

## ЛИТЕРАТУРА

1. К. П. Станюкович. Неустановившееся движение сплошной среды. М., «Наука», 1971.
2. В. А. Дворников. Неустановившееся двумерное течение газа в ТГУ, окрестности излома линии тока. Тр. НИИ ПММ, т. 4, Томск, Изд-во ТГУ, 1974.
3. Р. Зауэр. Нестационарные задачи газодинамики. М., «Мир», 1969.
4. П. И. Чушкин. Метод характеристик для пространственных сверхзвуковых течений газа. М., изд-ние ВЦ АН СССР, 1968.
5. В. А. Сучков. ПММ, 1971, 35, 6.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗЕ

*В. И. Манжалей, В. А. Субботин*

В нормальных условиях детонационная волна представляет собой трехмерный газодинамический процесс, в котором газ сжигается в поперечных волнах, переднем фронте, при столкновении поперечных волн и при горении с поверхности непрореагировавших островков газа, прошедших зону интенсивной химической реакции [1, 2]. Для определения границ области устойчивости необходимо ставить эксперименты при экстремальных условиях: высокой температуре [3—5], повышенном начальном давлении [6], в пересжатых детонационных волнах [7—10].

При сильном пересжатии детонационной волны тепловыделение в зоне реакции становится отрицательным [11, 12], и, следовательно, плоский детонационный фронт должен быть устойчив к поперечным возмущениям. В работе [13] показано, что при заданном тепловыделении устойчивость слабо зависит от пересжатия и почти полностью определяется критериями  $Q/RT_-$  и  $E/RT_-$ , где  $E$  — эффективная энергия активации в индукционном периоде,  $T_-$  — температура перед ударным фронтом. Отсюда возникает возможность проверки теории устойчивости, так как, пересжимая детонационные волны, можно получать какие угодно значения  $Q/RT_-$ , в том числе и отрицательные.

Кратко опишем имеющиеся экспериментальные данные. В опытах [8] следовым методом была обнаружена многофронтная структура при пересжатии по скорости в 1,75 раза в смеси  $2C_2H_2 + 3O_2 + 15Ar$ , а расчет для подобных смесей [12] показывает, что уже при пересжатии в 1,45 раза тепловой эффект становится отрицательным. По-видимому, результат [8] неточен, так как неустойчивость получена при слишком большой отрицательной величине теплового эффекта. В [9] интерферометрическим методом показана неоднородность зоны реакции пересжатой детонации, которая трактуется как «турбулентность». Однако скорость самоподдерживающейся детонации не приведена, поэтому нельзя судить о величине пересжатия, при котором еще наблюдается неоднородность. В работе [10] была получена плоская детонационная волна и приведены параметры, характеризующие переход к одномерной зоне реакции. Ширина зоны в [10] была примерно равна поперечному размеру трубы, поэтому полученные результаты, возможно, частично соответствуют теоретическому выводу [14] об устойчивости детонации в узкой трубе и не могут быть перенесены на случай безграничной детонации.

Таким образом, ни одна из известных в настоящее время экспериментальных работ не дает ответа на вопрос, при каких величинах критериев устойчивости фронт безграничной детонации (в том смысле, что толщина зоны реакции много меньше поперечных размеров детонационной трубы) становится гладким.

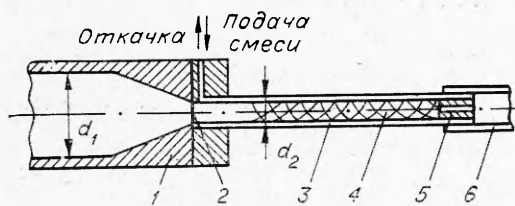


Рис. 1. Схема установки.

1 — секция «высокого давления»; 2 — диафрагма; 3 — запечатанная изнутри стеклянная трубка длиной 15 см; 4 — отпечаток пересжатой детонации на стенке трубки; 5 — вкладыш; 6 — присоединенный объем;  $d_1=30$  мм.  $d_2=6$  мм.

Эксперимент. Пересжатые детонационные волны изучались двумя методами: следовым [15] и методом Теплера. В следовом методе пересжатая детонация была получена в ударной трубе, изображенной на рис. 1. Секция «высокого» давления длиной 1 м заполнялась смесью  $C_2H_2+O_2$ . Иницирование осуществлялось электрической искрой. Пересжатие в конусе на 15—20% по скорости приводило к уменьшению ячейки в смеси до 0,15—0,3 мм. При разрыве диафрагмы ослабленные в результате пересжатия поперечные волны гасились, и в смеси, содержащейся в стеклянной трубке, создавалась гладкая детонационная волна (без учета возмущений, вызванных самим разрывом диафрагмы). Это проверялось в контрольных опытах с заполнением стеклянной трубки воздухом. При подходящих условиях колебания возникали вновь и развивались в поперечные волны, оставлявшие ячеистые следы на законченной поверхности стеклянной трубки. Скорость детонации с точностью 3% измерялась по фоторегистраграммам самосвечения. Перед опытом секция «низкого» давления дважды промывалась исследуемой смесью газов.

Теплеровский метод предусматривал использование прямоугольной трубы сечением  $80 \times 80$  мм и длиной 1 м, переходящей в плоский канал сечением  $80 \times 5$  мм и длиной 0,15 м либо 0,40 м. Диафрагма устанавливалась в начале плоского канала. Ячейку, образованную поперечными волнами, можно легко отличить от затухающих крупномасштабных возмущений, вызванных разрывом диафрагмы.

Съемка проводилась камерой СФР в режиме лупы времени совместно с теневым прибором ИАБ-451 на фотопленку РФ-3. Ширина светового отверстия двухрядной линзовой вставки камеры СФР была уменьшена до 1 мм. Этим достигалось уменьшение времени экспозиции до 0,5 мкс. В качестве источника света использовалась импульсная лампа ИФП-250. В большинстве опытов щель ИАБ-451 ориентировалась параллельно продольной оси трубы, для выявления только поперечных изменений плотности. Ошибка в измерении скорости детонации была менее 2%.

Детонация смесей  $CH_4+2O_2+2Ag$  и  $2H_2+O_2+3Ag$  исследовалась следовым методом, а смесей  $2H_2+O_2+7Ag$ ,  $CH_4+2O_2+7Ag$  и  $C_2H_2+2,5O_2+31,5Ag$  — теплеровским. В части опытов с двумя последними смесями СФР работал в режиме фоторегистратора. Смеси разбавлялись аргоном для уменьшения скорости Чепмена—Жуге  $D_{ж}$  и величины пересжатия, при которой достигается  $Q=0$ , а также для увеличения размера ячейки  $a$ . Во всем исследованном диапазоне скоростей размер ячейки был больше пространственного разрешения соответствующего метода, составляющего  $\approx 0,1$  мм для следового метода и  $\approx 1$  мм — для теплеровского. Кроме того, подобраны смеси, сильно различающиеся по величине энергии активации и по характеру структуры, регулярной в водородно-кислородной смеси с аргоном и нерегулярной в метано-кислородных смесях [2, 16].

Различные скорости пересжатой детонации получались при варьировании начального давления исследуемого и толкающего газов. В следовом методе давление исследуемого газа было 15—100 мм рт. ст., толкающего — 100—200 мм рт. ст., в теплеровском — 15—250 и 100—150 мм рт. ст. соответственно.

Расчет параметров пересжатой детонации исследуемых смесей был проведен М. Е. Топчиным.

**Результаты эксперимента.** Опыты со смесью  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$  не дали существенных результатов по устойчивости из-за плохого качества следовых отпечатков, хотя наблюдалось два интересных явления. В нескольких опытах с двухголовой пересжатой детонацией «головы» 3—4 оборота вращались в одну сторону; при дальнейшем падении скорости одна из них затухала. В одном опыте была получена одноголовая спиновая детонация с отношением шага к диаметру, равному 0,9, что соответствует вращению излома переднего фронта со скоростью 7 км/с (15 оборотов); далее такой «сверхскоростной» спин перешел в обычный двухголовый.

В опытах со смесью  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 2\text{Ar}$  при изменении начального давления от 70 до 15 мм рт. ст. скорость пересжатой детонации менялась от 2400 до 2740 м/с и размер ячейки — от 4 до 0,7 мм. При  $D = 2300$ —2500 м/с отпечатки получились четкими с регулярной структурой, резко отличающейся от нерегулярной структуры самоподдерживающейся детонации. Четкость отпечатков при дальнейшем увеличении скорости падала и, начиная с  $D = 2740$  м/с, ячейстых следов не наблюдалось. Вероятно, многофронтная структура существует и при  $D > 2740$  м/с, но в опытах не фиксируется. Это можно объяснить, если предположить, что при увеличении пересжатия происходит уменьшение относительного перепада давлений на поперечных волнах и следовой метод перестает работать.

Сравнение расчетов с экспериментом показывает, что  $D = 2740$  м/с, при которой многофронтная структура еще наблюдается, соответствует тепловыделению, составляющее 30% от теплового эффекта детонации Чепмена—Жуге. При этом  $Q/RT_+ = 0.8$  и  $E/RT_- = 5$ , где  $E = 33$  ккал/моль [17]; температура в зоне индукции одномерной детонации  $T_+ = 3300$  К. Температура за зоной реакции  $T_d = 3700$  К.

В целом исследование, проведенное следовым методом, следует считать предварительным; при помощи же теплеровского метода получены принципиально важные результаты.

В опытах со смесью  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7\text{Ar}$  при изменении начального давления  $p_0$  от 250 до 30 мм рт. ст.  $D$  менялась от 1700 до 2700 м/с, а размер ячейки — от 10—15 до 1—2 мм. При дальнейшем увеличении скорости поперечных волн не наблюдалось, детонационный фронт был гладким. Изменение размеров ячейки при детонации в смеси  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 31,5\text{Ar}$  носило менее резкий характер:  $a$  менялось от 2,5 до 1,7 мм при уменьшении  $p_0$  от 150 до 50 мм рт. ст. и увеличении  $D$  от 1640 до 2060 м/с. Почти постоянным оставался размер ячейки в опытах со смесью  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$ : он составлял 1,5—3 мм в диапазоне давлений 250—100 мм рт. ст. и скоростей 1700—2290 м/с.

При  $D > 2290$  м/с в смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$  и  $D > 2060$  м/с в смеси  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 31,5\text{Ar}$  ячейка не наблюдалась, хотя пространственного разрешения хватало для ее обнаружения.

Теплеровские развертки пересжатых детонаций приведены на рис. 2. Обычно детонация имела многофронтную ячейстую структуру на всем протяжении плоского канала или была гладкой. На рис. 2, б показан редкий снимок: при незначительном уменьшении скорости в ацетиленокислородной смеси одномерная детонация перешла в многофронтную при  $D = 2060$  м/с.

На рис. 3 приведено сравнение расчетов с экспериментом. Зависимости  $Q(D)$  рассчитывались для давлений, при которых происходил переход к устойчивому режиму. Это давление составляет 30, 100 и 50 мм рт. ст. для смесей  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7\text{Ar}$ ,  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 31,5\text{Ar}$  соответственно. Символом  $D^*$  обозначена расчетная скорость детонации, при которой  $Q$  обращается в нуль. (Заметим, что разбавле-

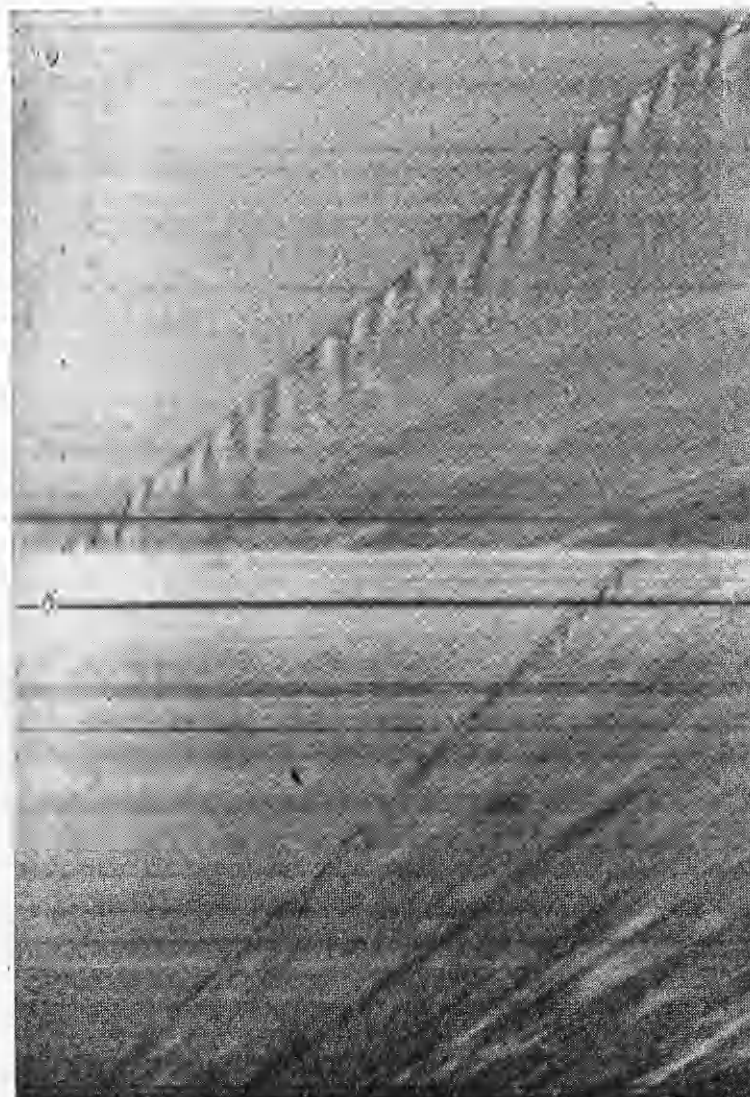


Рис. 2. Развертки пережатой детонации в смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2 + 31,5Ar$ .  
 а)  $D=1640$  м/с,  $p_0=151$  мм рт. ст.; б)  $D=2060$  м/с;  $p_0=50$  мм рт. ст.

ние смесей  $A^*$  позволило снизить величину  $D^*/D_{ж}$  до 1,4—1,45 по сравнению с неразбавленными смесями: при  $p_0=1$  атм  $D^*/D_{ж}=1,85; 1,73; 1,83$  для смесей  $CH_4+2O_2$ ,  $C_2H_2+2,5O_2$  и  $2H_2+O_2$  соответственно и снижается примерно на 0,1 при  $p_0=0,1$  атм [12].) Темными точками на графиках обозначены значения скорости в опытах, в которых была получена многофронтная детонация, светлыми — одномерный процесс. Области, занятые светлыми и темными точками, перекрываются из-за ошибки измерений  $D$  (2%). Область перекрытия в водородно-кислородной и ацетилено-кислородной смесях совпадает с  $Q=0$ .

До  $D=2450$  м/с в смеси  $CH_4+2O_2+7Ar$  наблюдались только неустойчивые режимы, а в диапазоне скоростей 2450—2700 м/с как устойчивые, так и неустойчивые, причем область перекрытия режимов нельзя объяснить ошибками измерения скорости. При  $D>2700$  м/с получались только устойчивые режимы. Неожиданно здесь появление много-

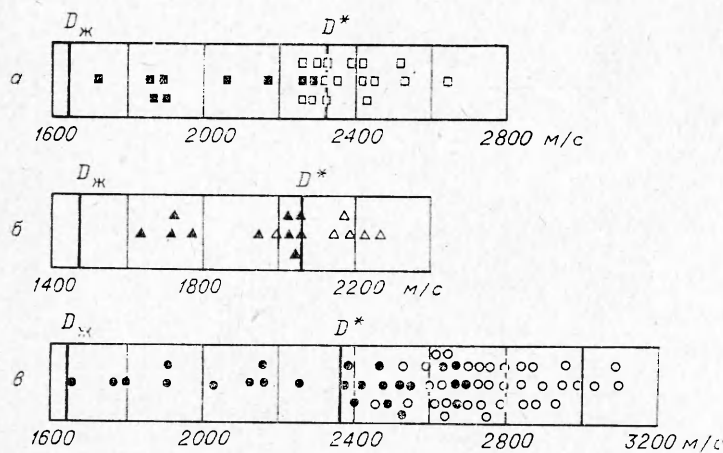


Рис. 3. Результаты эксперимента по устойчивости.  
 а)  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$ ; б)  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 31.5\text{Ar}$ ; в)  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7\text{Ar}$ .

фронтальной структуры при скоростях детонации, когда тепловыделение в зоне реакции отрицательное.

Назовем область, в которой наблюдаются как устойчивые, так и неустойчивые режимы детонации, переходной. Возможно, она существует и в других исследованных смесях, но ее размеры меньше экспериментальной ошибки. Плотности в зоне индукции и за зоной реакции становятся равными в смеси  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 31.5\text{Ar}$  при  $D = 2170$  м/с, в смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$  при  $D = 2330$  м/с. Эти скорости немного отличаются от  $D^*$ . В  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7\text{Ar}$  равенство плотностей достигается при  $D = 2740$  м/с, что на 370 м/с выше  $D^*$ , но близко к экспериментально наблюдаемой границе устойчивой и переходной областей. Скорость звука в зоне индукции становится равна замороженной скорости звука в продуктах реакции в смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$  при  $D = 2330$  м/с, а в смеси  $\text{CH}_2 + 2\text{O}_2 + 7\text{Ar}$  при  $D \approx 3000$  м/с. Таким образом, в последней смеси имеется возможность распространения поперечных волн при небольшом отрицательном тепловыделении.

На рис. 4, а эти же данные представлены в координатах — критериях устойчивости в акустической теории [13]. При этом использованы

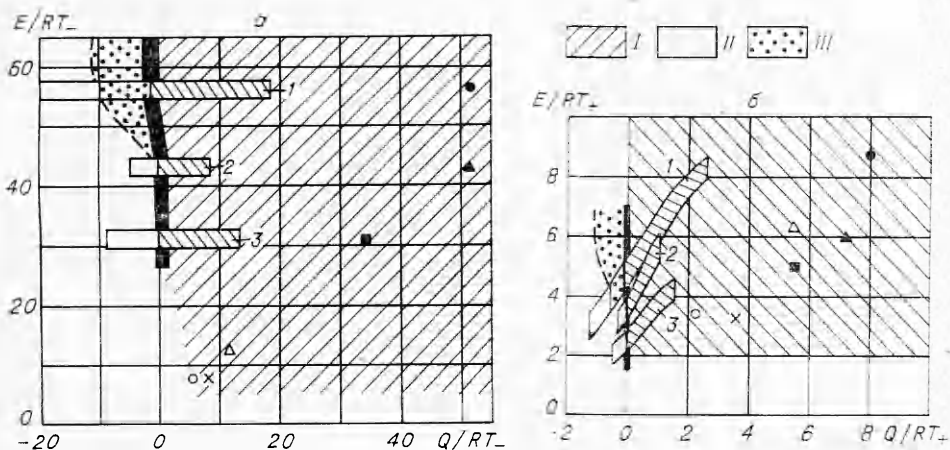


Рис. 4. Экспериментальные данные:  
 I — неустойчивая детонация; II — устойчивая; III — переходная область; 1 —  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7\text{Ar}$ ; 2 —  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 31.5\text{Ar}$ ; 3 —  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$ . Самоподдерживающаяся неустойчивая детонация: • —  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ ; ▲ —  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$ ; ■ —  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Поперечные волны в сплошных детонациях [3]: неустойчивые в  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  — × и  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  — Δ, устойчивые в  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$  (?) — ○. Зачерненной линией изображена часть границы области устойчивости, штриховой — граница переходной области.

Таблица 1

Смесь	$a_{т.с}$ мм		$d$ , мм	$l$ , мм	$E$ , ккал/моль	$1/a_{т.с}$
	расчет	эксперимент				
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	0,04	0,02 ÷ 0,03	5	0,6	33	20—30 (эксперимент)
$2\text{H}_2 + \text{O}_2$	0,15	—	5	1,2	18	8
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$	0,8 ÷ 1	—	12	3	18	3—4
$2\text{CO} + \text{O}_2 + 3\% \text{H}_2$	2 ÷ 2,5	—	27	7—8	—	3—4

следующие значения энергии активации: 33 [17], 25 [18], 18 ккал/моль [19] для смесей  $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$  и  $\text{H}_2 + \text{O}_2$  соответственно. На рисунок также нанесены данные по неустойчивости при повышенных начальных температурах [3] и в самоподдерживающейся детонации в неразбавленных смесях.

Это представление не единственно. Возможно, правильнее будет по оси ординат откладывать  $E/RT_+$ , так как именно эта величина входит в критерий Шелкина, а также определяет скорость роста поперечных возмущений в теории [20]. При этом точки на рис. 4, б, характеризующие детонацию при повышенной начальной температуре, расположились правее данных по неустойчивой пересжатой детонации, в том числе и точка, относящаяся к гладкой поперечной волне в спиновой детонации  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$ .

Попытаемся объяснить причину устойчивости поперечных волн к мелкомасштабным возмущениям. Поперечная волна в спиновой детонации смеси  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  содержит на своем фронте множество поперечных возмущений (так называемую тонкую структуру поперечной волны), в смесях  $2\text{CO} + \text{O}_2 + 2\% \text{H}_2$  [1] и  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$  [3] мелкомасштабных возмущений на поперечной волне нет, смесь  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  представляет промежуточный случай. В табл. 1 представлены результаты оценки размера ячейки тонкой структуры  $a_{т.с}$  в поперечной волне. Оценка проводилась по формуле  $\rho \exp(-E/RT_+) = \text{const}$ ,  $\rho$  — плотность в зоне индукции. Константа находилась из известных данных для детонации при нормальных условиях. Символом  $l$  обозначен размер поперечной волны,  $d$  — диаметр трубки. Оценочное значение  $a_{т.с}$  в смеси  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  оказалось близко к экспериментальному, поэтому можно ожидать, что оценки будут правильными и для водородно-кислородных смесей.

В смеси  $2\text{CO} + \text{O}_2 + 3\% \text{H}_2$  значение  $a_{т.с}$  рассчитывалось экстраполяцией данных работы [21] по величине ячейки в область более высоких температур. Малое число ячеек на поперечной волне в смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$  достигается за счет высокой температуры за ударным фронтом в детонации Чемпена — Жуге, а в смеси  $2\text{CO} + \text{O}_2 + 3\% \text{H}_2$  — за счет слабой зависимости величины ячейки от температуры.

При выходе детонационной волны из узкой трубки в широкую или в столбе детонирующего газа без стенок крайняя поперечная волна, движущаяся наружу, дает в первом случае слабую отраженную внутрь волну, а во втором выходит без какого-либо отражения. Если за время ухода поперечной волны из столба оставшиеся волны в результате соударений между собой образуют одну дополнительную волну взамен ушедшей, то только в этом случае процесс продолжается. Ясно, что вероятность образования новой волны пропорциональна числу столкновений и, следовательно, числу поперечных волн или ячеек на диаметре. Это число было выяснено экспериментально и приблизительно равно 12 для выхода детонации из узкой трубки в объем и 10 ячейкам — в плоском случае [1]. По-видимому, подобное же явление имеет место в по-

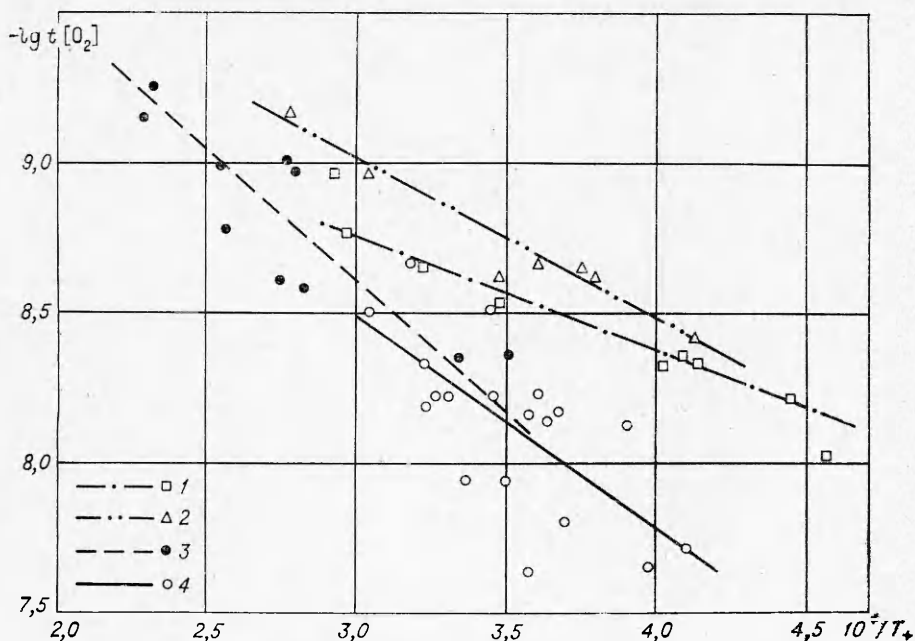


Рис. 5. Зависимость характеристического времени  $t$  от температуры.  
 1 —  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$ ; 2 —  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 31,5\text{Ar}$ ; 3 —  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7\text{Ar}$ ; 4 —  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 2\text{Ar}$ .

перечной волне, так как поперечные волны тонкой структуры, могут уходить в шлейф или к оси трубки. Если это объяснение правильно, то значение  $l/a_{т.с} = 20-30$  в смеси  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  больше критического числа для поперечной волны, а  $l/a_{т.с} = 3-4$  меньше, и поперечная волна в смесях  $2\text{CO} + \text{O}_2 + 3\% \text{H}_2$  и  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$  не будет иметь ячеистой тонкой структуры, образованной вследствие неустойчивости, и фронт ее будет гладким.

На рис. 5 и в табл. 2 приведены зависимости времени прохождения поперечной волной половины ячейки от  $T_+$ . Здесь  $l = a/2c_f$ , где  $c_f$  — замороженная скорость звука в продуктах сгорания. В метано- и ацетилено-кислородных смесях для построения графиков использовались точки, полученные из фоторегистрограмм. Данные были обработаны по методу наименьших квадратов. Аррениусовская зависимость хорошо описывает изменение  $t$  с температурой:

$$t[\text{O}_2] = 10^\alpha \exp(\beta/RT_+) \text{ с} \cdot \text{моль/л.}$$

Прямых измерений задержек воспламенения в смесях, подобных использованным в опытах, в диапазоне температур 2500—4400 К нет. Приведенные здесь данные могут быть полезны при оценке энергий активации. Величина  $\beta$  оказалась близкой к  $E$ , измеренной при более низких начальных температурах [17—19]. Если положить  $l/\tau$  равным ве-

Таблица 2

Смесь	$\alpha$	$\beta$ , ккал/моль	$l/\tau$	Диапазон температур, К
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$	$-9,9 \pm 0,2$	$17,5 \pm 2,5$	1	2200—3400
$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 31,5\text{Ar}$	$-10,65 \pm 0,2$	$25 \pm 3$	6	2400—3600
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7\text{Ar}$	$-11,2 \pm 0,5$	$40 \pm 7$	4	2800—4400
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 2\text{Ar}$	$-10,6 \pm 0,6$	$32 \pm 8$	3	2400—3300

личинам, приведенным в табл. 2, то графики для  $t$  хорошо стыкуются с соответствующими графиками для задержки воспламенения  $\tau$ . Создание точной теории детонационной ячейки позволило бы найти связь между  $t$  и  $\tau$  и проводить измерение задержек воспламенения в неразбавленных смесях при высоких температурах и давлениях, поскольку сейчас можно измерять  $t$  вплоть до  $10^{-8}$  с [3, 6].

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Детонации исследованных смесей, имеющих  $E > 18$  ккал/моль, неустойчивы при любых положительных  $Q$ . Это утверждение верно с точностью до ошибки эксперимента.

2. В детонации метано-кислородной смеси, разбавленной аргоном, при отрицательных тепловыделениях имеется переходная область, в которой существуют как устойчивые, так и неустойчивые режимы.

3. Причиной устойчивости поперечной волны в спиновой детонации смесей  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$  и  $2\text{CO} + \text{O}_2 + 3\% \text{H}_2$ , по-видимому, может быть малое возможное число ячеек тонкой структуры, укладываемых на поперечной волне.

4. Причиной устойчивости зоны реакции в детонациях, получаемых в разбавленных смесях в ударных трубах, может быть наряду со снижением величины критериев в устойчивости слишком большое ( $\sim 1$  и более) отношение размера зоны реакции к наибольшему поперечному размеру ударной трубы в соответствии с теоретическим выводом [14].

5. Пересжатие детонации приводит к переходу от нерегулярной структуры к регулярной.

6. Аррениусовские зависимости времени  $t$  прохождения волной половины ячейки от температуры за ударным фронтом при  $T_+ = 2200 - 4400$  К близки к зависимости задержки воспламенения  $\tau$  от температуры при более низких  $T_+$ . Отношение  $t/\tau$  составляет для разных газовых смесей от 1 до 6.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность М. Е. Топчиану за проведение расчетов.

Институт гидродинамики  
СО АН СССР,  
Новосибирск

Поступила в редакцию  
13/IV 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиан. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
2. В. А. Субботин. ФГВ, 1975, 11, 1.
3. В. И. Манжалея, В. В. Митрофанов. ФГВ, 1973, 9, 5, 703.
4. Р. И. Солоухин. ПМТФ, 1964, 4.
5. R. A. Strehlow. Comb. and Flame, 1968, 12, 2.
6. В. И. Манжалея, В. В. Митрофанов, В. А. Субботин. ФГВ, 1974, 10, 1, 102.
7. R. I. Soloukhin. 11-th Symposium (International) on Combustion, 1967, p. 671.
8. R. E. Duff. Phys. of Fluids, 1961, 4, 11, 1427.
9. D. R. White. Phys. of Fluids, 1961, 4, 4, 465.
10. R. I. Soloukhin, C. Brochet. Comb. and Flame, 1972, 18, 1, 59.
11. Harold O. Barthel. Phys. of Fluids, 1972, 15, 1.
12. М. Е. Топчиан. Докт. дис. ИГ СО АН СССР. Новосибирск, 1974.
13. J. J. Eggenbeck. Phys. of Fluids, 1964, 7, 5, 684.
14. В. В. Пухначев. Докл. АН СССР, 1963, 149, 4, 798.
15. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошии. Докл. АН СССР, 1959, 125, 1.
16. R. A. Strehlow. Astronautica Acta, 1968, 14, 5, 539.
17. В. В. Воеводский, Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР, 1965, 161, 5.
18. Р. И. Солоухин. Ударные трубы для физико-химических исследований. Новосибирск, «Наука», 1966.
19. В. В. Воеводский, Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР, 1964, 154, 6.
20. R. A. Strehlow, F. D. Fernandes. Comb. and Flame, 1965, 9, 109.
21. J. C. Libouton, M. Dormal, P. J. Von Tiggele. 15-th Symposium (International) on Combustion, Tokio, 1974.