

## ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ГОРЕНИЕ ГАЗА ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

*Р. И. Солоухин*

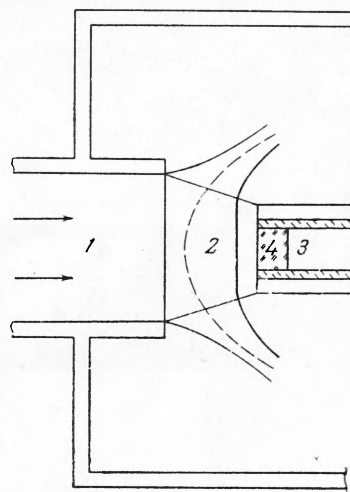
(Новосибирск)

В связи с разработкой практических схем непрерывного детонационного горения в потоке газа появилась необходимость исследования различных видов горения за воспламеняющей ударной волной, не ограничиваясь детонацией Чепмена — Жуге. Например, стационарную детонацию можно получить в кольцевом канале с воспламенением газа за непрерывно вращающейся по окружности ударной волной при радиальном обмене горючей смеси [1]. Изучение стационарной детонации в сверхзвуковых трубах связано с трудностями перемешивания горючего без предварительного воспламенения при создании смеси в потоке окислителя с высокой температурой торможения. Проводимые в этом направлении исследования [2,3] ограничены пока относительно бедными смесями, имеющими небольшую скорость детонации. Температура торможения потоков смеси, имеющих детонационную скорость, для высококалорийных смесей существенно выше температуры самовоспламенения газа, поэтому исследование стационарной детонации в условиях непрерывного истечения газа затруднено.

Используя режим пульсирующего горения, можно осуществить горение за ударной волной в потоке, имеющем скорость меньше детонационной. В описываемых ниже опытах для получения потока смеси, в котором температура за фронтом прямого скачка уплотнения у поверхности тормозящего тела достаточна для адиабатического самовоспламенения газа, применялась ударная трубка.

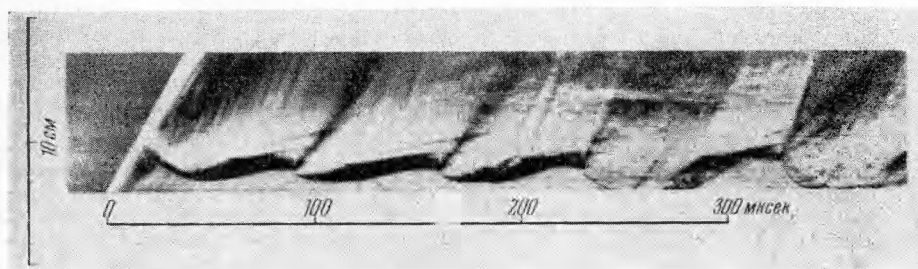
1. Описание установки. Схема опыта изображена на фиг. 1. Кратковременный сверхзвуковой поток исследуемой смеси создается в ударной трубке с каналом квадратного сечения  $50 \times 50$  мм. Секция низкого давления, имеющая длину 3.4 м, оканчивается форкамерой со смотровыми окнами из оптического стекла для наблюдения истечения газа шпиренметодом. Поток достаточно однороден по длине, его длительность около 250 мксек. В качестве рабочего газа высокого давления использовался водород.

Ударная волна, воспламеняющая газ, образуется у поверхности тормозящего цилиндрического тела с плоской торцевой поверхностью. Давление на поверхности торможения регистрируется импульсным осциллографом при помощи пьезодатчика из титаната бария. Развитие процесса со времени фотографируется методом развертки через узкую щель, расположенную вдоль нижней линии боковой поверхности тормозящего тела. Источником света является вспышка импульсной лампы. Момент вспышки и выход ударной волны из канала в форкамеру синхронизируются пьезодатчиком запуска. Для кадровой съемки применяется искровая подсветка с частотой вспышек около 30 тыс. в сек с использованием водородной лампы.

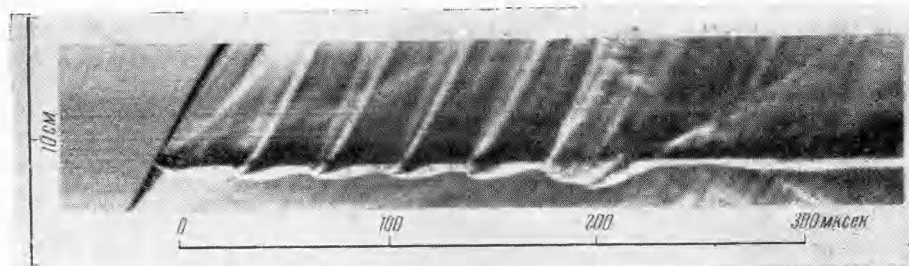


Фиг. 1

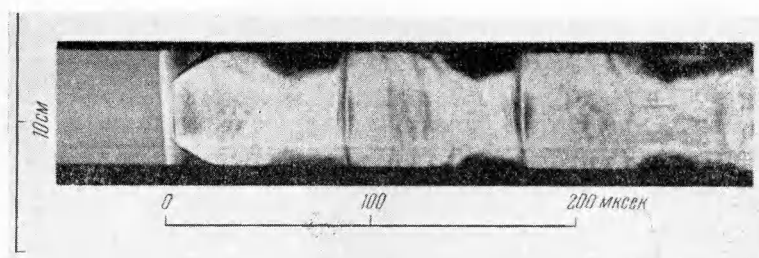
2. Результаты опытов. В опытах исследовался режим периодического воспламенения газа за отсоединенной ударной волной. Теневые развертки процесса показаны на фиг. 2 и 3. Течение до момента воспламенения аналогично процессу обтекания тела инертным газом. После воспламенения газа поддерживаемая горением ударная волна начинает распространяться вверх по потоку. Образованная таким образом волна детонации не доходит до края канала истечения, затухания вследствие ослабления на флангах и в результате радиального расширения потока за волной. Затем ударная волна сносится потоком к тормозящей поверхности, и процесс воспроизводится вновь. Пульсации продолжаются до прихода к телу «холодного» рабочего газа. Последняя пульсация отличается от предыдущих из-за разбавления исследуемой смеси водородом.



Фиг. 2



Фиг. 3

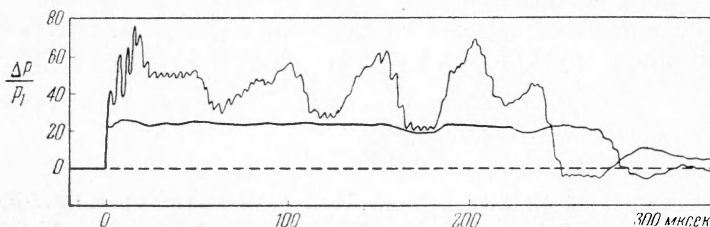


Фиг. 4

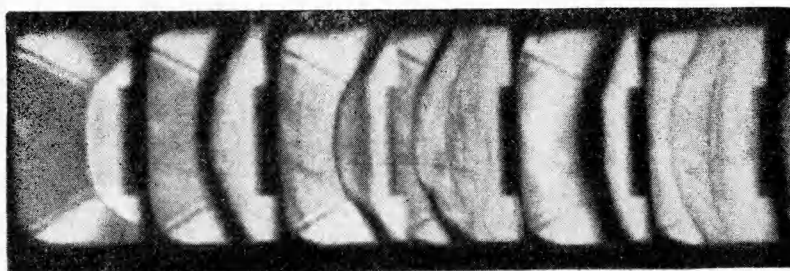
Для выяснения деталей структуры пульсирующей волны производилась развертка процесса через щель, параллельную торцовой поверхности тормозящего тела на расстоянии 1,5 см от торца (фиг. 4). В области за фронтом волны наблюдаются колебания газа с высокой частотой. Существование колебаний регистрируется также датчиком дав-

ления. На фиг. 5 сравниваются осциллограммы давления на торцовой поверхности при истечении горючей смеси и воздуха с близкими термодинамическими параметрами набегающего потока. Кадровые снимки процесса показаны на фиг. 6.

Затухание детонации и остановка волны происходят на расстоянии, несколько большем радиуса тормозящего цилиндра. Период пульсаций обратно пропорционален радиусу цилиндра. Приводим некоторые



Фиг. 5

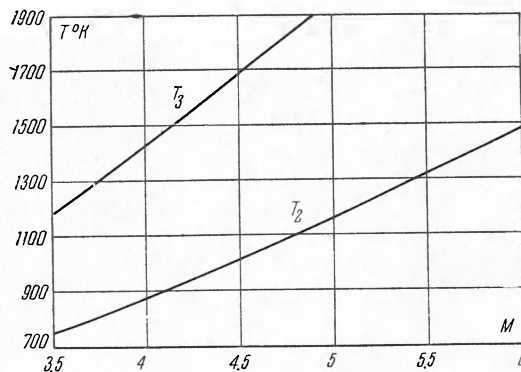


Фиг. 6

данные о пульсирующем режиме для смеси 14.3% этилового спирта, 78.5% воздуха и 7.2% кислорода; начальное давление газа 0.05 атм:

Радиус цилиндра, мм	6	9	12.5
Скорость падающей ударной волны, м/сек	1420	1450	1460
Температура газа за отраженной волной	1690	1720	1760
Период пульсаций, мксек	37.5	51	71
Амплитуда пульсаций, мм	8	12	22

На фиг. 7 приведен расчетный график зависимости температуры для падающей  $T_2$  и отраженной  $T_3$  ударных волн от числа  $M$  падающей ударной волны для данной смеси. Расчет выполнен с учетом зависимости теплоемкости газа от температуры. Измеренная скорость детонации смеси равна 1920 м/сек, скорость набегающего потока в пульсирующем режиме около 1220 м/сек.



Фиг. 7

Воспламенение за падающей ударной волной, т. е. с задержкой менее 2.5 мсек, наблюдается для чисел  $M > 5$ . Температура газа за фронтом таких волн составляет около 1200° К. Устойчивое горение за отраженной волной возникает лишь при  $T_3 = 1700°$  К. Таким образом, для выбранной

смеси энергия активации воспламенения невелика. Для смеси с более сильно выраженной зависимостью задержки воспламенения от температуры интервал параметров падающих ударных волн, в котором возможно изучение пульсирующего горения в ударной трубке, сокращается.

Способ получения описанного выше режима пульсирующего горения в сверхзвуковом потоке, по-видимому, не является единственно возможным. Образование пульсаций, связанное с ослаблением воспламеняющей ударной волны при ее отрыве от стабилизирующего тела, по-видимому, может быть вызвано также изменением концентрации смеси или какими-либо другими причинами.

Поступила 14 VI 1961

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский Б. В. Спиновая стационарная детонация. ПМТФ, 1960, № 3.
2. Николс, Дабора, Гилер. Исследования по стабилизации газовой детонации. Сб. Вопросы ракет. техн. ИИЛ, 1959, № 11.
3. Gross R. A. Research on Supersonic Combustion Journ. A. R. S. 1959, v. 29, No. 1.