

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ
ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ СМЕСИ
МЕТАНА С КИСЛОРОДОМ

Л. Г. Гвоздева

(Москва)

Приводятся результаты исследования методом сверхскоростного фотографирования тепловых картин плоской дифракции детонационных волн при обтекании выпуклых углов.

Стальная труба квадратным сечением 3×3 см², длиной 4 м откачивалась до давления 0.1 мм рт. ст., затем наполнялась взрывчатой смесью до давления 760 мм рт. ст. Стехиометрическая смесь метана с кислородом приготавливалась по объему в газометрах над водой и перемешивалась в течение нескольких суток. Смесь поджигалась конденсированной искрой. Детонационная волна, распространяющаяся по трубе, входила на конце трубы в экспериментальную секцию, с оптическими плоскопараллельными стеклами. Металлические вкладыши различной формы вставлялись в экспериментальную секцию так, что получалось плоское обтекание детонационной волной выпуклого угла.

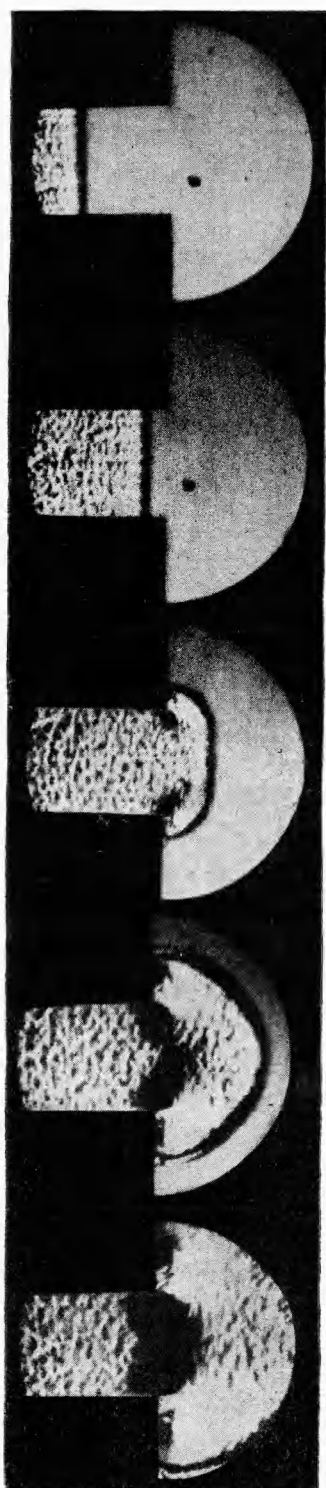
Экспериментальная секция помещалась в поле зрения прибора ИАБ-451. Высокоскоростное фотографирование тепловых картин проводилось при помощи фоторегистра СФР-2 в варианте луны времени с двухрядной вставкой. Переходная система из двух линз вместе с уменьшением ширины светового отверстия каждой линзочки на двухрядной вставке до 1 мм позволила осуществить съемку при частоте и размерах кадра, соответствующих двухрядной вставке, но со временем экспозиции каждого кадра в четыре раза меньше.

При наибольшей частоте съемки в 250 тыс. кадров / сек время экспозиции каждого кадра не превышало 0.5 мсек. Диаметр кадра 10 мм — изображение предмета на пленке — было уменьшено в 8 раз. Опыты производились также при частоте 125 тыс. кадров / сек со временем экспозиции каждого кадра 1 мсек. При помощи электронной системы осуществлялась синхронизация момента поджига смеси искрой от поджигающего высоковольтного трансформатора прибора СФР-2, момента вспышки импульсной лампы подсветки ИПС-400 и момента появления детонационной волны в экспериментальной секции.

Таким образом, были получены картины дифракции детонационной волны при обтекании углов 65, 90 и 115°.

На фиг. 1 и 2 приведены снимки дифракции при обтекании прямого и острого углов. В случае прямого угла время между последовательными кадрами было 8 мсек. Волна двигается слева направо, прямые углы обтекаются одновременно вверх и вниз. При распространении волны в область за углом интенсивность волны понижается, из-за падения давления образуется отраженная волна разрежения, левый край которой виден на снимке в виде границы темной области. После взаимодействия отраженных волн разрежения, идущих сверху и снизу, формируется плоская волна разрежения,двигающаяся назад по трубе. Вся картина дифракции соответствует схеме на фиг. 3: *КЕВ* — продифрагировавшая часть падающей детонационной волны, *АВ* — передний фронт отраженной волны разрежения.

На фиг. 2 приведены снимки обтекания острого угла 65°, при этом время между последовательными кадрами было 4 мсек.



Фиг. 1



Фиг. 2

Во всех опытах детонационная волна, распространяясь в область за углом, не отрывалась от стенки и оставалась всегда перпендикулярной к ней. Волна резко ослаблялась при дифракции. Ослабление было тем больше, чем меньший угол огибался. При обтекании угла 65° отношение скорости части волны, движущейся по стенке, к скорости невозмущенной части волны равно 0.32; при обтекании угла 115° — то же отношение равно 0.51.

При обтекании всех углов профили дифрагирующей волны оставались при движении подобными самим себе. Их можно совместить подходящим выбором масштаба. Подобными самим себе оставались при движении и границы основных темных и светлых областей на тепловых снимках (фиг. 2). Вид тепловых картин области между дифрагировавшей волной и передним фронтом волны разрежения почти не менялся при обтекании углов различной величины.

Точка фронта, в которой невозмущенная часть фронта детонационной волны касается продифрагировавшей (точка B на фиг. 3), двигалась под одним и тем же углом α к первоначальному направлению потока. Для всех трех обтекаемых углов угол α (угол COB на фиг. 3) равен $23.6^\circ \pm 1^\circ$.

Характерной особенностью всех дифракционных картин являлось также «раздвоение» фронта детонационной волны, которое особенно ясно заметно на фиг. 2. У стенки угла внутри черной полосы фронта детонационной волны появляется белое пятно, которое от кадра к кадру становится все больше и занимает все большую угловую область. Появление такой белой полосы на тепловом снимке соответствует появлению пологой части или впадины на обычно равномерно понижающемся профиле плотности в детонационной волне [1].

Из отмеченных особенностей можно сделать следующие выводы. Подобие профилей волны и основных областей при дифракции показывает, что процесс дифракции происходит автомодельно. Это дает возможность определить скорости движения отдельных точек фронта, измеряя длину векторов — перпендикуляров, — опущенных из вершины угла на касательную к фронту в заданной точке.

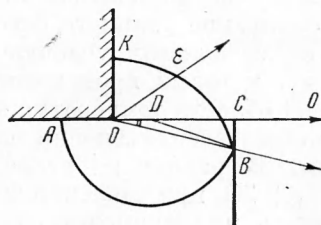
Затем можно рассчитать параметры газа сразу за фронтом ударной волны, где газ еще не воспламенился, по формулам для давления, плотности и температуры за ударной волной в зависимости от числа Маха волны. Таким образом, были получены угловые распределения давления, плотности и температуры за фронтом продифрагировавшей детонационной волны. Распределение температур при обтекании прямого угла приведено на фиг. 4. Угол θ отсчитывался от первоначального направления потока OC в сторону невозмущенного фронта (фиг. 3). При расчетах предполагалось, что отношение удельных теплоемкостей не менялось при переходе через ударный фронт.

На фиг. 4 температура резко падает вдоль фронта. При обтекании угла 65° падение еще больше, температура на стенке достигает значения 590°K .

Таким понижением температуры можно объяснить «раздвоение» детонационной волны.

Для угла 65° (фиг. 2) раздвоение начиналось на стенке при температуре сразу за фронтом ударной волны $T_2 = 590^\circ \text{K}$ через $8 \mu\text{сек}$ после начала дифракции. Через $14 \mu\text{сек}$ раздвоение наблюдалось в области за волной, где $T_2 = 790^\circ \text{K}$; через $22 \mu\text{сек}$ — в области с $T_2 = 1040^\circ \text{K}$.

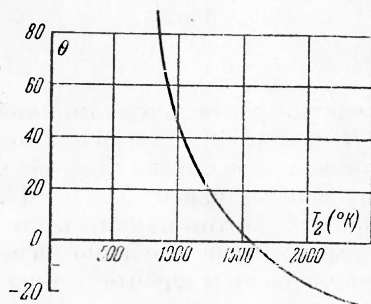
Возможно следующее объяснение этого явления. За фронтом дифрагированной волны температура понижается, одновременно зона растягивается при движении. Повышение температуры за фронтом ударной волны в зоне реакции происходит на большем расстоянии, градиенты темпе-



Фиг. 3

ратуры уменьшаются. Когда температура значительно понижается, а градиенты температуры становятся малыми, то реакция уже не начинается сразу за ударной волной. Нарушается равномерное повышение температуры за фронтом, на тепловом снимке получается изменение цвета на небольшом участке — раздвоение. Чем выше температура за фронтом, тем меньше должны быть градиенты температуры, чтобы произошло такое отслаивание ударного фронта от зоны горения. Поэтому раздвоение занимает все большую угловую область от кадра к кадру. Весь процесс обратен тому, который происходит при возникновении детонации.

В области температур 400—600° К должно происходить изменение механизма воспламенения для стехиометрической смеси метана с кислородом. В работе [2] исследовалось поджигание ударной волной смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ при давлении 600 мм рт. ст. в ударной трубе. Смесь воспламенялась при температурах 430° К (за падающей ударной волной) или 630° К (за отраженной волной).



Фиг. 4

Из полученных снимков можно сделать заключение не только о параметрах газа за дифрагировавшей частью волны, но и за самой падающей волной.

Передний фронт отраженной волны разрежения распространяется в сгоревшем газе за детонационной волной со скоростью звука относительно движущегося газа. Из треугольника OCB (фиг. 3) следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{c_2^2 - (D - w_2)^2}}{D}$$

где D , w_2 , c_2 — скорости детонации, потока и звука за детонационной волной.

Зная все параметры падающей волны, можно заранее рассчитать угол α , под которым двигается точка пересечения возмущенной части фронта с невозмущенной. И наоборот, по картине дифракции можно оценить, измеряя по снимку D , $c_2 - w_2$ и $\operatorname{tg} \alpha$, значения скорости звука и скорости потока за детонационной волной.

В рассматриваемом случае получилось

$$w_2 = 1100 \pm 90 \left[\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right], \quad c_2 = 1540 \pm 160 \left[\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right]$$

Скорость детонации была равна

$$D = 2300 \pm 100 \left[\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right]$$

Волна пересжата, так как $c_2 + w_2 > D$. Вероятно длина трубы была мала для установления детонации Чепмена — Жуге.

По обычным разверткам, проведенным с линейной скоростью 375 м / сек, сделать какие-либо выводы о состоянии газа за детонационной волной было невозможно. В пределах ошибок измеренное значение скорости совпадало с ранее известными экспериментальными значениями стационарной скорости детонации и с вычисленным теоретическим значением с учетом диссоциации продуктов сгорания [3].

Поступила 10 VII 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Компанеев А. С. Теория детонации. М., Гостехиздат, 1955.
2. Suzuki M., Miyama H., Fujimoto S. The ignition of methane — oxygen mixture by shock wave. Bull. Chem. Soc. Japan., 1958, No. 2, v. 31.
3. Гвоздева Л. Г. Преломление детонационных волн при падении на границу раздела двух газовых смесей. ЖТФ, 1961, т. 31, вып. 6.