

УДК 533.6.011.72:541.12

БРИТАН А. Б., ТЕСТОВ В. Г., ХМЕЛЕВСКИЙ А. Н.

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ В СМЕСЯХ $N_2O - CO(N_2) - He$

В течение ряда лет в ударных трубах исследуются рабочие смеси для CO_2 -лазеров, использующих реакцию $N_2O - CO$ [1]. Термический распад N_2O при температурах ~ 1500 К приводит к образованию колебательно-возбужденных продуктов [2], которые могут часть своей энергии передавать молекулам CO_2 путем $V - V'$ -обмена и увеличивать коэффициент усиления смеси $CO_2 - N_2 - He$. Использование дополнительной энергии экзотермической реакции $CO - N_2O$ связано с протеканием химических превращений в потоке, причем степень завершенности реакции зависит как от конкретной геометрии устройства, так и от состава смеси и уровня колебательного возбуждения реагентов [1]. В присутствии примесей H_2 , N_2O брутто-реакция $CO - N_2O$ протекает по цепному механизму [3]. В ударных трубах с уровнем предварительной откачки канала $10^{-1} - 10^{-2}$ торр при использовании в качестве толкающего газа водорода содержание примесей H_2 может достигать от 0,01 до 0,1% даже при осушке исходных компонентов смеси. Это означает, что в большинстве случаев расчетные составы для «сухих» смесей в экспериментах не реализуются. Примеси сокращают характерное время установления равновесных концентраций CO_2 и N_2 в ГДЛ на продуктах реакции до 0,3–1 мс [4]. В таких же пределах изменяется и «рабочее время» большинства лабораторных ударных труб, поэтому процесс истечения через сопло происходит при переменных параметрах торможения и составе смеси во входной части сопла.

Эффективность колебательного энергообмена в химически реагирующей смеси $N_2O - CO$ часто оценивают, сравнивая величину коэффициента усиления k_v , измеренного в сверхзвуковом потоке реагирующей смеси, и смеси, моделирующей равновесные продукты реакции [1]. Результаты такого сравнения зависят от особенностей формирования параметров в смесях с различным исходным составом. Взрывное тепловыделение в ходе брутто-реакции $N_2O - CO$ влияет на скорость отраженной волны, а в некоторых случаях приводит к развитию детонации и существенному отличию параметров торможения от условий за отраженной волной в модельной смеси [5].

Воспламенение может инициироваться и за падающей ударной волной, а при использовании в качестве толкающего газа водорода — и в контактной области (в процессе активного перемешивания N_2O с H_2). При этом реализуется типичный режим так называемого диффузионного горения, который ранее отмечался во многих опытах с воздухом и другими смесями газов, содержащих окислитель. Условия в потоке для нескольких экспериментов подобного типа приведены в таблице. Индексом 2 обозначены давление P и температура T за падающей ударной волной, 3 — температура толкающего газа (водород), рассчитанная по известным соотношениям без учета процессов горения. Во всех случаях условия на контактной поверхности соответствовали требованиям самовоспламенения смеси $2H_2 - O_2$ [6–10]. В экспериментах с азотом [13] горение в контактной области фиксировалось непосредственно по излучению и косвенным образом по выходу продукта реакции (H_2O) вблизи торца трубы. Заметим, что влияние диффузионного горения водорода на процесс формирования потока за отраженной волной отмечалось только в [7, 9]. Вопросы учета подобных эффектов при моделировании в ударных трубах продуктов реакции $N_2O - CO$ ранее не обсуждались.

Цель данной работы — изучение закономерностей поведения давления за ударными волнами в смесях $N_2O - CO - He$. Давление сравнительно просто поддается измерению и вместе с тем отражает общий характер влияния условий эксперимента на формирование потока в ударной трубе. Эффекты воспламенения смеси за ударными волнами, а также горение водорода в контактной области анализируются с точки зрения их влияния на параметры торможения и оптические свойства потока в сопле ударной трубы. В этом же контексте обсуждается корректность моделирования условий за отраженной волной с помощью смесей, близких по составу к равновесным продуктам реакции $N_2O - CO$ [1].

1. Опыты проводились в ударной трубе, подробно рассмотренной в [4]. Канал

M_s	P_2 , МПа	T_2 , К	T_3 , К	P_{st}/P_s	Источник
Воздух					
6,2	0,61	2198	158	0,95	[6]
7,17	0,08	2780	140	1,1	[6]
12,2	0,18	5670	279	2,1	[7]
10,6	0,25	4960	210	1,5	[7]
5,6	0,09	1869	170	0,7	[8]
6,6	0,07	2432	150	0,95	[8]
6	—	2085	162	0,9	[9]
5,7–6,8	0,05–0,07	1920–2550	168–147	—	[10]
6,9–7,3	0,038–0,042	2617–2870	145–138	—	[10]
7,84	5,0	3200	130	1,15	[11]
6–8,8	0,055–0,43	2030–2870	165–134	—	[12]
Кислород					
8	0,1	3211	125	1,05	[8]
6,4–7,4	0,065–0,087	2228–2823	154–136	—	[10]
(0,24N ₂ O+Ar)					
3,2	0,065	4120	234	—	[13]

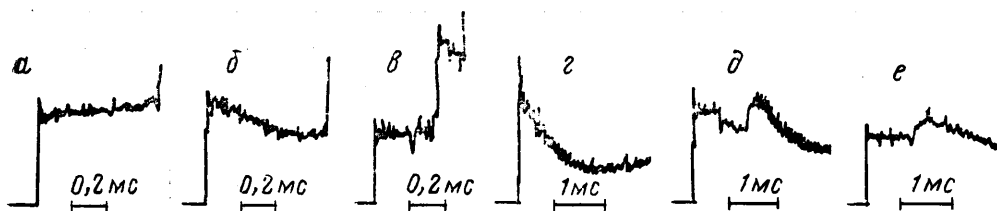
длиной 8,1 м состоял из квадратной рабочей секции 0,098×0,098 м² и цилиндрического разгонного участка. Камера высокого давления с внутренним диаметром 0,098 м имела длину 0,8 м и в отдельных опытах удлинялась до 1,8 м. Диафрагмы из листовой меди различной толщины разрушались давлением. В торцевой стенке рабочей секции устанавливались сопла различного профиля, которые использовались для получения сверхзвукового потока продуктов реакции смеси 0,1 N₂O–0,2 CO(N₂)–0,7 He. Замена N₂ на CO позволяла изучать формирование течения в условиях влияния экзотермической реакции CO–N₂O.

В смеси использовалась медицинская закись азота и другие газы из стандартных баллонов без предварительной очистки и осушки. Толкающим газом служил гелий либо водород. Разбавление водорода азотом и изменение давления толкающего газа позволило изменять в широких пределах величину скорости ударной волны $V_s=1,3–2$ км/с. Начальное давление исследуемой смеси составляло 0,01–0,02 МПа. Истечение из сопла происходило в демпферный бак объемом 2 м³, который отделялся от канала тонкой мембраной, устанавливаемой в критическом сечении сопла. Коэффициент оптического усиления измерялся за срезом сопла с помощью электро-разрядных N₂O- и CO₂-лазеров и стандартной двухпроходной схемы [4]. Труба вакуумировалась форвакуумным насосом до давления ~0,26 Па. Скорость ударной волны V_s измерялась базовым методом (расстояние между датчиками скорости 0,1 и 0,347 м).

Характеристики течения за падающей ударной волной и во входной части сопла изучались по результатам измерения давления. Миниатюрные пьезодатчики устанавливались в боковой стенке трубы на расстояниях 0,47 и 0,01 м от торца, а также в торце и за срезом сопла. Запись сигналов проводилась с помощью запоминающих осциллографов.

2. Влияние горения на параметры газа в пробке за падающей ударной волной можно проследить по осциллограммам с датчиков давления, приведенных на фиг. 1, а–в. Давление за отраженной волной проиллюстрировано на фиг. 1, г–е. Осциллограммы а, б, е, д получены в опытах со смесью N₂O–N₂–He (далее обозначена как смесь 1), осциллограммы в, г – со смесью N₂O–CO–He (обозначена как смесь 2). В опытах со смесью 1 число Маха падающей ударной волны $M_s=3$, а со смесью 2 – $M_s=3,5$. В качестве толкающего газа во всех случаях, кроме фиг. 1, а, е, служил водород, в остальных – He. В смеси 1 замена водорода гелием позволяет исключить эффект горения. В результате давление за фронтом падающей ударной волны достаточно однородно (см. фиг. 1, а). Расчетная скорость отраженной волны W_R в этом режиме согласуется с экспериментальной, которую легко определить по моменту прихода к датчику отраженного фронта.

В опытах с водородом на передней границе контактной области развиваются возмущения, связанные с неустойчивостью фронта горения. Осцил-



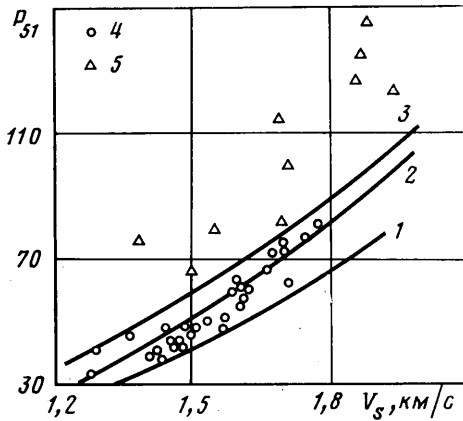
Фиг. 1

лограмма, приведенная на фиг. 1, б, показывает, что амплитуда возмущений в смеси невелика. Давление за падающей волной понижается из-за прихода головы волны разрежения, отраженной от торца камеры, и анализ последующих волновых взаимодействий требует дополнительных измерений. Вместе с тем следует отметить, что, несмотря на присутствие волны разрежения, скорость отраженного фронта W_R в этом режиме согласуется с расчетной. При использовании в качестве толкающего газа гелия волна разрежения не успевала догнать пробку и характерное понижение давления за ударной волной на осциллограмме (фиг. 1, а) отсутствует.

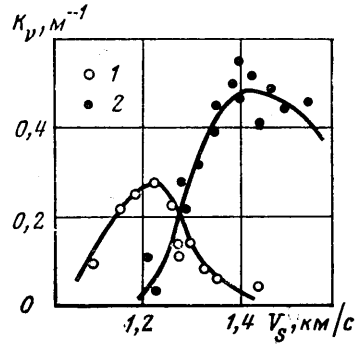
Результаты измерений давления в смеси 2 отличаются появлением значительных колебаний давления за фронтом падающей ударной волны, а в некоторых случаях (см. фиг. 1, в) за ударной волной формировался вторичный скачок давления, связанный с реакцией воспламенения CO . Вторичный скачок образуется из волн сжатия, порождаемых фронтом реакции, и после взаимодействия с падающей либо отраженной волной приводит к формированию фронта детонации [14]. Профиль давления за фронтом детонации, зарегистрированный датчиком давления, установленным вблизи торцевой стенки (см. фиг. 2, г), несколько искажен влиянием волны разрежения, отраженной от торца камеры. Интересно отметить, что скорость W_R , измеренная в этом режиме, почти втрое выше расчетного значения и приближается к скорости фронта падающей ударной волны.

В смеси 1 детонация за отраженной волной не развивалась. Датчик вблизи торца (см. фиг. 2, д) регистрировал типичный профиль давления с характерным уменьшением амплитуды через ~ 500 мкс после момента отражения ударной волны от торцевой стенки. Анализ волновых возмущений показал, что продолжительность рабочего времени трубы в рассмотренном случае ограничивалась приходом к торцу ударной волны, отраженной от контактной поверхности, и должна составлять ~ 1 мс. Появление характерного спада на кривой давления устойчиво повторялось в опытах с указанной смесью и сокращало время работы трубы примерно вдвое по сравнению с расчетным значением, учитывающим развитие пограничного слоя. Спад давления за отраженной ударной волной может объясняться различными причинами и прежде всего упоминавшимся выше эффектом горения водорода. При наличии горения в контактной области наряду с водородом содержатся высокотемпературные продукты горения [6, 9]. При взаимодействии отраженной ударной волны с передней границей продуктов горения в сторону торца отражается волна разрежения, понижающая давление смеси.

Последующий подъем давления связан с ударной волной, отраженной от границы с холодным водородом [7, 9]. Аналогичные осциллограммы давления получены в экспериментах с азотом, а также при использовании гелия в качестве толкающего газа [8]. Поскольку эффекты горения в этих опытах исключались, авторы [8] объясняют появление характерного спада на кривой давления эффектом бифуркации отраженной волны. Бифуркация может развиваться, если давление в пограничном слое P_s меньше давления за отраженной ударной волной P_5 [15]. Используя рассчитанные значения этого критерия (см. таблицу), легко увидеть, что в условиях



Фиг. 2



Фиг. 3

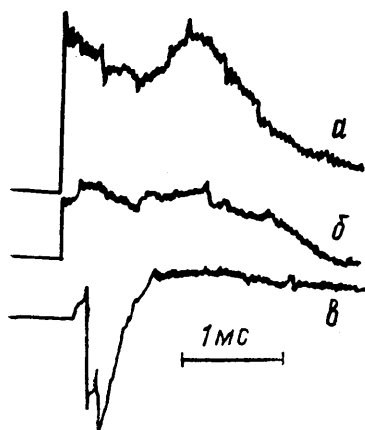
экспериментов [6, 7, 11] спад давления можно объяснить только горением водорода. В остальных случаях возможно влияние бифуркации.

В экспериментах данной работы величина критерия P_{s1}/P_s изменялась от 1,2 до 1,5, поэтому спад давления на торце объясняется эффектом горения водорода. Сделанный вывод подтверждается результатами экспериментов, в которых вместо водорода в камере использовался гелий. Одна из полученных осциллограмм приведена на фиг. 1, e, из которой видно, что провал давления в этих опытах исчезал.

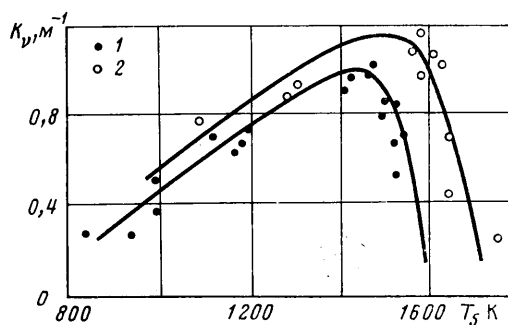
Рассмотренные особенности в поведении давления учитывались при сопоставлении расчетных (кривые 1—3 на фиг. 2) и экспериментальных (4, 5) значений давления P_s за отраженной волной. Расчетные данные для случая замороженных химических реакций в смеси 1 и 2 совпадают и обозначены на графике цифрой 1. Давления в равновесных продуктах реакции для смеси 1 и 2 обозначены 2, 3 соответственно. Результаты измерения давления в смесях 1 и 2 обозначены соответственно цифрами 4, 5 и нормируются на величину начального давления в опыте P_1 . Для смеси 1 экспериментальные значения P_s соответствуют начальной амплитуде сигнала давления в течение ~ 300 мкс после отражения (см. фиг. 1, d).

Обработанные по амплитуде в начальный момент времени экспериментальные точки в пределах разброса согласуются с расчетными данными. При $V_s \leq 1,55$ мм/мкс предпочтительным является расчет с замороженной скоростью реакции. При $V_s > 1,6$ мм/мкс следует учитывать реакцию термического распада N_2O . Для смеси 2 экспериментальные точки отличаются значительным разбросом. Большинство осциллограмм, полученных в этой смеси, повторяют форму кривой давления, приведенной на фиг. 1, г. При обработке осциллограмм принималось, что величина P_s соответствует максимуму на кривой давления. При этом возникла значительная ($\sim 15\%$) погрешность в величине P_s , связанная с высокочастотным шумом измерительного датчика. В нескольких опытах осциллограммы давления отличались от приведенной на фиг. 1, г и повторяли форму, близкую к давлению в смеси 1. Детонация в этих опытах, по-видимому, не возникала, и результаты измерения P_{s1} согласовывались с расчетной кривой. Отмеченная особенность связана с неустойчивостью процесса инициирования горения. Отметим, что большинство экспериментальных значений P_{s1} для смеси 2 лежат выше кривой 3 на 25—30% (фиг. 2).

3. При использовании ударной трубы с соплом в газодинамических исследованиях изменение параметров во входной части сопла неизбежно сказывается на результатах измерений в сопле. Вместе с тем следует заметить, что в большинстве подобных работ со смесями $N_2O-CO(N_2)-He$ вопросы, рассмотренные в данной работе, не обсуждались (см., например, [15]). При расчете параметров торможения в [1] изменение давления за



Фиг. 4



Фиг. 5

отраженной волной в ходе реакции не учитывалось, а повышение температуры определялось по суммарному тепловому эффекту реакции. Проведенные измерения показывают, однако, что давление изменяется от замороженного до равновесного значения, а в смеси 2 может превышать равновесное значение на 30–40%. Зондирование потока в сопле излучением N_2O - и CO_2 -лазеров ($\lambda=10,9$ и $10,6$ мкм соответственно) позволяет сопоставить величину усиления с изменением условий во входной части.

На фиг. 3 приводится экспериментальная зависимость величины коэффициента оптического усиления k_v от скорости падающей ударной волны в смеси 2. Цифрой 1 обозначены результаты зондирования потока на длине волны $\lambda=10,9$ мкм. Цифрой 2 обозначены результаты зондирования потока в смеси 2 на длине волны $\lambda=10,6$ мкм. С ростом скорости V_s от 1,2 до 1,3 км/с усиление на длине волны $\lambda=10,9$ мкм возрастает. При $V_s > 1,3$ км/с распад N_2O приводит к уменьшению усиления и появлению в потоке молекул CO_2 . В диапазоне скоростей $1,4 < V_s < 1,55$ км/с значения k_v отличаются значительным разбросом, появление которого коррелирует с разбросом точек при $V_s > 1,4$ км/с на фиг. 2. Заметим, что усиление на длине волны $\lambda=10,9$ мкм в указанном диапазоне значений V_s исчезало через 200–300 мкс после начала истечения и сменялось появлением усиления на длине волны $\lambda=10,6$ мкм. В экспериментах момент появления усиления излучения CO_2 -лазера отличался плохой повторяемостью, мог смещаться к началу либо к концу рабочего времени установки. В некоторых опытах усиление на длине волны $\lambda=10,6$ мкм вообще отсутствовало.

Сложный характер зависимости величины k_v от параметров торможения и состава не позволяет выделить общую закономерность в поведении усиления при изменении условий на входе. В каждом конкретном случае необходимо контролировать параметры торможения и сопоставлять их величину с поведением осциллограммы усиления в едином временном масштабе. Пример такого сопоставления для смеси 1 приводится на фиг. 4, а–в, где осциллограммы давления на торце (1, а) и за срезом сопла (1, б) сравниваются с осциллограммой усиления N_2O -лазера (1, в), полученной в смеси 1. Датчик в торце зарегистрировал спад давления, связанный с горением водорода. Профиль давления в целом согласуется с аналогичными осциллограммами с датчика в боковой стенке (см., например, фиг. 1, д). Некоторое отличие возникает из-за высокочастотного шума датчика, который появляется в момент удара падающей ударной волны о торец. Шум отсутствует на осциллограмме (фиг. 4, б), поскольку датчик на срезе сопла акустически развязан с корпусом трубы. Характерный спад давления на торце достигает 40%. При этом изменяется и давление на

срезе, которое тонко реагирует на все изменения условий во входной части сопла.

Аналогичным образом ведет себя и амплитуда сигнала зондирующего N_2O -лазера (фиг. 4, *в*). На начальном участке наблюдается усиление сигнала, а последующий спад давления на фиг. 4, *а, б* согласуется по времени с поглощением на фиг. 4, *в*. Повышение давления во входной части сопровождается ростом давления за срезом сопла и появлением усиления, которое медленно уменьшается к концу рабочего времени. Результаты обработки осциллограмм усиления излучения N_2O -лазера в опытах со смесью 1 приводятся на фиг. 5. Цифрой 1 обозначены данные для k_v на заключительной стадии истечения, а 2 — в начальный период, непосредственно после отражения ударной волны от торца. Видно, что величина k_v в конце рабочего времени, когда существенно влияние процессов горения водорода, несколько меньше, чем в начале, когда параметры на входе в сопло соответствуют расчетным.

При температурах ~ 1500 К ($V_s \sim 1,4$ км/с) закись азота активно распадается и происходит резкий спад величины k_v , который согласуется с данными на фиг. 3. Осциллограммы измерений в этой области температур отличались появлением нестационарных колебаний амплитуды и плохо повторяются от опыта к опыту. Заметим, что эффекты, связанные с горением водорода в контактной области, не только сокращают рабочее время, но могут привести к ошибкам при трактовке результатов. Сопоставление данных на фиг. 5 показывает, в частности, что пороговая температура, при которой резко уменьшается величина k_v , по результатам измерений 1 соответствует 1450 К, а по результатам 2 — на 100° выше.

Рассмотренные особенности изменяют картину формирования параметров торможения, которая может существенно отличаться от равновесных условий за отраженной волной, моделируемых в [1] с помощью химически инертных смесей.

Авторы благодарят Г. Д. Смехова за проведенные расчеты равновесных составов смесей за ударными волнами, а также А. П. Зуева за стимулирующие дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крючков С. И., Кудрявцев Н. Н., Новиков С. С. О кинетике химических превращений в смеси CO с N_2O в условиях ГДЛ // Физика горения и взрыва. 1985. № 3. С. 60–68.
2. Заслонко И. С., Когарко С. М., Мозжухин Е. В., Смирнов В. Н. Колебательная неравновесность в реакции N_2O с CO // Докл. АН СССР. 1973. Т. 212. № 5. С. 1138–1141.
3. Борисов А. А., Егоркин С. В., Заманский В. М. и др. Механизм взаимодействия окиси углерода с закисью азота // Кинетика и катализ. 1979. Т. 20. № 6. С. 1395–1403.
4. Тестов В. Г., Британ А. Б., Гринь Ю. И. и др. К вопросу о роли воспламенения на входе в сопло в $N_2O+N_2(CO)+He$ ГДЛ // Журн. техн. физики. 1987. Т. 57. Вып. 5. С. 883–890.
5. Британ А. Б., Зуев А. П., Стариковский А. В. Формирование параметров за отраженной ударной волной в химически реагирующем газе // Фундаментальные проблемы физики ударных волн. 18–21 мая 1987, Азау, Приэльбрусье. Каб.-Балк. АССР: Тез. докл. Т. 1, 2. Черноголовка, 1987. С. 202–204.
6. Flagg R. F. Advances in shock tunnel driving techniques // Advanced Experimental techniques for study of hypervelocity flight. Proc. of the third Hypervelocity Techniques Symp., Denver, Colorado, 1964. P. 89–115.
7. Dunn M. G. Experimental study of high-enthalpy shock-tunnel flow. Pt 1. Shock-tube flow and nozzle starting time // AIAA. J. 1969. V. 7. № 8. P. 1553–1560.
8. Davies L., Edwards D. H. An experimental investigation of the reflected shock pressure-time profiles for air, oxygen, nitrogen, argon, carbon dioxide and acetylene // Aeronaut. Res. Council Repts and Mem. 1967. № 3446. 25 p.
9. Copper J. A. Effects of interface combustion and mixing on shock-tunnel conditions // AIAA J. 1964. V. 2. № 9. P. 1669–1671.
10. Clouston J. G., Gaydon A. G., Glass J. J. Temperature measurement of shock waves by the spectrum-line reversal method // Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A. 1958. V. 248. № 1255. P. 429–444.

11. *Fuerhrer R. G.* Measurements of incident-shock test time and reflected shock pressure at fully turbulent boundary-layer test conditions // Shock Tubes Proc. 7-th Intern. Shock Tube Symp., Toronto, 1969. Toronto, 1970. P. 31-59.
12. *Лашков А. И.* О закономерности движения вязкого газа в ударной трубе // Инж. журн. 1965. Т. 5. Вып. 2. С. 254-260.
13. *Breadly J. N., Kistiakowsky G. B.* Shock waves studies by mass spectrometry. 1. Thermal decomposition of nitrous oxide // J. Chem. Phys. 1961. V. 35. № 1. P. 256-263.
14. *Борисов А. А., Когарко С. М., Любимов А. В.* О применении ударных труб для исследования химических реакций // ПМТФ. 1960. № 3. С. 175-183.
15. *Лосев С. А.* Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977. 335 с.

Москва

Поступила в редакцию
5.V.1988