

ра цилиндра [4]; чем больше диаметр цилиндра, тем больше путь, проходимый фронтом пламени, больше длительность сгорания.

Поступила в редакцию 25/IX 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Malv, G. Ziegler. SAE Techn. Pap. Ser., 1982, N 820759.
2. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968.
3. C. J. Luck, A. R. Burgess, D. H. Desty et al. 14-th Symp. (Intern.) on Combust., 1973.
4. А. П. Воинов. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977.
5. В. Я. Штерн. Механизм окисления углеводородов в газовой фазе. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
6. M. P. Halstead, L. J. Kirsch, C. P. Quinn. Comb. Flame, 1977, 30, 1.
7. А. А. Кельин, С. А. Лесняк. Двигателестроение, 1984, 4.
8. Б. Г. Гаврилов. Химизм предпламенных процессов в двигателях. Л.: ЛГУ, 1970.
9. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука, 1979.
10. J. A. Lo Russo, R. J. Tabaczynski. 11-th Intern. Energy Conversion Eng. Conf. Proc. V. 1, 1976.
11. S. W. Benson. Prog. Energy and Comb. Sci., 1981, 7, 12.
12. M. P. Halstead, A. Prothero, C. P. Quinn. Proc. Roy. Soc. Lond., A322, 1971.
13. W. M. Lee, C. T. Yeh. Phys. Chem., 1979, 83, 7.
14. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ В ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКЕ ВЗРЫВНОГО ТИПА

*А. Б. Бриган, В. А. Левин, Г. Д. Смехов, А. М. Старик,
Ю. В. Туник, А. Н. Хмелевский
(Москва)*

Вопросы моделирования в лабораторных условиях сверхзвуковых потоков колебательно-неравновесных смесей сложного состава продолжают интересовать исследователей в связи с широким использованием этих течений в различных приложениях. Чаще всего подобные исследования проводят с помощью ударных или аэродинамических труб, а также установок с камерой сгорания [1—10]. В ударных трубах моделируют достаточно широкий диапазон условий по параметрам торможения, однако из-за малой продолжительности «рабочего времени» установки в таких экспериментах сложно следить за изменением состава и параметров смеси в процессе измерений. Стационарные аэродинамические трубы позволяют плавно изменять и контролировать условия в потоке, однако температурный диапазон этих установок ограничен значениями <1500 К. В установках с импульсным электродуговым нагревом смеси могут возникнуть проблемы с неоднородностью параметров по сечению, локальным перегревом, диссоциацией и даже ионизацией смеси на оси разряда.

При изучении инверсных характеристик продуктов сгорания особенно полезны результаты экспериментов в импульсных лабораторных установках взрывного типа, которые достаточно компактны, отличаются от ударных труб большей длительностью рабочего процесса и обеспечивают получение высоких параметров торможения исследуемых смесей (температуры до 3000 К, давления до 30 МПа). Поскольку для приготовления и нагрева смеси в таких установках используется реакция горения, в конечных продуктах присутствует большинство компонентов, характерных для составов продуктов сгорания реальных топлив.

В данной работе на установке подобного типа изучались инверс-

ные характеристики продуктов сгорания ацетилено-воздушных смесей. Известно [2, 8, 11], что при сгорании таких смесей в продуктах содержится значительное количество молекулярного кислорода, поэтому наряду с исследованием особенностей горения смесей с избытком окислителя изучался также механизм влияния кислорода на инверсные свойства колебательно-неравновесного потока сложного состава.

Особенности нагрева смеси и характеристики горения

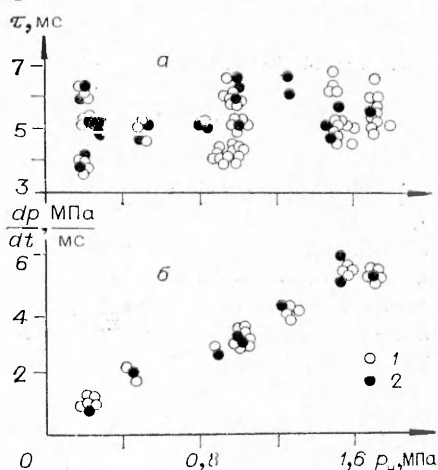
Описание экспериментальной установки и результаты предварительных экспериментов можно найти в работе [11], здесь только укажем, что продукты сгорания из сферической взрывной камеры объемом 2 л расширялись в профилированной сопловой решетке со степенью расширения 140 и высотой критического сечения 0,35 мм. Поперечный размер потока за срезом решетки 500 мм. Специально подобранная мембрана отделяла объем взрывной камеры от соплового блока и разрушалась после завершения процесса горения и установления максимального давления в продуктах взрыва. Поэтому в большинстве экспериментов горение смеси развивалось и заканчивалось в замкнутом шаровом объеме взрывной камеры. По показаниям датчика давления, установленного в стенке камеры, изучались характер нарастания давления и величина максимального давления p_0 в продуктах взрыва. Эти характеристики позволяют судить о степени завершенности реакции и соответствии состава продуктов сгорания расчетному.

Результаты измерения промежутка времени τ между поджигом смеси и достижением максимального давления во взрывной камере приведены на рис. 1, а. Эксперименты проводились со смесью, содержащей 6,54% ацетилена при начальном давлении $p_n = 0,2 \div 2$ МПа. Видно, что величина τ в пределах экспериментального разброса практически не зависит от p_n и составляет ~ 5 мс. Оценка скорости распространения пламени во взрывной камере диаметром 300 мм (50 м/с) превосходит скорость медленного горения, но значительно меньше скорости детонационного горения ацетилена в сферических камерах [12]. Известно также [13, 14], что каждая порция сгоревшего газа, расширяясь, сжимает остальной газ, который, нагреваясь, отдает часть тепла в стенку. При этом в объеме появляются значительные температурные градиенты и, как следствие, максимальное давление в продуктах взрыва не достигает расчетного значения [11—13]. Измерения, проведенные в данной работе, показали, что отличие экспериментальных значений p_0 от данных равновесного расчета может достигать от 10 до 20%, уменьшаясь по мере роста начального давления исходной смеси.

Отмеченные особенности горения приводят к тому, что условия сгорания смеси в центре камеры и у стенки могут существенно различаться. В частности, газ у стенки камеры, сжатый до размеров тонкого слоя, чрезвычайно быстро сгорает [13]. Продукты сгорания начинают двигаться со значительной скоростью, образуются волны сжатия, которые, складываясь к моменту окончания горения, достигают большой амплитуды. В результате давление во взрывной камере носит колебательный характер (рис. 2).

Рис. 1. Зависимость τ (а) и $\frac{dp}{dt}$ (б) от начального давления исходной смеси.

1 — базовая смесь; 2 — смесь, разбавленная молекулярным кислородом ($\sim 40\%$ по объему).



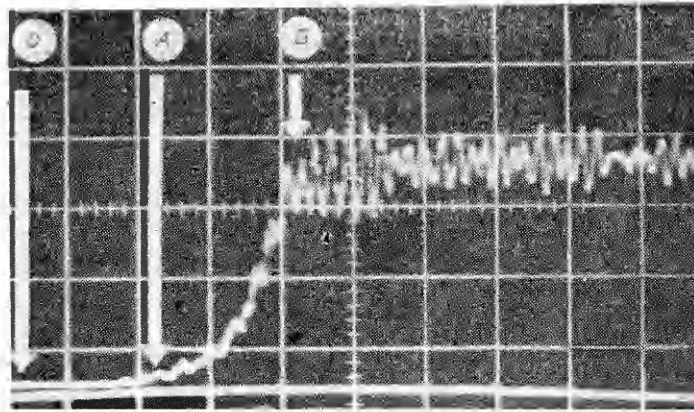


Рис. 2. Типичная осциллограмма с датчика давления, установленного в боковой стенке взрывной камеры.
0 — момент поджига смеси; А — окончание периода индукции; В — момент завершения взрыва, после которого давление в камере приобретает колебательный характер.

Величина τ — интегральная характеристика процесса горения не отражает соотношение между временем индукции и взрыва, которое может изменяться в зависимости от концентрации в исходной смеси горючего и окислителя [14]. При анализе условий формирования параметров во взрывной камере удобнее пользоваться величиной $\frac{dp}{dt}$, которая вычисляется в окрестности точки перегиба на осциллограмме давления между точками А и В. Значение $\frac{dp}{dt}$ характеризует скорость взрыва, а следовательно, определяет толщину ограничивающей мембраны и момент ее разрушения — параметры, необходимые для надежной повторяемости опытов в эксперименте [11]. Результаты измерений $\frac{dp}{dt}$ в смесях различного состава приведены на рис. 1, б, где видно, что $\frac{dp}{dt}$ линейно возрастает при увеличении p_n и практически не зависит от концентрации кислорода в исходной смеси. Детальный анализ условий горения во взрывной камере требует наряду с контролем p_0 проведения измерений температуры T_0 и концентраций основных компонентов в продуктах взрыва. Такие эксперименты предполагается выполнить в дальнейшем, а в данной работе считалось, что состав продуктов взрыва соответствует равновесному. Для определения температуры продуктов взрыва T_0 , так же как и в [5, 6, 11], использовались экспериментальные значения p_0 , которые связаны с температурой простой зависимостью

$$p_0/p_n = T_0\mu_n/(T_n\mu_0),$$

где μ — молекулярная масса смеси.

Исследование газодинамической структуры сверхзвукового потока

Покадровое фотографирование картины течения продуктов сгорания в моносопле и за срезом сопловой решетки проводилось с помощью малогабаритной теневой системы, собранной на базе двух объективов и искрового источника света, конструкция которого описана в [15]. Первый объектив с фокусным расстоянием $f_1 = 0,5$ м и диаметром светового поля 0,08 м использовался для формирования параллельного пучка света, который проходил через изучаемую неоднородность и фокусировался вторым объективом ($f_2 = 1,2$ м) в плоскости ножа фотоприемной части схемы. Использовались также оптические детали теневого прибора ИАБ-451 для формирования изображения рабочей части и кассета с широкоформатной аэрофотоплёнкой (тип 49).

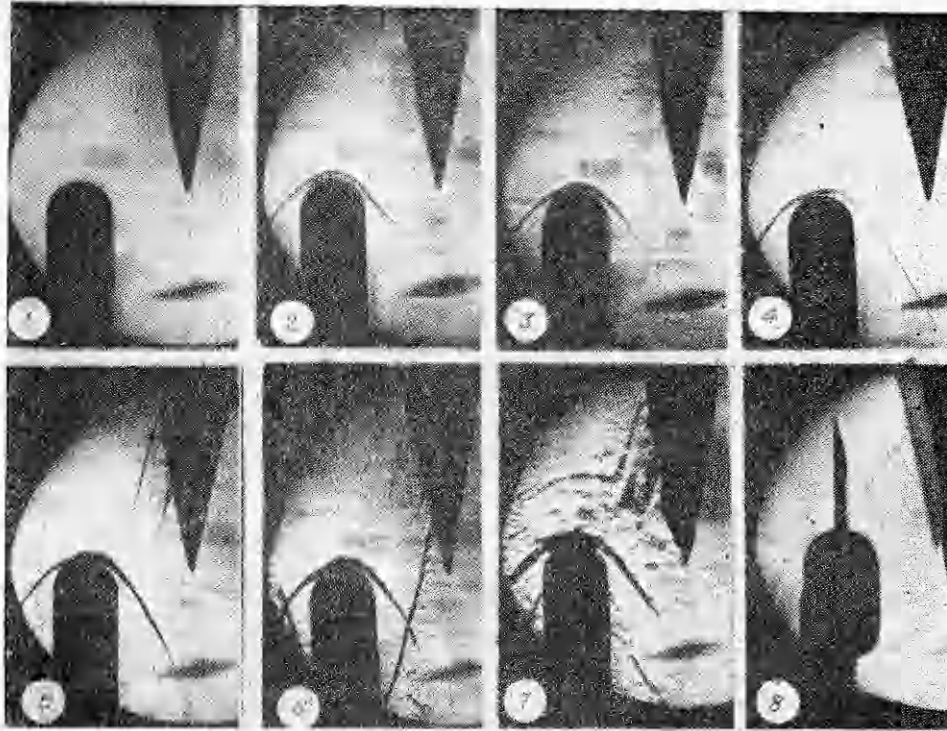


Рис. 3. Последовательность кадров, иллюстрирующих формирование течения в моносопле установки взрывного типа.
 t , мс: 1 — 0,5; 2 — 1; 3 — 1,5; 4 — 2,5; 5 — 5; 6 — 10; 7 — 20; 8 — 7. Промежутки времени указаны относительно момента поджига смеси.

В первой серии экспериментов на срезе моносопла устанавливалась модель цилиндра с торцом, скругленным по радиусу 7,5 мм, а к боковой стенке приклеивались две проволочки диаметром 0,6 мм, которые служили источником возмущений и позволяли контролировать качество потока. Последовательность кадров, иллюстрирующих формирование картины течения в экспериментах, приведена на рис. 3. Видно, что картина обтекания модели с отсоединенным скачком уплотнения формируется уже к $t = 0,5$ мс, однако скорость заполнения предсоплового объема еще не обеспечивает пускового давления в потоке и получения достаточно контрастной картины. На рис. 3,2 видна четкая конфигурация отсоединенного скачка перед моделью и проявление двух слабых возмущений на проволочках. К моменту $t = 5$ мс формируется симметричная картина с двумя возмущениями, возникающими в сечении сопла, где криволинейный профиль разгонной части переходит в прямолинейный участок сопла. Указанные возмущения взаимодействуют с отсоединенной ударной волной и в результате несколько искажают ее форму. К этому моменту давление торможения в форкамере достигает максимальной величины 0,5 МПа; отчетливо видны ударные волны от проволочек и турбулентная «дорожка», связанная с отрывом потока от стенок.

Спустя 10 мс после начала истечения, суммарное влияние двух процессов — опустошения форкамеры и повышения противодавления в вакуумной емкости, куда истекает газ из сопловой решетки, приводит к перерасширению и отрыву потока от стенок сопла. Течение перестраивается в соответствии с новыми условиями, видны две ударные волны, вызывающие отрыв потока и взаимодействующие с отсоединенным скачком и с поверхностью модели.

На рис. 3,7 картина сверхзвукового обтекания еще сохраняется, однако значительная часть ядра занимает оторвавшаяся часть потока,

скапливающаяся перед отсоединенным скачком и образующая псевдо-скачок, который в дальнейшем перейдет в диск Маха с мостообразной структурой, характерной для перерасширенного течения.

В последующей серии экспериментов вместо модели цилиндра на оси сопла устанавливался полуклин с углом при вершине 15° , который мог перемещаться в направлении продольной оси потока. По углу наклона косоугольного скачка, присоединенного к носку модели, определялись значения числа Маха M . Результаты измерений с точностью 20% совпали с распределением значений M вдоль оси сопла, полученным из расчета, учитывающего двумерный характер течения в сопловой решетке.

Детали течения, связанные с установлением и срывом сверхзвукового потока, изучались по углу наклона линии Маха на полуклине, так как эта величина более чувствительна к изменениям параметров в падающем газе, чем угол наклона косоугольного скачка. Результаты этой серии экспериментов позволили заключить, что «рабочее время» установки определяется процессами перерасширения и отрыва потока от стенок сопла. К аналогичным выводам приводят и результаты работы [8]. Кроме того, оказалось, что продолжительность «рабочего времени» рассмотренной импульсной установки (~ 10 мс) практически не зависит от уровня начального давления смеси во взрывной камере, но может несколько отличаться при изменении направления зондирования потока. Из рис. 3, 6 видно, что вблизи носка модели измерения коэффициента усиления K_v на оси сопла еще не должны испытывать существенного влияния процессов отрыва потока от стенок, а вдоль сопловой решетки, т. е. в направлении, параллельном плоскости рисунка, к этому времени значения K_v будут искажены влиянием ударных волн и зон оторвавшегося от стенок сопла потока.

Влияние кислорода на инверсные свойства продуктов сгорания

Эффективность кислорода в дезактивации асимметричных колебаний углекислого газа близка к эффективности азота [17], поэтому некоторое время считалось, что молекулярный кислород можно рассматривать в качестве инертного разбавителя и не учитывать при анализе кинетики колебательного энергообмена в смесях, содержащих CO_2 [16]. Более детальный анализ [18] показал, однако, что $V-V'$ -обмен между состоянием ($v=1$) O_2 и уровнем (010) H_2O (дефект энергии ~ 60 К) приводит к интенсивной дезактивации и «утечке» колебательной энергии в потоке, запасенной в кислороде, через состояние (010) H_2O в поступательное движение, поскольку скорость $V-T$ -обмена в молекуле H_2O чрезвычайно велика. Расчеты показывают, что влияние этого канала релаксации должно сильнее проявляться при больших содержаниях O_2 и H_2O , характерных для продуктов сгорания углеводородно-воздушных топлив, однако подробное экспериментальное исследование таких систем только начинается. Отметим также работу [2], в которой предложен другой механизм влияния кислорода на кинетику релаксации колебательной энергии в потоке, предполагающий более интенсивную, чем ранее считалось, $V-T$ -релаксацию O_2 при столкновении с молекулами H_2O , причем и в [18], и в [2] отмечалось удовлетворительное согласие расчетных значений K_v с экспериментальными данными.

В данной работе коэффициент усиления на линии P20 [00⁰1—10⁰0] измерялся по стандартной схеме [11] вблизи среза сопловой решетки, чтобы свести к минимуму влияние ударных волн и отрывных течений, которые отчетливо видны на фотографиях рис. 3. Для выяснения влияния добавок кислорода на величину K_v использовались результаты серийных измерений. Отбирались опыты, отличающиеся только концентрацией добавляемой примеси. Остальные параметры эксперимента сохранялись неизменными, так как условия горения практически не зависели от концентрации добавляемой к исходной смеси примеси (см. рис. 1).

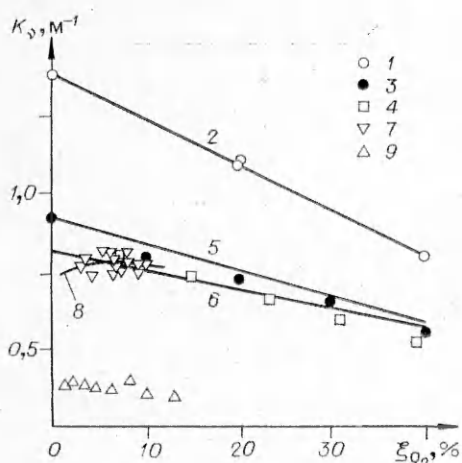


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления от концентрации в потоке молекулярного кислорода.

1, 2 — [2]; 3 — [10]; 4—6 — результаты данной работы; 7, 8 — [4], 9 — [1]; 2, 5, 6, 8 — расчет.

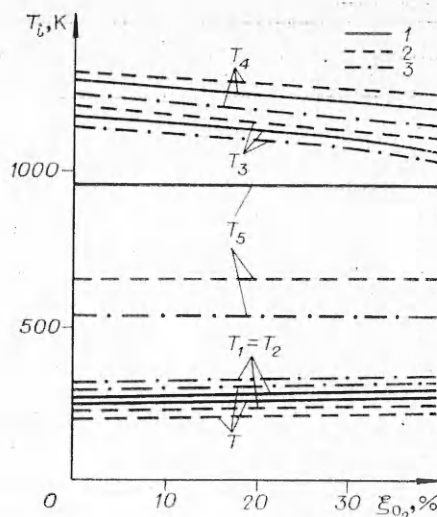


Рис. 5. Значения температур в потоке на срезе сопловой решетки при различных величинах ξ_{O_2} .

1 — данные одномерного расчета; 2, 3 — результаты расчета в двумерной постановке течения на оси сопла и у стенки.

Все эксперименты проводились при постоянных $T_0 = 1900 \pm 20$ К и $p_0 = 4,5$ МПа.

Результаты измерений K_v сравниваются с расчетными значениями и с данными других авторов на рис. 4. Экспериментальные условия и соответствующие ссылки приведены в таблице, из которой видно, что в отличие от данной работы большинство измерений проводилось в смесях простого состава и только в [4] исследовались продукты сгорания углеводородного топлива, однако концентрация кислорода в продуктах сгорания составляла всего 8%.

Анализируя приведенные результаты, отметим следующее:

1) несмотря на значительные различия в составах и геометрии сопел, исследованных в данной работе и в [10], значения K_v согласуются между собой и в среднем уменьшаются на 1% при добавлении каждого процента примеси кислорода;

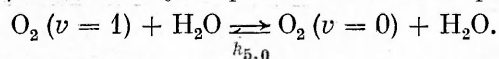
2) результаты работ [1, 4] и описываемые эксперименты при $\xi_{O_2} < 10\%$ не позволяют выделить влияние добавки, которое в этих условиях сравнимо с величиной погрешности измерения K_v ;

3) низкие значения K_v в работе [1] объясняются неоптимальным составом смеси и геометрией использованного сопла;

4) во всем диапазоне изменения концентраций добавки результаты удовлетворительно согласуются с расчетными значениями K_v .

В данной работе параметры потока на оси сопла рассчитывались в одномерной постановке с помощью модели течения, предложенной в [11, 18] и учитывающей влияние кислорода на инверсные свойства смеси, состав которой по данным равновесного расчета можно описать приближенной формулой: $0,1CO_2 + 0,05H_2O + (0,78 - x)N_2 + (0,07 - x)O_2$. В расчетах учитывались также незначительные примеси молекул NO, CO, H_2 , N_2O и радикалов OH, которые, как правило, присутствуют в продуктах сгорания углеводородных топлив [11].

Реальная геометрия течения с ударными волнами в сопле и за срезами сопловой решетки (см. рис. 3) рассчитывалась в двумерной постановке с упрощенной моделью кинетических процессов [16], в которую по аналогии с [2] вводился суммарный канал $V-T$ -релаксации:



Геометрия соплового устройства	Состав смеси	T_0 , К
$A/A^* = 16, h^* = 1,8\text{мм}$	15% $\text{CO}_2 + 2\% \text{H}_2\text{O} + 83\% \text{N}_2$	1790
$A/A^* = 50, h^* = 0,2\text{мм}$	82% ($\text{N}_2 + \text{O}_2$) + 8,4% $\text{CO}_2 + 8,4 \text{H}_2\text{O}$	1870
$A/A^* = 100, h^* = 0,089\text{мм}$	88% ($\text{N}_2 + \text{O}_2$) + 8% $\text{CO}_2 + 4\% \text{H}_2\text{O}$	1900—2100
$A/A^* = 53, h^* = 0,34\text{мм}$	10% $\text{CO}_2 + 87\% \text{N}_2 + 3\% \text{H}_2\text{O}$	1950—2050

Примечание. Тип установки: [1, 2, 10] — ударная труба, [4] — аэродинамическая [1] — клиновидное с углом раствора 30° , [2, 4, 10] — профилированное. h^* — высота критического расширения сопла.

При этом в отличие от [11, 18] не учитывалось колебательное возбуждение молекул H_2O и принималось $k_{3,0} = 2 \cdot 10^7 \text{ л}/(\text{атм} \cdot \text{с})$ [19]. Данные рис. 4 показывают, что результаты расчетов, выполненных в одно- и двумерной постановке, удовлетворительно согласуются между собой и с экспериментальными значениями K_v . Использование предположения об эффективной $V-T$ -релаксации кислорода позволило значительно упростить кинетическую часть программы и сэкономило машинное время при проведении громоздких расчетов в двумерной постановке.

На рис. 5 приводятся значения температур на срезе сопловой решетки, рассчитанные с помощью двух методик при различных ξ_{O_2} . Примененные методики позволяют выделить общую тенденцию к увеличению поступательной температуры смеси T и колебательной температуры деформационной моды CO_2 $T_2 = T_1$ при увеличении концентрации кислорода в потоке. Ясно, что рост T_2 и соответствующее уменьшение температуры верхнего лазерного уровня CO_2 T_3 должны привести к снижению инверсии и K_v . Двумерный характер течения проявляется в нарушении однородности параметров потока по сечению сопла.

Максимальное отличие температур на оси сопла и у стенки достигает 30% для T_2, T и менее 7% для T_3 и T_4 . Величины указанных температур, полученные одномерным расчетом, лежат на графике посередине, между этими значениями. Вместе с тем результаты двумерных расчетов из-за упрощений в кинетической части программы не позволяют описать все детали процесса релаксации колебательной энергии, поэтому занижают значение колебательной температуры молекул кислорода T_5 почти вдвое.

Ясно, что допущение об аномальной эффективности $V-T$ -релаксации O_2 при столкновении с молекулами H_2O , принятое в двумерных расчетах, в рассмотренном диапазоне параметров и составов смесей может использоваться только для приближенных расчетов инверсных характеристик течения. Более подробный анализ механизма влияния кис-

лорода можно провести по данным расчета с полной кинетической моделью течения [11].

На рис. 6 приведены рассчитанные в одномерной постановке значения колебательных T_i и поступательной температуры T на оси потока продуктов сгорания ацетилено-воздушной смеси, разбавленной и неразбавленной кислородом. Видно, что T_5 и T_6 для O_2 ($v=1$) и H_2O (01^0) уменьшаются вниз по потоку сильнее, чем T_3 и T_4 . Такое поведение T_5 и T_6 обусловлено диссипацией энергии, запасенной на колебательных уровнях кислорода, через состояние 010 молекулы воды,

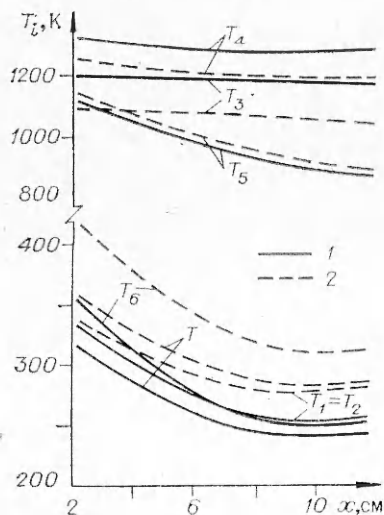


Рис. 6. Изменение вдоль оси сопла колебательных и поступательной температур смеси.

p_0 , МПа	ξ_{O_2} , %	Литература
0,53	0—14	[1]
2,06	0—8	[4]
12,6—13,2	0—40	[2]
3,26—3,54	0—40	[10]

труба с камерой сгорания. Сопло: кого сеченил, A/A^* — степень

с которым нижний возбужденный уровень ($\nu = 1$) O_2 интенсивно обменивается колебательными квантами, с последующей релаксацией по каналу $H_2O^*(010) + M \rightleftharpoons H_2O + M$ в основное состояние. При увеличении концентрации кислорода в смеси этот процесс приводит к существенному росту T и T_2 . При этом уменьшается энергия E , которая может быть преобразована в когерентное излучение. Согласно расчетам, разбавление смеси кислородом приводит к снижению E

на 1,33% при добавлении каждого процента O_2 . Аналогичное влияние добавок O_2 отмечалось в [10].

Авторы благодарят С. А. Лосева, С. Б. Бункина и П. А. Дроздова за полезные советы и обсуждения результатов работы.

Поступила в редакцию 17/X 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Б. Брагин, С. А. Лосев, О. П. Шаталов. Квант. электроника, 1974, 1, 12, 2620.
2. Ф. Э. Кассади, А. Л. Пиндро, Дж. Ньютон. РТК, 1979, 17, 8, 59.
3. В. М. Дорошенко, Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков. Докл. АН СССР, 1982, 262, 4, 869.
4. Р. Дж. Хилл, П. Т. Джуэлл, А. Т. Джонс и др. РТК, 1978, 16, 3, 119.
5. П. В. Евтюхин, А. П. Генич, А. А. Юданов и др. Квант. электроника, 1978, 5, 5, 1013.
6. В. М. Шмелев, П. Я. Василек, А. Д. Марголин. Квант. электроника, 1974, 1, 8, 1711.
7. К. П. Алексеев, Г. В. Встовский и др. Квант. электроника, 1984, 11, 3, 603.
8. В. П. Иванов. Канд. дис. ИПМ АН СССР. М., 1978.
9. М. Г. Ктальерман, В. М. Мальков, А. В. Петухов и др. ФГВ, 1977, 13, 6, 939.
10. J. V. Watterson, G. S. Knoke. Shock Tube and Shock Wave Research. Proc. of the Eleventh Internat. Symp. on Shock Tubes and Waves, Seattle, 1977.
11. А. Б. Британ, В. Л. Левин, С. А. Лосев. Квант. электроника, 1981, 9, 5, 1002.
12. Б. А. Иванов. Физика взрыва ацетилена. М.: Химия, 1969.
13. В. Пост. Взрывы и горение в газах. М.: ИЛ, 1962.
14. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1969.
15. С. Ю. Чернявский. БИ, 1977, 5.
16. В. А. Левин, Ю. В. Туник. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, 1, 118.
17. С. А. Лосев. Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977.
18. А. Б. Британ, А. М. Старик. ПМТФ, 1980, 4, 41.
19. R. L. Taylor, S. Bitterman. Rev. Mod. Phys., 1969, 41, 1, 26.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ ПЛАВЯЩИХСЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ В ПОЛЕ МАССОВЫХ СИЛ

С. А. Каратасков, В. И. Юхвид, А. Г. Мержанов

(Черноголовка)

К настоящему времени выполнено большое количество исследований влияния центробежной силы на закономерности и механизм горения газифицирующих гомогенных и гетерогенных систем [1—5]. Однако среди них практически нет работ по изучению гетерогенных безгазовых и слабогазифицирующихся систем, за исключением [2], где изучалось влияние центробежной силы на закономерности горения разбавленного окисью алюминия железоалюминиевого термита. Безгазовые и слабогазифицирующиеся системы с химическим превращением смеси в конденсированной фазе представляют удобный объект для исследования механизма горения.

В данной работе исследуется влияние центробежной силы на закономерности и механизм горения высококалорийных гетерогенных систем