Там же. С. 158–161.
3. Шумский В. В. Использование химических реакций сжигания горючих и разложения закиси азота для создания и нагрева рабочего тела высокоэнтальпийной установки кратковременного режима // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 3. С. 50–57.
4. 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. Всерос. симпоз., посвященного 90-летию со дня рождения акад. В. В. Струминского. М.: ИПРИМ РАН, 2004. С. 27–37.
5. Шумский В. В., Ярославцев М. И. Исследование газодинамики камеры низкого давления для высокоэнтальпийной установки кратковременного режима // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 1. С. 29–43.
6. Пузырев Л. Н., Ярославцев М. И. Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1990. Вып. 5. С. 135–140.
7. Крейг, Ортуэрт. Применение закиси азота в ударных трубах для получения высоких энтальпий торможения // Ракетная техника и космонавтика. 1967. Т. 5, № 12. С. 221–223.
8. Кислых В. В., Рахматулин Х. А. Двухкамерная установка адиабатического сжатия // Теплофизика высоких температур. 1972. Т. 10, № 2. С. 400–404.
9. Топчян М. Е., Харитонов А. М. Аэродинамические трубы для гиперзвуковых исследований // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 3. С. 66–81.

10. **Гуныко Ю. П., Звегинцев В. И., Мажуль И. И. и др.** Испытания модели гиперзвукового прямоточного двигателя в аэродинамической трубе при больших числах Маха и Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 3. С. 321–345.
11. **Кислых В. В.** Высокоскоростные импульсные трубы. Сравнительный анализ и перспективы развития // Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений: Междунар. науч.-техн. конф. Жуковский МО, 21–24 сентября 2004: Тез. докл. М.: ЦАГИ, 2004. С. 467–468.
12. **Щетинков Е. С.** Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
13. **Хитрин Л. Н.** Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ, 1957.
14. **Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П., Худяков В. А.** Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник. В 5 т. Т. 1: Методы расчета. М., 1971.
15. **Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник / Под ред. В. П. Глушко.** М.: Наука, 1978–1979. Т. 1, кн. 2. 1978; т. 2, кн. 2. 1979.
16. **Дубовкин Н. Ф.** Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962.
17. **Краткая химическая энциклопедия.** М., 1961. Т. 1.
18. **Кислых В. В., Сидельников А. Е.** Некоторые вопросы использования закиси азота на установках адиабатического сжатия для получения высокотемпературных газов // Теплофизика высоких температур. Т. 10, № 4. 1972. С. 853–859.
19. **Кислых В. В., Сидельников А. Е.** Разложение закиси азота в присутствии углерода // Кинетика и катализ. 1975. Т. 16, вып. 3. С. 776–777.
20. **Щелкин К. И., Трошин Я. К.** Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 256.
21. **Бабкин В. С., Бухаров В. Н., Мольков В. В.** Нормальная скорость пламени пропановоздушных смесей при высоких давлениях и температурах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 1. С. 57–64.
22. **Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б. В. Раушенбах, С. А. Белый, И. В. Беспалов, В. Я. Бородачев, М. С. Волынский, А. Г. Прудников.** М.: Машиностроение, 1964.

*Поступила в редакцию 7/X 2006 г.,
в окончательном варианте — 19/III 2007 г.*