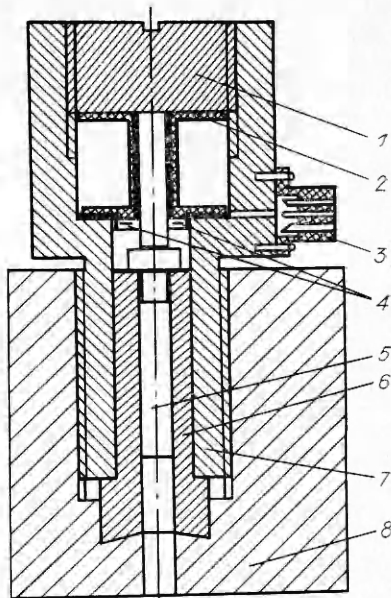


Рис. 3. Датчик ударных нагрузок с встроенной намагничивающей и измерительной системой.
 1 — разъемы; 2 — гайка; 3 — ползуны феррозондового магнитометра; 4 — намагничивающая катушка; 5, 6 — плунжерная пара; 7 — корпус датчика; 8 — стенка камеры.



ничивание крешера осуществляется с помощью электромагнита. Однако в этом случае калибровка крешера и аппаратуры должна проводиться по давлению внутри камеры с помощью эталонного прибора. В частности, датчик с вынимаемым крешером (см. рис. 1) может служить таким эталоном, так как крешеры могут быть легко изготовлены в больших количествах, строго откалиброваны. Пока не удалось получить достоверные экспериментальные данные о динамических характеристиках магнитоупругого крешера. Однако известно [5], что время срабатывания механизма переключения магнитных доменов (время скачка Баркгаузена) составляет 10^{-5} — 10^{-4} с. Это позволяет оценить время срабатывания магнитоупругого крешера в 10^{-5} — 10^{-4} с.

Таким образом, в работе предложен новый вариант магнитоупругого крешера, позволяющего осуществлять бесконтактный съем информации. Материалы, использованные для его изготовления, гарантируют высокую надежность работы датчика, точность измерения и автономность работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов Б. В. и др. Материальная часть и основы артиллерийских систем.— М., 1974.
2. А. с. 853434 СССР, МКИ G 01 L1/12, Материал крешера/ В. Ф. Новиков, Е. В. Долгих.— Оpubл. 07.08.81, Бюл. № 29.
3. Кифер И. П. Испытания ферромагнитных материалов.— М.: Энергия, 1969.
4. Веденев М. А., Дрожжина В. П., Куликов В. А. Высокочувствительный магнитометр с феррозондовым индикатором для исследования магнитных свойств ферромагнитных пленок // Исследования в области теоретического и прикладного магнетизма.— Свердловск, 1967.
5. Рудяк В. М. Процессы переключения в нелинейных кристаллах.— М.: Наука, 1986.

Поступила в редакцию 6/IV 1987,
 после доработки — 7/VII 1988

УДК 533.661.172

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕЧЕНИЙ С ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ В УДАРНЫХ ТРУБАХ

А. Б. Британ, А. П. Зуев, А. Ю. Стариковский
 (Долгопрудный)

Ударные трубы — достаточно простой и удобный инструмент для изучения физико-химических превращений в нагретых газах. Термодинамические параметры и глубина химических превращений в таких условиях легко варьируются заданием исходного состава газа и скорости ударной волны (УВ) [1].

Кинетика реакций обычно исследуется в условиях, когда экзотермика реакций несущественно влияет на газодинамику течения. Это до-

стигается, как правило, значительным (до 90 %) разбавлением исследуемого газа в инертной среде, например в аргоне [2]. Кинетическую информацию в этих опытах получают из спектральных наблюдений, а для определения термодинамических параметров измеряют скорость УВ v_s . В некоторых случаях контролируют и давление за отраженной волной p_5 , которое, как правило, согласуется с расчетом для невязкого совершенного газа с постоянным показателем адиабаты [3].

При уменьшении доли разбавителя экзотермика реакций начинает влиять на процесс формирования условий в потоке. Измеряя скорость отраженной волны [4] либо один из термодинамических параметров смеси [5], в ударных трубах широко изучали времена индукции и воспламенения различных газов [6, 7], а также константы скорости химических превращений [8]. К экспериментам, в которых доля разбавителя не превышает 40—70 %, относится и моделирование процессов охлаждения смесей $N_2O + CO + He$ в соплах ударных труб [9—13]. Интерес к таким смесям объясняется особенностями реакции $N_2O + CO$, которые обеспечивают так называемую сверхравновесную накачку уровней CO_2 колебательно-возбужденными продуктами [14].

В [15] обоснована возможность использования такой накачки в охлаждающихся потоках, а в [10] проведено сопоставление значений колебательных температур и коэффициента усиления, измеренных в реагирующей смеси $N_2O + CO$. Подробности сравнительного анализа, использованного в [10], и способ расчетного моделирования составов продуктов реакций обсуждаются в [9]. По поводу условий во входной части сопла авторы [9] ограничиваются качественными соображениями, из которых следует, что влияние тепловыделения в ходе реакций на процесс отражения УВ от торца не учитывалось.

Подобный подход не согласуется с выводами [8, 16] о значительном влиянии воспламенения на процесс отражения УВ в трубе, а также с результатами работы [17], в которой для смеси, близкой по составу, показано, что горение за отраженной волной может переходить в детонацию.

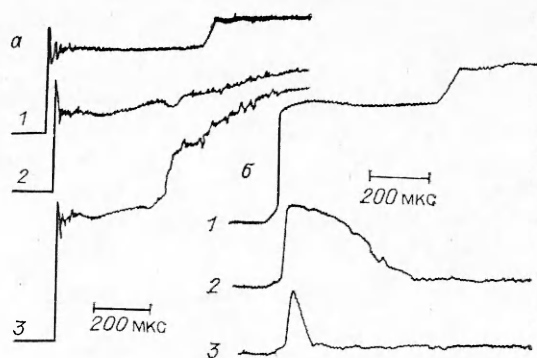
В данной работе рассматриваются особенности формирования параметров торможения в смеси $0,1N_2O + 0,2CO + 0,7He$, которая использовалась ранее для моделирования в ударной трубе характеристик N_2O - и CO_2 -лазеров [13, 18]. При составлении смеси медицинская закись азота и другие газы брались непосредственно из баллонов без предварительной очистки и осушки от примесей аналогично [13]. Часть опытов проводилась с составом, в котором вместо CO использовался N_2 , а также с инертной смесью сравнения $0,1CO_2 + 0,2N_2 + 0,7He$.

Параметры потока в ударной трубе с внутренним диаметром $d = 50$ мм контролировались оптическими методами и с помощью измерения давления. Основные размеры и конструкция установки приведены в [19]. В измерительном сечении, расположенном на расстоянии 15 мм от торца трубы, использовались три канала оптической регистрации: фотодиод $InSb$ и фотосопротивление $GeAu$, снабженные светофильтрами на 4,3 и 4,8 мкм полушириной 0,25 мкм, а также спектральный прибор ИКС-21 с призмой из LiF (дисперсия $20 \text{ см}^{-1}/\text{мм}$ при $\lambda = 4,5 \text{ мкм}$). Миниатюрные пьезодатчики устанавливались в торце и в боковой стенке трубы на расстоянии 15 и 115 мм от торца. При монтаже датчиков принимались специальные меры для устранения стыков и уступов на внутренней поверхности канала. Синхронизация аппаратуры и измерения скорости v_s осуществлялись двумя лазер-шлирен-системами, расположенными в сечениях 15 и 315 мм от торца трубы [19], причем сечение, расположенное вблизи торца, использовалось также для определения скорости отраженной волны v_R .

При начальном давлении смеси $p_1 = 18 \div 118 \text{ Торр}$ $v_s = 2 \div 4,3 \text{ км/с}$. В качестве толкающего газа служил водород либо гелий. Труба откачивалась диффузионным насосом до давления 10^{-4} Торр .

Рис. 1. Типичные осциллограммы давления на торце (а) и излучения вблизи торца (б).

1 — смесь $0,1\text{CO}_2 + 0,2\text{N}_2 + 0,7\text{He}$,
 $p_1 = 18,7$ Торр, $v_s = 1,601$ км/с;
 2, 3 — смесь $0,1\text{N}_2\text{O} + 0,2\text{N}_2 + 0,7$
 He , $p_1 = 47,2$ Торр, $v_s = 1,679$ км/с
 (2), $p_1 = 28,1$ Торр, $v_s = 1,846$ км/с
 (3).

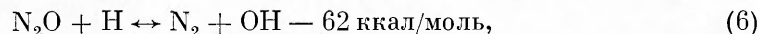
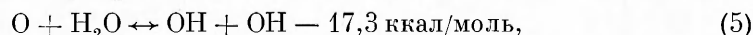
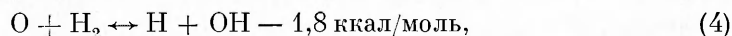
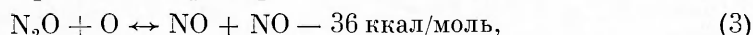
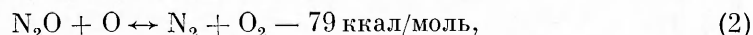
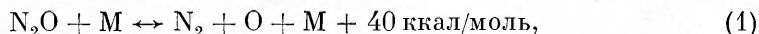


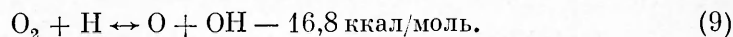
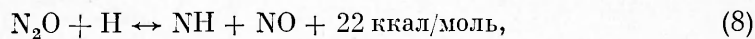
Проведено три серии измерений, в среднем по двадцать опытов с каждой смесью. Для калибровки измерительной аппаратуры (оптических каналов, пьезодатчиков), а также для определения рабочего времени установки в различных режимах проведены серии экспериментов в инертных смесях.

Результаты измерения давления за отраженной волной p_5 показали, что в пределах точности калибровки датчиков (погрешность калибровки 5—7%) и определения скорости давление согласуется с расчетом для измеренной скорости v_s . Скорость отраженного фронта v_R совпадала с расчетной в пределах 2—3%. В рассмотренных условиях ($p_5 = 1,5 \div 10$ атм, температура за отраженной волной $T_5 = 1100 \div 2300$ К, степень черноты излучающего объема газа $\epsilon \approx 1$) излучение CO_2 ($\lambda = 4,36$ мкм) соответствует температуре смеси и хорошо коррелирует с поведением давления на торце (рис. 1, 1). Параметры торможения у торца практически постоянны ~ 500 мкс после отражения УВ и скачкообразно подрастают в момент прихода в измерительное сечение возмущения от контактной поверхности. Указанный промежуток служит характеристикой рабочего времени вблизи торцевой стенки трубы t_5 . Величина t_5 слабо зависела от начального давления смеси и уменьшалась до 350 мкс при максимальном значении $v_s \approx 2$ км/с. В измерительном сечении, расположенном на расстоянии 115 мм от торца, $t_5 = 150 \div 250$ мкс.

Во второй серии опытов, проведенной в близких условиях со смесью $0,1\text{N}_2\text{O} + 0,2\text{N}_2 + 0,7\text{He}$, изучалось поведение параметров торможения в процессе термического распада N_2O . Заметим, что при $v_s < 1,6$ км/с ($T_5 < 1600$ К) характерное время термического распада N_2O составляло 1—2 мс, что примерно вдвое превышает продолжительность рабочего времени установки. В связи с этим полученные осциллограммы давления и ИК-излучения N_2O ($\lambda = 4,5$ мкм) практически не отличались от приведенных на рис. 1, 1.

С увеличением v_s до 1,65 км/с (см. рис. 1, 2) проявляется нестационарный характер в поведении давления и температуры. Давление на торцевой стенке начинает слабо падать через ~ 100 мкс после отражения УВ и затем плавно повышается все рабочее время ($t_5 \approx 420$ мкс). Уменьшение амплитуды ИК-излучения связано с изменением темпа распада N_2O в элементарных реакциях:





Реакции (4)–(9) включены в общую схему химических превращений из-за возможного присутствия следовых примесей H_2 и H_2O [9]. Указанные примеси могут попадать в объем трубы из-за десорбции воды со стенки, а также в результате использования в некоторых экспериментах водорода в качестве толкающего газа. Достаточно высокий уровень откачки канала перед опытом обеспечивал концентрацию примесей $\leq 0,1\%$. Однако из измерений за УВ ультрафиолетового излучения ($\lambda = 3070 \text{ \AA}$) следует наличие в ударной трубе значительных количеств гидроксила OH . Детальный анализ процессов отражения, учитывающий влияние химических превращений (1)–(9), в настоящее время возможен только при численном решении системы нестационарных уравнений газовой динамики и химической кинетики. Для этого необходимы также сведения о константах химических реакций, которые не всегда надежны [1, 9]. Вместе с тем некоторые закономерности, связанные с влиянием термического распада на процесс отражения УВ, можно проследить при совместном анализе результатов эксперимента и данных численного моделирования химических превращений, проведенном в [9]. В частности, понижение давления на начальном этапе после отражения, по-видимому, связано с развитием эндотермических стадий (1), (8), которые достаточно быстро сменяются вторичными реакциями (2)–(7) с выделением тепла. Соответствующее повышение температуры и автоускорение реакций приводят к увеличению давления.

При $v_s = 1,7 \text{ км/с}$ (см. рис. 1, 3) термический распад N_2O заканчивается значительно раньше. Однако поведение давления существенно не отличается от предыдущего случая. Здесь быстрый распад N_2O снижает эффективность стадий (2) и (6), в которых образуется основное количество молекул N_2 , обеспечивающих повышение давления в продуктах [9].

Экспериментальные значения p_{51} за отраженной волной сравниваются с расчетными данными на рис. 2, а. Давление p_5 на графике нормировано на величину начального давления смеси p_1 . Расчетная кривая 2 получена без учета химических превращений, а кривая 1 — в предположении мгновенного распада N_2O за отраженной волной. Результаты измерений 3 и 4 соответствуют начальной амплитуде сигнала в момент прихода к датчику фронта УВ, а 5, 6 — амплитуде в конце рабочего времени t_5 . Видно, что во всем диапазоне условий давление на торце в начальный момент времени соответствует расчету с замороженными химическими реакциями (см. рис. 2, 2). Эффект тепловыделения в экзотермических стадиях повышает давление газа и точки 4 приближаются к расчетной кривой 1. Влияние тепловыделения особенно заметно при $v_s \approx 1,6 \text{ км/с}$, т. е. при температурах активного распада N_2O .

Разброс экспериментальных значений p_{51} на рис. 2 помимо погрешности измерения p_5 связан также с проявлением общей закономерности, свойственной моделированию химических превращений в ударных трубах. Равновесные параметры в продуктах реакций достигаются только в тех режимах, когда характерное время лимитирующей стадии $t_c < t_5$. Поскольку данные, приведенные на рис. 2, получены при различных значениях p_1 , это означает, что величины t_c зависят от p_1 .

Характеристики опытов приведены в таблице, из которой видно, что с ростом p_1 относительное отклонение измеренного значения p_5 от расчетного сокращается. Величина $\Delta p_5^0 = (p_5^1 - p_5^0)/p_5^0$ соответствует амплитуде сигнала давления в начальный момент времени, а Δp_5^1 — в конце рабочего времени t_5 (расчетное значение p_5^0 получено без учета химических превращений). Обращаясь в связи с этим к рис. 1, 3, заметим, что в этом опыте, по-видимому, ни одна из стадий распада N_2O ((2), (3), (6), (8)) не является лимитирующей в формировании равновесных параметров. Быстрое исчезновение N_2O не обеспечивает равновесных

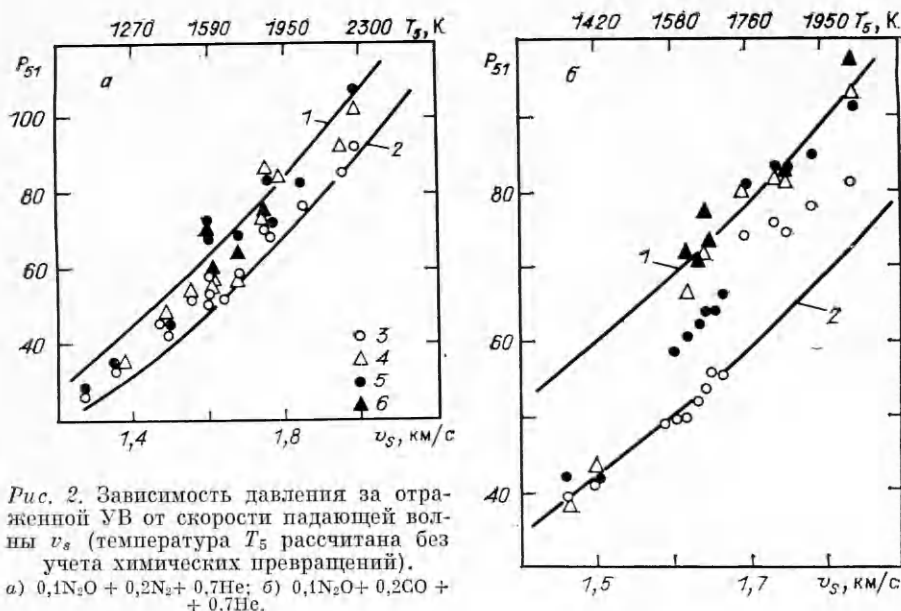
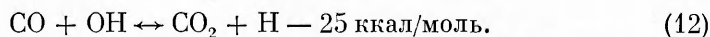
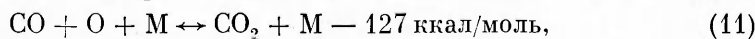
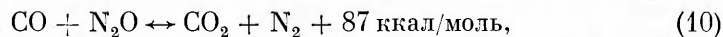


Рис. 2. Зависимость давления за отраженной УВ от скорости падающей волны v_s (температура T_5 рассчитана без учета химических превращений).
 а) $0,1N_2O + 0,2N_2 + 0,7He$; б) $0,1N_2O + 0,2CO + 0,7He$.

значений p_5 ни на торцевом датчике, ни на расстоянии 115 мм от торца. Учитывая данные, приведенные в таблице и на рис. 2, а, можно констатировать, что в условиях проведенных измерений давление за отраженной волной приближается к равновесной величине только при максимальных значениях $p_1 \approx 100$ Торр.

В следующей серии опытов использовалась смесь $0,1N_2O + 0,2CO + 0,7He$, в которой наряду с элементарными стадиями (1)–(9) происходят реакции [9]



Введение горючего при высокой эффективности элементарных стадий (6), (12), протекающих по цепному механизму, ускоряет химические превращения и повышает тепловую энергию смеси. Расчеты [9, 20] показывают, что основная доля молекул CO_2 и N_2 образуется в период индукции и воспламенения смеси в элементарных стадиях (1), (6), (10). При догорании из-за снижения концентрации N_2O возрастает роль стадий (11), (12), эффективность которых со временем меняется более плавно [9]. Отмеченные особенности должны сопровождаться более быстрым, чем в предыдущей смеси, установлением равновесных параметров уже на этапе воспламенения.

Смесь	v_s , км/с	p_1 , Торр	p_5 , атм	T_5 , К	Δp_5^0 , %		Δp_5^1 , %	
					1*	2	1	2
$0,1N_2O +$	1,605	18,75	1,250	1588	-2,8	0	-3	—
$0,2N_2 +$	1,608	56,2	3,770	1593	-1,39	0	10,8	11,5
$0,7He$	1,609	93,9	6,304	1594	12,2	10,5	29,7	27,1
$0,1N_2O +$	1,596	18,75	1,22	1570	-0,1	—	14,5	—
$0,2CO +$	1,592	56,2	3,6	1563	-2,7	47,1	26,1	29,6
$0,7He$	1,571	112,4	7,8	1529	5,1	51,2	29,5	46,0

* 1 — торец; 2 — 115 мм от торца.

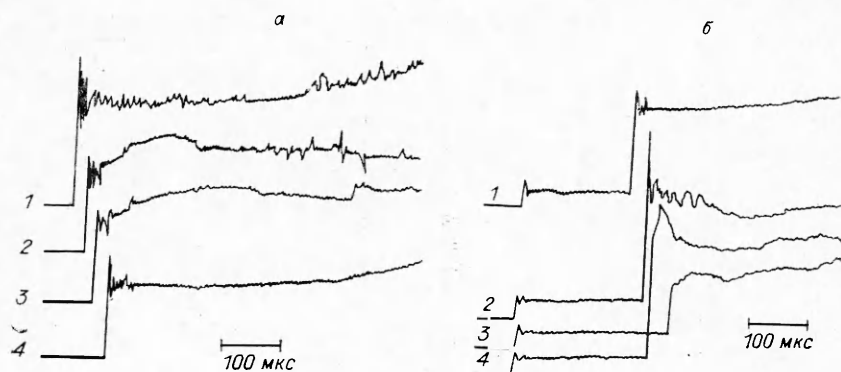


Рис. 3. Типичные осциллограммы давления на торцевой (а) и боковой стенке трубы на расстоянии 115 мм от торца (б) в смеси $0,1 \text{ N}_2\text{O} + 0,2\text{CO} + 0,7\text{He}$.
 p_1 , Торр: 1 — 75, 2 — 112,4, 3, 4 — 56, 2; v_s , км/с: 1 — 1,838, 2 — 1,571, 3 — 1,592, 4 — 1,457.

Подобное допущение широко используется в работах [9—12] в качестве важного аргумента при объяснении механизма сверхравновесной накачки CO_2 . В условиях данной работы это означает, что при минимальном значении $v_s \approx 1,4$ км/с равновесная величина давления устанавливается в пределах 0,1—1 мс после отражения УВ от торца, а при $v_s > 1,85$ км/с — практически сразу в момент отражения.

Результаты измерений, приведенные на рис. 2, б, в целом согласуются с подобными представлениями. Типичные осциллограммы с датчиков давления на торце трубы и в боковой стенке (рис. 3, 1) демонстрируют достаточно быстрое установление постоянного уровня давления в начальный момент времени и далее очень плавный подъем к равновесным значениям за время t_5 . Величина Δp_5 растет с увеличением p_1 , и результаты измерений p_5 приближаются к равновесным значениям (см. таблицу).

Экспериментальные данные рис. 2, б подтверждают важную роль в процессе воспламенения массовой скорости горения смеси $w = \rho u_n$, где ρ — плотность свежей смеси; u_n — нормальная скорость горения. Параметр w растет вместе с v_s и p_1 . Группа точек 5 на рис. 2, б в окрестности $1,6 < v_s < 1,64$ км/с получена при максимальном значении $p_1 = 18,7$ Торр и лежит систематически ниже расчетных значений, соответствующих кривой 1. Согласно рис. 3, 4, воспламенение развивалось 100 мкс после отражения УВ от торца, однако все рабочее время ($t_5 \approx 400$ мкс) давление не успевало выйти на равновесный уровень.

С ростом p_1 должна уменьшаться относительная концентрация примесей в трубе и роль элементарных стадий (4)—(9) может падать. Вместе с тем с повышением p_1 ускоряются стадии (4), (5). Сравнивая с расчетом экспериментальные данные [5], легко увидеть, что распад N_2O не обеспечивает достаточно быстрый выход давления на равновесный уровень. Важную роль в этом процессе, по-видимому, играют вторичные реакции с участием промежуточных продуктов и радикалов. Осциллограммы давления на рис. 3, 2, 3 хорошо коррелировали с поведением ИК-излучения. В момент воспламенения появлялось и резко возрастало излучение CO_2 ($\lambda = 4,34$ мкм) и уменьшалась амплитуда излучения N_2O ($\lambda = 4,5$ мкм). При $v_s > 1,65$ км/с концентрация CO_2 в продуктах быстро выходила на квазистационарный уровень и далее медленно увеличивалась.

Сравнивая результаты экспериментов, приведенные на рис. 1, 2 и 3, 2, легко увидеть, что замена N_2O на CO значительно ускоряет термический распад N_2O . Образование молекулярных продуктов при воспламенении смеси сильнее сказывается и на газодинамических особенностях процесса отражения УВ. Датчик давления в боковой стенке (см.

Рис. 4. Относительные отклонения скорости отраженной волны от расчетного значения в зависимости от T_5 .

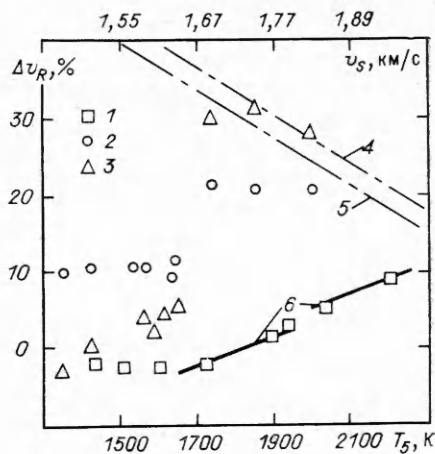
рис. 3, 4) регистрирует нарастающий профиль давления за отраженной волной, которая непрерывно усиливается волнами сжатия от фронта горения [4, 5]. Скорость отраженной волны v_R в данном случае помимо условий торможения газа у торца определяется и величиной w , от которой зависит поступление продуктов горения в объем и повышение p_5 . С увеличением начального давления растет w и перед фронтом горения формируется вторичная УВ, в сторону торца за вторичной волной движется волна разрежения, выравнивающая параметры в продуктах до равновесной величины на торцевой стенке (см. рис. 3, 3).

В опыте с $p_1 = 112$ Торр вторичная волна образуется вблизи торца и к моменту прихода к датчику на боковой стенке (см. рис. 3, 2) успевает слиться с отраженной волной с образованием фронта детонации. В данном режиме область течения в пределах ~ 100 мм от торцевой стенки занята волной разрежения со значительными градиентами параметров в продуктах горения.

Эффект ускорения отраженной волны в рассмотренных смесях проявляется также при измерении скорости отраженной волны базовым методом. На рис. 4 точки 1 соответствуют результатам измерения v_R в смеси без CO, 2 и 3 — в смеси с CO ($\Delta v_R = (v_R - v_R')/v_R$), 6 — аппроксимация измерений [16] со смесью $0,06N_2O + Ar$, 4, 5 — расчет $\Delta v_R = (v_R^0 - v_R')/v_R^0$, где v_R' — скорость отраженного фронта при замороженных химических превращениях, а v_R^0 — в приближении мгновенного распада N_2O при начальном давлении смеси 150 (4) и 18 Торр (5). В смеси $0,1N_2O + 0,2N_2 + 0,7He$ монотонное возрастание скорости, связанное с тепловыделением за отраженной волной, не превышает 10% от величины v_R' , рассчитанной без учета химических превращений, и становится заметным только при $v_R > 1,6$ км/с. Примерно с этого же момента экспериментальные точки 4, 5, 6 на рис. 2 начинают приближаться к расчетной кривой 1.

В смеси $0,1N_2O + 0,2CO + 0,7He$ отраженная волна начинает ускоряться несколько раньше, однако также, как и в предыдущем случае, характер изменения величины Δv_R хорошо коррелирует с экспериментальными значениями p_5 , приведенными на рис. 2, б. При базовом методе измерения нестационарной величины v_R трудно ожидать точного соответствия между расчетом и экспериментом, вместе с тем отметим, что точки 2 на рис. 4 ближе соответствуют локальной скорости v_R в момент отражения УВ от торца, а 3 — средним значениям скорости фронта, который ускоряется в процессе тепловыделения.

В заключение сделаем несколько общих замечаний относительно моделирования процессов воспламенения в смеси $N_2O + CO + He$. Результаты, приведенные на рис. 2 и 4, обнаруживают пороговый характер в поведении параметров при $T_5 \sim 1600 \div 1700$ К. Начало активного распада азота при этих температурах согласуется с наблюдавшимся в [14, 21] эффектом неравновесного протекания реакции в смеси $N_2O + CO$. Авторы [14] не указывают, на каком расстоянии от торца проводились измерения, однако, учитывая, что исследуемые составы содержали $\sim 3\%$ N_2O при значительном избытке (до 30%) CO, можно предположить, что полученные результаты испытывали влияние нестационарного ускорения отраженной волны в процессе реакций.



Отличие экспериментальных параметров торможения от расчетных следует учитывать и при анализе данных об эффективности сверхравновесной накачки, которая также зарегистрирована в указанном температурном диапазоне [9, 10, 15]. Основные результаты в этих работах получены путем измерений колебательных температур в сверхзвуковом потоке, а поступательная температура и состав продуктов определялись из расчета. Широкое варьирование начального давления и состава, замена N_2 на CO , как показано выше, вносит изменения в картину формирования параметров торможения, которую нельзя смоделировать с помощью химически инертных смесей.

Сравнивая расчетные значения p_{51} , приведенные на рис. 2, а, б, легко увидеть, что суммарная экзотермика смеси незначительно влияет на максимальное различие между расчетными кривыми 1 и 2. Для $N_2O + N_2 + He$ это отличие изменяется от 22 до 17 %, а при замене N_2 на CO — от 32 до 20 %. Изменение условий формирования параметров в основном определяется не суммарной экзотермикой, а импульсом энергии, которая выделяется в ходе реакций [5]. Проведенные измерения показывают, что в смеси $N_2O + CO$ эта величина значительно выше и может приводить к развитию детонации за отраженной волной. Значительные градиенты параметров и концентраций в продуктах горения вблизи торцевой стенки трубы неизбежно повлияют на результаты опытов в сверхзвуковом потоке. Развитие детонации в таких смесях в принципе не должно отличаться от аналогичных явлений, хорошо изученных в ударных трубах с горючими смесями $2H_2 + O_2 + Ar$ [4, 5], а также с углеводородами [23]. Подобные эксперименты планируются в дальнейшем со смесью $0,1N_2O + 0,2CO + 0,7He$ при контролируемом уровне примеси H_2 в канале.

Авторы благодарят Г. Д. Смехова за расчеты равновесных составов и Н. Н. Кудрявцева за полезные обсуждения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов И. М., Заслонко И. С., Петров Ю. П. Термический распад N_2O/AN СССР. ИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1974.
2. Dean A. M. Intern. Chem. Kin., 8. 459.
3. Baber S. C., Dean A. M. Intern. J. Chem. Kin., 1975, 7, 381
4. Солоухин Р. И. Ударные волны и детонация в газах.— М., 1963.
5. Meyer J. W., Cohen L. M., Oppenheim A. K. Comb. Sci. Tech., 1973, 8, 185.
6. Борисов А. А., Когарко С. М., Любимов А. В. ПМТФ, 1960, 3, 75.
7. Lifshitz A. // Shock tubes and waves.— Sydney, 1983.
8. Drummond L. J. Austr. J. Chem., 1968, 21, 2631.
9. Кондрашов С. В., Крючков С. И., Кудрявцев И. П. и др. Исследование механизма сверхравновесной накачки ассиметричной моды CO_2 в газодинамическом лазере на реагирующей смеси $CO-N_2O-H_2$.— Мнск, 1984.— (Препр./АН БССР. ИТМО; № 5).
10. Кудрявцев И. П., Новиков С. С., Светличный И. Б. Докл. АН СССР, 1976, 231, 5, 1113.
11. Кудрявцев И. П., Новиков С. С., Щеглов В. П. ИФЖ, 1986, 10, 3, 405.
12. Кудрявцев И. П., Новиков С. С., Светличный И. Б. ПМТФ, 1974, 5, 9.
13. Тестов В. Г., Конев Ю. Б., Крючков С. И. и др. ФГВ, 1987, 23, 3, 16.
14. Заслонко И. С., Когарко С. М., Мозжухин Е. В. и др. ФГВ, 1978, 14, 1, 3.
15. Заслонко И. С., Когарко С. М., Чириков Ю. В. Докл. АН СССР, 1974, 217, 1, 131.
16. Drummond L. J., Heschok. Austr. J. Chem., 1967, 20, 814.
17. Британ А. Б., Зуев А. П., Стариковский А. Ю. // Фундаментальные проблемы физики ударных волн.— Азау, 1987, 202.
18. Тестов В. Г., Гринь Ю. И. и др. ЖЭТФ, 1976, 71, 1, 88.
19. Зуев А. П., Неодаев С. С., Ткаченко Б. К. Хим. физика, 1985, 4, 10, 1303.
20. Тестов В. Г., Британ А. Б., Гринь Ю. И. и др. ЖТФ, 1987, 57, 5, 883.
21. Заслонко И. С., Когарко С. М., Мозжухин Е. В. и др. ФГВ, 1976, 12, 6, 906.
22. Кудрявцев И. П., Новиков С. С., Светличный И. Б. ФГВ, 1979, 15, 3, 93.
23. Vermeer D. J., Meyer J. W., Oppenheim A. K. Comb. Flames, 1972, 18, 327.

Поступила в редакцию 12/IV 1988