

К ТЕОРИИ ДЕТОНАЦИИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

Г. П. Черепанов

(Москва)

В отличие от хорошо изученной детонации гомогенных смесей [1] детонация, имеющая место в гетерогенных системах (например, когда топливо в виде слоя наносится на стенки трубы, в которой находится газообразный окислитель), еще мало исследована. Эксперименты показали следующие наиболее характерные свойства детонации в гетерогенных системах [2-4].

1) Скорость распространения детонационной волны является физико-химической константой смеси.

2) Структура детонационной волны имеет строго периодический характер, связанный с нестационарным механизмом поддержки передней ударной волны (которую будем называть первичной) вторичными скачками уплотнения, образующимися при периодически происходящих внутри детонационной волны взрывах.

Если первое свойство гетерогенной детонации является общим с гомогенной детонацией, то второе представляет собой отличительное качество гетерогенной детонации. В основе классической теории детонации Чепмена — Жуге — Зельдовича — Неймана лежит предположение об одномерности и стационарности процесса. В связи с гетерогенной детонацией представляет интерес также построение некоторых идеальных нестационарных моделей детонации. Ниже рассматривается простейшая модель детонации подобного рода, позволяющая в идеализированном случае учесть потери энергии, вызванные существенной нестационарностью процесса.

1°. Примем обычные предположения: а) процесс является одномерным; б) потерями тепла через стенки трубы, потерями импульса вследствие трения о стенки, неполнотой сгорания и т. д. пренебрегаем.

Пусть детонационная волна находится между сечениями 0 — 0 и 1 — 1. Сечению 0 — 0 соответствует первичная ударная волна, за сечением 1 — 1 химических реакций не происходит. Детонационная волна движется со средней скоростью D .

Рассмотрим следующую модель детонации. Строго периодически (с периодом T) в сечении 1 — 1 происходит точечный взрыв мощностью q , вызывающий два вторичных скачка уплотнения, один из которых догоняет первичную ударную волну, а другой уходит из детонационной волны вниз по потоку. Считаем, что выделение теплоты вследствие химической реакции происходит лишь в сечении 1 — 1, а в остальной части детонационной волны реакция не идет. В результате взаимодействия первичной и вторичной ударных волн образуется более мощная передняя первичная волна, скорость которой возрастает, а затем убывает до прежней величины, испытывая затем снова некоторое увеличение под действием скачка уплотнения от следующего взрыва и т. д. Картина течения в такой нестационарной детонационной волне весьма сложна в связи с тем, что при взаимодействии первичного и вторичного скачков образуются также тангенциальный разрыв и более слабый скачок уплотнения (или волна разрежения), движущийся навстречу следующей вторичной ударной волне. За бесконечно большое время в детонационной волне устанавливается периодический режим. Рассмотренная периодическая картина движется с некоторой средней скоростью D .

Обратим течение; будем считать, что в новой системе координат сечение 1 — 1 покоится, поток набегает на детонационную волну со скоростью D . Сечение 0 — 0 будет испытывать периодические колебания около некоторого среднего положения.

Будем наблюдать поток за очень большое время τ ($\tau \gg T$). Предположим, что поток в детонационной волне в среднем по времени стационарен. При этом в определенном приближении можно написать основные законы сохранения массы, количества движения и энергии в виде

$$\begin{aligned} \rho_0 D &= \rho (D - u), \quad \rho_0 D^2 - \rho (D - u)^2 = p - p_0 \\ i_0 + \frac{D^2}{2} + \frac{q}{2\rho_0 D T} &= i_1 + \frac{(D - u_1)^2}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь p , ρ , u , i — средние по времени и по сечению трубы давление, плотность, скорость потока относительно трубы, теплосодержание единицы массы потока соответственно. Индекс 0 соответствует параметрам невозмущенного потока, индекс 1 — параметрам потока в сечении 1—1.

Двойка в знаменателе у члена с q появляется потому, что в объеме между сечениями 0—0 и 1—1 расходуется лишь половина выделяющегося при взрыве тепла; другая половина уносится вниз по потоку вместе со скачками уплотнения (при точечном взрыве энергия взрыва, очевидно, распределяется симметрично относительно места взрыва).

Примем следующую основную гипотезу, являющуюся аналогом гипотезы Чепмена — Жуге в стационарной детонации. Средняя скорость детонации относительно средней скорости потока в сечении 1—1, где периодически происходят взрывы, равна

средней местной скорости звука

$$D - u_1 = a_1 \quad (2)$$

В пользу последней гипотезы можно привести обычные соображения гидродинамической устойчивости и механизма детонации [1], если учесть, что в детонационную волну идет лишь половина химической энергии, а другая половина расходуется на гораздо большую массу вещества (теоретически бесконечно большую), расположенную за детонационной волной.

Из системы уравнений (1), (2) можно определить среднюю скорость детонации для идеального газа. Считая, что $i_0 \ll D^2$, как обычно [1], получаем

$$D^3 = (k^2 - 1) \frac{q}{\rho_0 T} \quad (k - \text{отношение теплоемкостей}). \quad (3)$$

2°. Предложенную модель детонации обсудим в связи с детонацией в трубах с окислителем, когда топливо слоем наносится на стенки трубы [2-4]. В этом случае можно представить себе следующий механизм детонационной волны. Под действием высокой температуры за ударной волной топливо разогревается; происходит его испарение (или, возможно, распыл) в пограничный слой, в котором начинает протекать реакция. Поток ускоряется вплоть до турбулизации; последняя резко увеличивает скорость выделения тепла и происходит взрыв, сопровождающийся полным выгоранием в зоне взрыва. Если: а) зона взрыва мала по сравнению с шириной детонационной волны; б) пренебречь теплотой, выделяющейся вне зоны взрыва; в) пренебречь неполнотой сгорания, то можно ожидать совпадения теоретической средней скорости детонации с экспериментально наблюдаемой¹. Отметим формулу

$$q = QT D \rho_0 \quad (4)$$

Здесь Q — то тепло на единицу массы, которое выделилось бы, если бы окислитель и топливо предварительно перемешать до достижения гомогенной смеси. Если предположить, что реакция в гетерогенной смеси происходит точно таким же путем, что и в однородной смеси, то для скорости гетерогенной детонации на основании (3) и (4) получается простая формула

$$D = D_0 / \sqrt{2} \quad (5)$$

где D_0 — скорость детонации в соответствующей гомогенной смеси. Для смеси нормальных углеводородов с кислородом скорость детонации равна 2350 м / сек для стехиометрического состава, а максимальная скорость детонации составляет 2650 м / сек [5]. В соответствующем случае гетерогенной детонации теоретическое значение скорости D составит 1670 и 1870 м / сек соответственно. Экспериментально наблюдались скорости гетерогенной детонации 1720 и 1850 м / сек соответственно [3,4].

3°. Рассмотренная в п. 1° модель детонации в известном смысле является предельной. Допустим, что в зоне детонационной волны происходит n одинаковых точечных взрывов. В этом случае гипотезу (2) естественно принять для того сечения, где имеет место последний по расположению в детонационной волне взрыв. Рассуждая аналогично предыдущему, придем к следующему значению скорости детонации:

$$D = \left(\frac{2n-1}{2n} \right)^{1/2} D_0 \quad (6)$$

При $n \rightarrow \infty$ последняя модель смыкается с классической.

Автор благодарен Г. И. Баренблатту и В. Ф. Комову за полезные обсуждения.

Поступила 6 IV 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Компанеец А. С. Теория детонации. Гостехиздат, 1955.
2. Loison R. Compt. rend., 1952, vol 243, No. 5, p. 512.
3. Гордеев В. Е., Комов В. Ф., Трошин Я. К. О детонационном горении гетерогенных систем. Докл. АН СССР, 1965, т. 160, № 4.
4. Комов В. Ф., Трошин Я. К. О структуре и механизме детонации гетерогенных систем. Докл. АН СССР, 1965, т. 162, № 3.
5. Иост В. Взрывы и горение в газах, Изд. иностр. лит., 1952.

¹ Нижеследующие формулы получаются также, если отказаться от предположения б), но взамен этого предположить несколько другой механизм детонационной волны, а именно, считать, что при периодически происходящих взрывах образуются вторичные детонационная и ретонационная волны, причем вся выделяющаяся химическая энергия распределяется между ними поровну.