

энергию активации второй реакции равной 18 ккал/моль, получим соответствующее значение эффективной энергии активации — 17 ккал/моль.

Соответствие результатов расчетов с использованием кинетики горения водорода и экспериментальных данных по размерам ячеек говорит о возможности применения модели ячейки для определения кинетических параметров смесей A и E_a .

*Институт гидродинамики
СО АН СССР,
Новосибирск*

*Поступила в редакцию
13/IV 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев. ФГВ, 1976, 12, 5.
2. E. A. Lundstrom, A. K. Oppenheim. Proc. Roy. Soc. A, 1969, 310.
3. В. В. Митрофанов, В. А. Субботин. В материалах IV Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. Черноголовка, 1974.
4. В. И. Манжалей, В. В. Митрофанов, В. А. Субботин. ФГВ, 1974, 10, 1.
5. Р. И. Солоухин. Методы измерений и основные результаты исследований на ударных трубах. Новосибирск, «Наука», 1969.
6. Е. С. Шетинков. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.
7. В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин. Кинетика и механизм газофазных реакций. М., «Наука», 1974.
8. R. A. Strehlow, A. I. Crooker. Abstracts of 5-th Colloquium (International) on Gasdynamic and Explosive Systems. San — Diego, USA, 1973.
9. D. H. Edwards, G. Hooper a. o. Acta Astr., 1970, 15.
10. К. Н. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
11. R. A. Strehlow, G. D. Engel. AIAA J., 1969, 7, 3.

СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН И ЗОНА РЕАКЦИИ В ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЕ ГАЗ — ПЛЕНКА

А. В. Пинаев

В результате исследования гетерогенной детонации в трубах было выяснено, что она имеет свойства, аналогичные свойствам детонации газовых смесей, а также свойства, присущие только детонации в гетерогенных системах [1, 2]. На некотором расстоянии от фронта гетерогенной детонационной волны поверхность жидкости начинает возмущаться и в потоке газа регистрируется появление волн сжатия и разрежения. Отдельный элемент наблюдающейся структуры состоит из двух волн сжатия, разделенных зоной разрежения. Такая структура получила название структуры М. Размер зоны разрежения элемента структуры М совпадает с длиной волны возмущения на поверхности жидкости и зависит от толщины пленки [3, 4]. Поток газа при этом существенно турбулизован вблизи поверхности жидкой пленки, что значительно ускоряет процесс нагревания и испарения горючего, диффузию паров горючего в окислитель, их смешение и воспламенение [3, 4]. В работе [5] при построении модели расчета гетерогенной детонации в отличие от [6—10] предполагается, что тепловыделение определяется процессами турбулентной диффузии испарившегося горючего.

Возникающая шероховатость поверхности значительно ускоряет переход от ламинарного течения к турбулентному и способствует увеличению тепловых потоков к жидкой пленке по сравнению с турбулентными течениями над гладкой поверхностью [11]. Это приводит к возра-

станию скорости испарения горючего и смесеобразования. Наряду с этим, видимо, определенную роль в процессах массообмена играет срыв мелких капель с поверхности с их последующим испарением. Но этот вопрос пока остается открытым.

При исследовании детонации в гетерогенной системе и структуры гетерогенной детонационной волны наибольшее число экспериментов проводилось в трубах квадратного сечения, в которых фиксировались вторичные волны сжатия (α -волны), периодически возникающие в зоне химической реакции и догоняющие передний ударный фронт. Указывалось, что гетерогенная детонационная волна состоит из переднего ударного фронта и зоны горения, которая начинается на расстоянии порядка 1—5 см от ударного фронта [12], затем утолщается по мере удаления от него. Между ударным фронтом и зоной горения содержится ряд разрывов оптической плотности, отвечающих волнам сжатия и тангенциальным разрывам [1, 13—15]. Наибольший интерес представляет в этом отношении работа [14]. Наличие α -волн приводит к сокращению периода индукции воспламенения смеси и существенно интенсифицирует процессы горения. Модель [15] отражает неоднородность и нестационарность процессов при гетерогенной детонации и объясняет механизм образования α -волн.

В некоторых гетерогенных системах детонационные волны распространяются без видимых возмущений за фронтом. Было замечено, что такие режимы возникают при использовании невязкого горючего, когда скорость детонации достаточно велика (~ 1900 м/с) [17]. Важную роль в осуществлении того или иного режима, а следовательно, и структуры детонационной волны играют также форма и размеры канала, по которому распространяется детонационная волна. С учетом совместного влияния свойств горючего и масштабного фактора на структуру гетерогенной детонационной волны осуществлен спиновый детонационный режим в гетерогенной системе [17], что позволяет предположить возможность существования поперечных волн (аналогичных описанным в [18]) в плоских каналах с определенными геометрическими размерами.

В настоящей работе проведены исследования на ударной трубе диаметром $d=69,5$ мм и использованы материалы предыдущих экспериментов [17]. Труба длиной около 4,6 м устанавливалась горизонтально и смачивалась равномерным слоем горючего, наибольшая толщина пленки которого ограничивалась тем, чтобы не наблюдалось заметного стекания вдоль стенки. Отношение веса горючего к окислителю ($\bar{\kappa}$) изменялось от 0,5 до 2 по отношению к стехиометрическому. Труба заполнялась кислородом продувкой при атмосферном давлении. Иницирование осуществлялось дополнительной секцией, отделенной диафрагмой и заполнявшейся стехиометрической смесью пропана с кислородом при давлении ~ 1 ат. Смесью подрывалась высоковольтным разрядом. Фотографирование проводилось фоторегистратором через две продольные щели шириной 2 и длиной 240 мм (расстояние между щелями 40 мм), расположенные последовательно на одном уровне вблизи закрытого конца трубы.

Спиновый детонационный режим осуществлялся практически всегда, когда на стенках трубы наносились керосин и дизельное топливо, и реже, когда горючим служила смесь керосина с маслом ВМ-4 при объемном отношении 3:1 и 1:1. Если в качестве горючего использовалось масло ВМ-4, то детонация по трубе при указанном способе иницирования не распространялась.

Характер наблюдаемых явлений находится в зависимости от теплофизических свойств горючего, что выражается в задержках воспламенения смеси за фронтом гетерогенной детонационной волны и последующей скорости горения. Задержки воспламенения складываются

в основном из времени разогрева и испарения пленки горючего, смешения паров горючего с окислителем и времени химических реакций, которым в обычных гетерогенных детонационных волнах можно пренебрегать, поскольку оно существенно меньше наблюдаемого времени задержки воспламенения при скоростях детонации $D \approx 1,1$ км/с [11]. С возрастанием вязкости пленки горючего увеличивается расстояние, на котором происходит развитие возмущений на поверхности жидкости, а следовательно, и переход от ламинарного к турбулентному пограничному слою в потоке газа. С увеличением содержания в горючем тяжелых углеводородов (например, при добавлении к керосину масла) повышается температура вспышки и кипения горючего, что также способствует возрастанию времени воспламенения и началу интенсивного горения. Эти факторы могут приводить к нечеткости передних границ фронтов пламени и затруднять возникновение и существование поперечных волн либо препятствовать распространению детонации в гетерогенной системе, что и было замечено в эксперименте.

Заметна неравномерность свечения, наиболее интенсивная в местах излома переднего фронта, и периодические изменения структуры фронта, возникающие при прохождении вращающейся волны вдоль щели. Внешнее отличие картины самосвечения спиновой гетерогенной детонационной волны при использовании смеси керосина с маслом от самосвечения керосина и дизельного топлива — в большей размытости структуры переднего фронта и в менее выраженном характере свечения длинных криволинейных полос, уходящих вглубь от фронта и напоминающих шлейфы при спиновой газовой детонации, которые назовем поперечными α -волнами. В части опытов со смесью керосина с маслом детонация распространялась без видимых поперечных α -волн, но при этом продолжала оставаться заметной периодичность в изменении светимости переднего фронта, совпадающая с периодом шага спиновой детонационной волны.

На снимках также видны линии различной яркости (траектории), угол наклона которых постепенно уменьшается при удалении от фронта, отдельные элементы горячей среды, движущиеся с местной скоростью газа вдоль щели. Эти светящиеся участки обладают большой прозрачностью и позволяют наблюдать одновременно не только их большое количество при удалении от стенки трубы, но и видеть наиболее яркие участки на противоположной стороне. Всегда видна попереч-

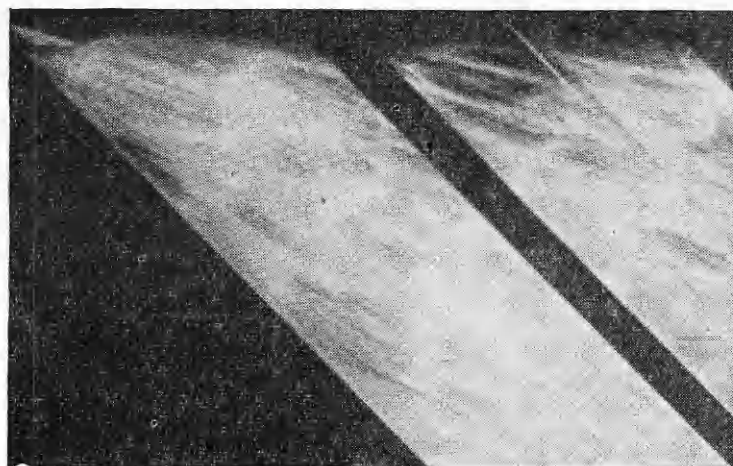


Рис. 1. Фоторазвертка свечения гетерогенной детонационной волны, $d=69,5$ мм (дизельное топливо — кислород). Пленка движется под углом $43,5^\circ$ к оси трубы.

Т а б л и ц а 1

| Горючее | D , м/с | h , мм | h/d |
|--|-----------|----------|-----------|
| Керосин | 1550+150 | 235—265 | 3,4—3,8 |
| Дизельное топливо | 1550±50 | 240—260 | 3,45—3,75 |
| Смесь керосина с маслом ВМ-4 (3:1) | 1550+50 | 240—250 | 3,45—3,6 |
| Смесь керосина с маслом ВМ-4 (1:1) | 1450±80 | 240—260 | 3,45—3,75 |

ная α -волна и ее продолжение — более размытая акустическая волна (шлейф) у противоположной стенки. Измерение скоростей по углам наклона светящихся траекторий вблизи фронта для плоских гетерогенных детонационных волн дает величины, близкие к расчетной скорости за ударной волной. Поэтому измеренные на одном и том же расстоянии от фронта скорости светящихся траекторий после их осреднения считались средней скоростью потока газа по сечению. В дальнейшем эти данные использовались для построения профиля скорости потока газа и определения размера зоны реакции.

На рис. 1 помещена фоторазвертка структуры волны, полученная методом полной компенсации [18], которая не отличается от аналогичной в трубе $d=50$ мм [17]. При фотографировании этим методом использовалась возможность управлять вращением поперечной волны короткой спиралью, установленной в начале трубы. Для измерения углов наклона передних ударных скачков часть опытов проводилась с использованием водного раствора желатина [1].

В табл. 1 приведены скорости детонации D , а значения шага спирали h и отношения шага к диаметру h/d указаны для случаев спиновой детонации. Скорость детонации имела значительный разброс в указанных пределах и средняя ее величина слабо зависела от того, являлась ли детонация спиновой или распространялась без видимых возмущений за фронтом, а также от вида горючего и величины концентрации. Шаг волны спина и углы наклона скачков менялись от опыта к опыту и между разными периодами волны в одном опыте. Вычисление отношения скорости звука к скорости детонации c/D в окрестности поверхности Чепмена—Жуге для измеренных значений h/d в предположении однородности состава газа по сечению трубы и равенства частот вращения во фронте и пучности акустических колебаний за фронтом дает величину $c/D \approx 0,45—0,5$. Из анализа фоторегистрограмм следовало, что условие полного совпадения частот не выполняется, а поперечная α -волна, переходящая в акустическую, наклонена под заметным углом к образующей трубы. В различных опытах этот угол составлял $0 \div 10^\circ$, а частота вращения шлейфа отличалась от частоты вращения головы спина на несколько процентов.

В табл. 2 приведены средние длины зон реакции L и максимальные отклонения для различных опытов при начальных концентрациях, близких к стехиометрической ($\bar{x} \approx 1 \div 1,5$). Было замечено, что при увеличении концентрации горючего в 2—3 раза или введении концентрических вставок различного диаметра зона реакции сокращается на 5—10 см. Для нахождения L предварительно строилась описанным выше методом кривая безразмерной скорости потока газа (в системе фронта гетерогенной детонационной волны) $\bar{u}=u/D$ в области за

Т а б л и ц а 2

| d , мм | L , см | | | |
|----------|----------|-------------------|------------------------------|-------|
| | Керосин | Дизельное топливо | Смесь керосина с маслом ВМ-4 | |
| | | | (3:1) | (1:1) |
| 69,5 | 20±5 | 17±3 | 18±4 | 15±5 |
| 50 | 25±3 | — | — | — |
| 27 | 25±5 | — | — | — |

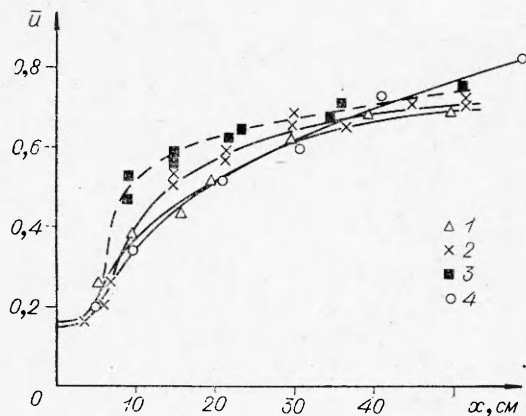


Рис. 2. Скорость потока газа \bar{u} за фронтом гетерогенной детонационной волны (x — расстояние от фронта).

1 — $d=27$ мм, керосин — кислород, $\chi=0,83$, $D=1983$ м/с; 2 — $d=69,5$ мм, дизельное топливо — кислород, $\chi=1,2$, $D=1500$ м/с; 3 — $d=69,5$ мм, керосин с маслом (1 : 1) — кислород, $\chi \approx 1,5$, $D=1400$ м/с; 4 — $d=50$ мм, керосин — кислород, $\chi \approx 1,28$, $D=1480$ м/с.

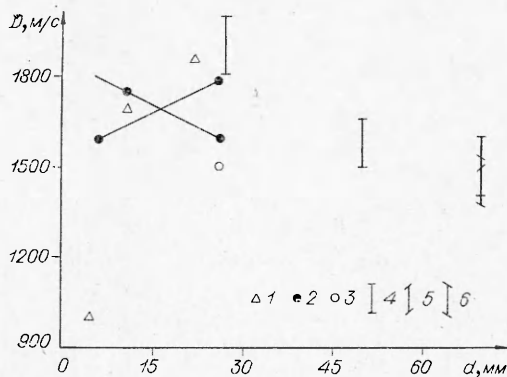


Рис. 3. Скорость гетерогенной детонации в круглых трубах (с кислородом).

1 — декан, гексадекан [10], 2 — ВМ-4, [4], 3 — ВМ-4, [5]; данная работа: 4 — керосин, 5 — дизельное топливо, 6 — смесь керосина с маслом.

способом, в разумных пределах совпадала с расстоянием от фронта, на котором поперечная α -волна переходила в размытую акустическую волну-шлейф.

Несмотря на сложный характер явлений, протекающих в гетерогенной детонационной волне, одномерная стационарная модель [5] дает неплохое совпадение расчетных и экспериментальных скоростей детонации, длин зон реакции в некоторых гетерогенных системах. Однако наблюдаются и заметные расхождения для ряда сортов горючего и диаметров труб.

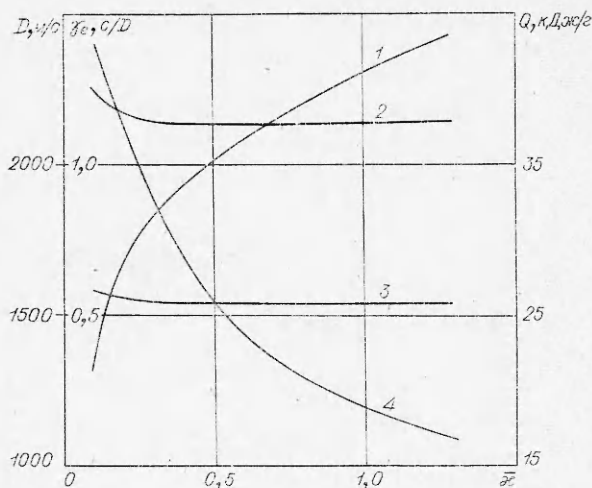
На рис. 3 приведены экспериментальные данные, полученные в круглых трубах для нескольких сортов горючего разными авторами. Наглядно видно уменьшение скорости детонации с увеличением молекулярного веса горючего, а также в области малых диаметров и при $d \geq 30-40$ мм. Уменьшение D с увеличением диаметра трубы можно объяснить значительным недогоранием топлива в зоне реакции, поскольку потери на трение о стенки и теплотери в стенки трубы малы при наблюдаемых размерах зон реакции (см. табл. 2).

фронтом. Считалось, что в плоскости Чепмена — Жуге $c/D \approx 0,53 \pm 0,01$ и что длина зоны реакции — это такое расстояние от фронта, на котором выполняется условие Чепмена — Жуге, т. е. $\bar{u} = c/D$. Из табл. 2 видно, что L вопреки теории [5, 19] слабо зависит от d и несколько больше в трубе меньшего диаметра ($d=27$ мм). Этот факт становится вполне естественным, если обратить внимание на величину скорости детонации. В трубе $d=27$ мм скорость детонации выше, чем в трубах большего диаметра (см. [17] и табл. 1), а следовательно, выше полнота сгорания топлива. Анализ экспериментальных данных показывает, что с увеличением диаметра трубы доля сгоревшего топлива уменьшается.

На рис. 2 приведено несколько экспериментальных кривых средней по сечению безразмерной скорости газа (в системе фронта волны) с возможной ошибкой порядка 5%. Скорость потока за ударным скачком $\bar{u}(0)$ находилась из расчета состояния за ударной волной. Такие кривые строились для составляющей скорости за фронтом, параллельной оси трубы, и в случае спиновой детонации. При этом длина зоны реакции, измеренная тем же

Рис. 4. Расчетные данные параметров равновесной детонации Чепмена — Жуге для гомогенной смеси керосин — кислород.

1 — D ; 2 — γ_e — отношение удельных теплоемкостей равновесное; 3 — c/D — отношение равновесной скорости звука к скорости детонации, 4 — Q — тепловыделение на единицу веса горючего.



Были проведены расчеты на ЭВМ равновесных параметров детонации Чепмена — Жуге по программе [20] для гомогенной смеси керосин — кислород с заданием энтальпии и свойств керосина в жидком состоянии. Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 4. Сравнение экспериментальных данных с расчетами приводит к выводу, что для объяснения полученных скоростей детонации в трубах диаметром 50 и 69,5 мм достаточно предположить, что в зоне реакции этих гетерогенных систем сгорает около 20—30% горючего, необходимого для стехиометрии.

Проводились измерения скорости распространения отраженных волн. На расстоянии от 0,1 до 0,6 м от торца скорость отраженной волны относительно натекающих продуктов горения D_1 падает примерно по прямолинейной зависимости, причем среднее отклонение ее от скорости детонации D для различных опытов не превышает 20%. За фронтом отраженной волны при этом наблюдаются вторичные волны, способствующие установлению скорости волны. В дальнейшем, при движении волны до противоположного торца и обратно (период), средняя ее скорость остается практически постоянной и близкой к первоначальной скорости детонации ($D_1 \approx 0,9 D \approx 1300 \div 1500$ м/с). Такой длительно незатухающий характер движения волны, видимо, означает способность среды к дополнительному энерговыделению вследствие неполноты сгорания топлива в первоначальной детонационной волне. Для выяснения природы отраженной волны проводилось измерение по фоторегистрограммам скорости потока газа u за ее фронтом. Оказалось, что иногда даже на протяжении всего периода движения волны (чаще для смеси керосина с маслом) безразмерная скорость газа в системе фронта $\bar{u} \approx 0,5 \div 0,6$. Оценки соответствующей величины для ударной волны в предположении, что скорость звука перед волной $c \approx 500 \div 900$ м/с, дают $\bar{u} \approx 0,2 \div 0,45$.

Известно, что при отражении детонационной волны в ударную вблизи торца $\bar{u} \approx 1$. Все сказанное выше может служить подтверждением предположения об энерговыделении в волне, основной механизм которого несколько отличается от известного [21] для газовых смесей, где энерговыделение происходило при сгорании частично диссоциированного газа за счет торможения в пограничном слое. В данном случае горение за фронтом может происходить вблизи стенок, и за счет недоиспарившейся пленки горючего, и в объеме трубы из-за наличия химически активных центров. Описанные волны можно назвать волнами с реакцией, что, вероятно, присуще системам, в которых после про-

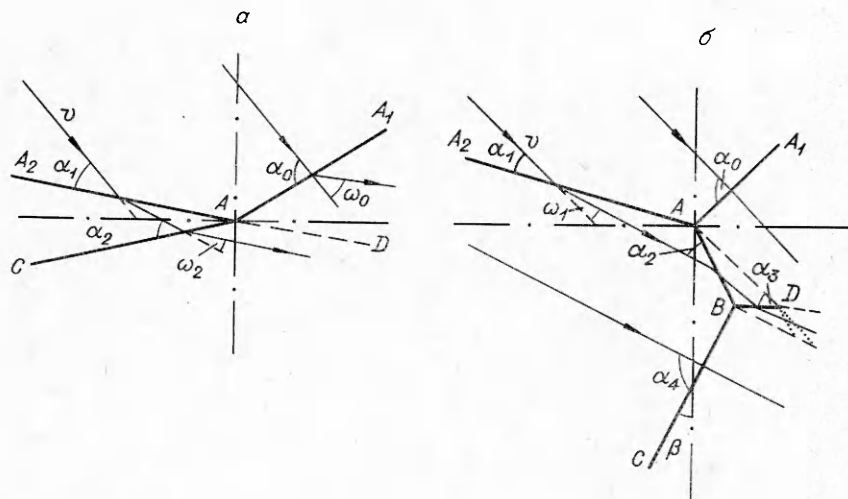


Рис. 5. Схема течения в области переднего фронта с одной (а) и двумя (б) тройными точками.

A_1A_2 — передний фронт; AC — поперечная волна; AB — косой скачок, идущий от переднего фронта; BC — поперечная волна; — скачки; ——— линии тока; - - - контактные разрывы.

хождения детонационной волны остается значительное количество негоревшего топлива.

Из рассмотрения фоторегистрограмм (рис. 5) следовало, что в области взаимодействия поперечного и переднего фронтов наблюдаются структуры с одной (а) и двумя (б) тройными точками. Структура, представленная на рис. 5, б, принципиально не отличается от известной [18]. Обе структуры исследовались с помощью ударных поляр.

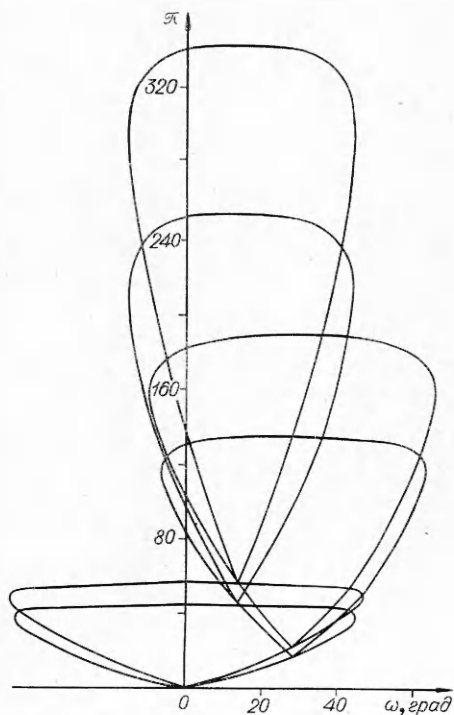


Рис. 6. Ударные поляры; $\pi = p/p_0$, p_0 — давление перед передним фронтом; $\alpha_1 = -37^\circ$.

Расчет на ЭВМ проводился для кислорода с использованием данных о его свойствах [22] в предположении, что все скачки ударные. Предварительно измерялись углы потока α_1 . При измерении углов наклона скачков по поперечным фоторазверткам по методу полной компенсации углы пересчитывались, поскольку на снимках они искажены. После пересчета угол $\alpha_1 = 32 \pm 5^\circ$, а скорость $v = 1950 - 2200$ м/с. Расчет проводился для крайних границ возможных скоростей потока v и углов α_1 с учетом всех их комбинаций. Ударные поляры для $\alpha_1 = 37^\circ$ и $v = 1950$ (нижние поляры) и 2200 м/с (верхние) приведены на рис. 6. Аналогично строились поляры и для $\alpha_1 = 27^\circ$. Видно, что изменение скорости потока весьма существенно сказывается на величине давления за скачками, но оказывает очень незначительное влияние на величину угла разворота потока за скачками (см. рис. 5) и на углы наклона удар-

Таблица 3

| α_1 , град | а | | | | | б | | | | | | | | |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | ω_1 | α_2 | ω_2 | α_0 | ω_0 | ω_1 | α_2 | ω_2 | α_0 | ω_0 | α_3 | ω_3 | α_4 | ω_4 |
| 27 | 20 | 34,5 | 22 | 77,5 | 42 | 20 | -35 | -225 | -89 | -3 | -45 | 22 | 89,5 | 0,5 |
| 37 | 28 | 29 | 15,5 | 76 | 43 | 28 | -34 | -15 | 88 | 10 | 47 | 23 | 86,5 | 7 |

ных скачков (отличие не превышает $0,5^\circ$). Значения рассчитанных углов (в град) приведены в табл. 3 для структур с одной (а) и двумя (б) тройными точками. Экспериментально измеренные углы α_0 , ω_0 и β в разумных пределах совпадают с расчетными. В структурах с одной тройной точкой в области переднего фронта наклон скачка АС к оси при удалении от фронта постепенно уменьшается и осуществляется переход в размытую акустическую волну.

В заключение сделаем следующие выводы.

Структура детонационной волны, распространяющейся в гетерогенной системе, заполненной кислородом, зависит от вида горючего, геометрии и размеров канала.

С увеличением диаметра трубы ($70 \text{ мм} \geq d \geq 20-30 \text{ мм}$) скорость детонации уменьшается, длина зоны реакции меняется незначительно, недогорание топлива в зоне реакции возрастает, часть топлива сгорает за зоной реакции и в отраженных волнах. При спиновой детонации возможно сопряжение поперечного фронта с передним фронтом с помощью одной или двух тройных точек.

Автор благодарит В. Н. Пицика за помощь в проведении экспериментов, В. В. Митрофанова за внимание к работе и М. Е. Топчияна за помощь в расчетах параметров детонации Чемпена — Жуге.

Институт гидродинамики
СО АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
21/IX 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1965, 162, 1.
2. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, 175, 1.
3. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1968, 183, 3.
4. С. А. Лесняк, Я. К. Трошин. ФГВ, 1970, 5, 4.
5. С. А. Лесняк, В. Г. Слущкий. ПМТФ, 1974, 3.
6. С. С. Рыбанин. Докл. АН СССР, 1966, 198, 4.
7. M. Sichel, C. S. Rao, I. A. Nicholls. Proc. 13-th Symposium (International) on Combustion Univ. Utah, Salt Lake City, Utah, 1970. Pittsburgh, Pennsylvania, Combust. Inst., 1971.
8. C. S. Rao, M. Sichel, I. A. Nicholls. Combust. Sci. and Technol., 1972, 4, 5.
9. В. М. Гендугов. ФГВ, 1972, 8, 4.
10. I. R. Bowen, K. W. Ragland. Proc. 13-th Symposium (International) On Combustion Univ. Utah, Salt Lake City, Utah, 1970. Pittsburgh, Pennsylvania, Combust. Inst. 1971.
11. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. ФГВ, 1975, 11, 6.
12. С. А. Лесняк, Я. К. Трошин. ФГВ, 1970, 5, 4.
13. E. K. Dabora, K. W. Ragland, I. A. Nicholls. Astronautica Acta, 1966, 12, 1.
14. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1963, 182, 5.
15. K. W. Ragland, I. A. Nicholls. AIAA J, 1969, 7, 5.
16. И. Н. Зверев, В. М. Гендугов, Н. И. Зверев. ФГВ, 1975, 11, 6.
17. А. В. Пинаев, В. В. Митрофанов. Докл. АН СССР, 1975, 225, 3.
18. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
19. В. М. Гендугов, Л. Г. Ильясова. ФГВ, 1976, 12, 1.
20. М. Е. Топчиян. Докт. дис., Новосибирск, 1974.
21. Б. В. Войцеховский. Ученый совет по народно-хозяйственному использованию взрыва СО АН СССР, вып. 13, 1960.
22. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Т. II. Под ред. В. П. Глушко. М., Изд-во АН СССР, 1962.