

С. М. КОГАРКО и член-корреспондент АН СССР Я. Б. ЗЕЛЬДОВИЧ

### О ДЕТОНАЦИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

М. А. Ривин и А. С. Соколик<sup>(1)</sup> первые отметили, что в детонационной волне зона химической реакции, в которой происходит превращение исходной смеси в продукты реакции, должна иметь конечную толщину, зависящую от скорости реакции.

Теоретическое рассмотрение газовой детонации приводит к выводу, что во фронте детонации идет ударная волна, сжимающая и нагревающая газовую смесь. Химическая реакция идет уже в сжатом газе, и только по окончании реакции достигается состояние продуктов взрыва, вычисляемое в классической теории (давление  $p_k$ , скорость движения  $w_k$ , температура  $T_k$ ). В частности, во фронте волны скорость  $w_1$  и давление  $p_1$  сжатого газа приблизительно вдвое больше, чем в продуктах реакции:  $w_1 \approx 2w_k$ ,  $p_1 \approx 2p_k$ . Количество и толщина слоя сжатого газа с давлением  $p_1$  пропорциональны времени химической реакции  $\tau$ .

Только при таком представлении о механизме детонации удалось теоретически обосновать<sup>(2)</sup> хорошо известный факт, что из ряда возможных значений скорости детонации, удовлетворяющих уравнениям механики и термодинамики, обязательно осуществляется наименьшее значение  $D_k$ . Теплоотдача газа стенкам трубы и трение газа о стенки вызывает уменьшение скорости детонации и соответствующее уменьшение других величин ( $p_1$ ,  $p_k$ ,  $w_1$ ,  $w_k$ ,  $T_1$ ,  $T_k$ ). Чем больше диаметр трубы  $d$ , тем меньше теплоотдача и трение; изменение скорости детонации зависит (пропорционально) от отношения времени реакции  $\tau$  к диаметру  $d$ ,  $\tau/d$ .

В простейших предположениях о том, что скорость химической реакции зависит от температуры сжатия  $T_1$  (соответствующее время  $\tau_1$ ), а сама реакция идет равномерно по всему сечению трубы, можно было сделать вывод, что распространение детонации возможно только в том случае, когда отношение  $\tau_1/d$  меньше определенной величины. Исходя из этих предпосылок, в лаборатории горения Института химической физики АН СССР было поставлено исследование детонации газов в трубе, диаметр которой равен 305 мм, т. е. в 10—15 раз больше, чем в обычных лабораторных условиях. Можно было ожидать, что при этом окажется возможной детонация смесей с большим  $\tau_1$ , не детонирующих в узких трубах, и, благодаря увеличению  $\tau_1$  на пределе, удастся экспериментально обнаружить существование слоя сжатого газа повышенного ( $p_1$ ) давления во фронте волны.

Экспериментальная установка состояла из стальной трубы внутреннего диаметра 305 мм, длиной 12,2 м, снабженной смотровыми окнами для регистрации распространения детонации. Детонация ини-

цировалась зарядом взрывчатого вещества (30 г). Для измерения давления при отражении детонационной волны от жесткой стенки в торце трубы были установлены крешерные приборы. Исследование распространения детонации в водородо-воздушных смесях показало, что нижний предел распространения детонации 19,6%  $H_2$  в узких трубах понижается до 15,0% в условиях трубы большого диаметра, а соответственно, верхний предел повышается с 58,8 до 63,5%  $H_2$ .

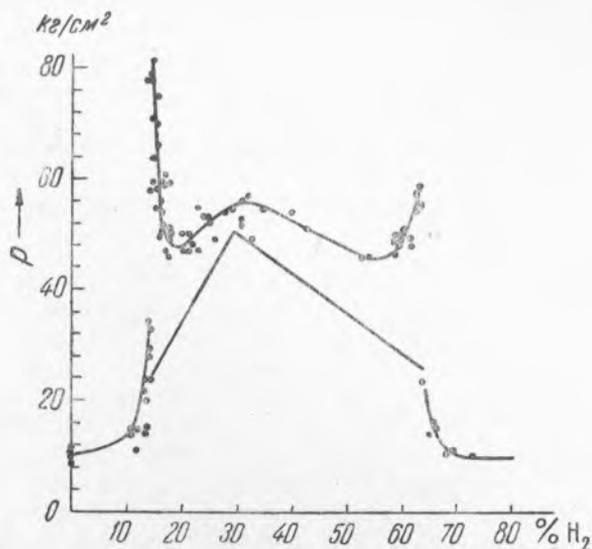


Рис. 1. Давление при отражении детонационной волны от жесткой стенки в зависимости от содержания  $H_2$  в водородо-воздушной смеси

Оценку максимальных давлений в детонационной волне мы производим по измерению обжатия конических красномедных столбиков диаметром 5 мм и высотой 8,1 мм в крешерных приборах специальной конструкции. Так как время обжатия крешерного столбика ( $\sim 10^{-4}$  сек.) значительно больше времени воздействия слоя сжатого газа на приемник давления, то мы в общем случае измеряем некоторое промежуточное значение давления (между  $p_1$  и  $p_k$ ). Это давление тем ближе к максимальному значению  $p_1$ , чем шире зона повышенного давления.

На рис. 1 приведена полученная нами зависимость давления при отражении детонационной волны от торца трубы от процентного содержания водорода в воздухе. Ломаная представляет соответствующую зависимость, вычисленную по классической теории детонации, без рассмотрения зоны химической реакции\*.

Из рассмотрения рис. 1 следует, что в смесях водорода с воздухом, далеких по составу от предельных, экспериментально измеренное давление при отражении детонационной волны от стенки мало отличается от давления, рассчитанного по классической теории детонации. В предельных смесях соотношение существенно меняется. Так например, на нижнем пределе в смеси, содержащей 15%  $H_2$ , измеренное давление приблизительно в 3 раза выше расчетного; на верхнем пределе в смеси, содержащей 63,5%  $H_2$ , измеренное давление приблизительно в 2 раза больше расчетного.

Может быть дано следующее объяснение резкого расхождения между экспериментально определенными и вычисленными по класси-

\* Но с учетом повышения давления при остановке у торца газа, двигавшегося со скоростью  $w_k$ .

ческой теории величинами максимальных давлений при отражении детонационной волны от стенки в предельных смесях и почти полного совпадения этих величин в смеси стехиометрического состава. В смеси стехиометрического состава и близких к ней скорость химической реакции в волне столь велика, что промежуток времени от сжатия смеси ударной волной до окончания реакции исчезающе мал. Вследствие этого продолжительность действия зоны реакции с повышенным давлением на воспринимающий давление столбик тоже мала по сравнению с временем обжатия столбика. Мы в данном случае измеряем более длительно действующее давление продуктов реакции. По мере обеднения или обогащения смеси водородом скорость реакции в сжатой ударной волной смеси будет уменьшаться, и на пределе зона реакции уже растягивается на заметную глубину. В этом случае время действия давления в зоне на воспринимающий давление столбик становится сравнимым со временем обжатия столбика, и, следовательно, здесь мы измеряем давление, более близкое к давлению в зоне реакции, чем к давлению в продуктах реакции.

Таким образом, наши ожидания, относящиеся к увеличению  $\tau$  на пределе и к расширению пределов при увеличении диаметра, действительно оправдались. Однако подробное фотографическое исследование волны показало, что одна из предпосылок — о равномерной реакции по всему сечению — не оправдывается. В соответствии с тем, что К. И. Щелкин и сотр. (3) отметили в лабораторных условиях, в широкой трубе также наблюдается спиновая детонация.

Полученные результаты необходимо осмыслить с точки зрения современной теории спиновой детонации (4, 5). В цитированных работах рассматривалась только та область (так называемая „голова“ спина, „излом“ ударной волны), в которой происходит воспламенение газа. Были найдены условия — скорость косо́й ударной волны и соответствующие давление  $p_2$  и температура  $T_2$  — в голове спина, т. е. условия, в которых происходит воспламенение в спиновой детонации; при этом размер головы  $b_2$  и время реакции в голове спина в этих условиях  $\tau_2$  считались весьма малыми; не ставился вопрос об условиях возможности спиновой детонации.

Дальнейшее теоретическое исследование вопроса привело к следующим выводам: для возможности воспламенения в голове спина необходимо, чтобы соотношение  $\tau_2/b_2$  было меньше определенной величины\*. Рассматривая с газодинамической точки зрения условия в изломе ударной волны, найдем, что при данном расстоянии между двумя соседними головами  $h^{**}$  амплитуда волны в изломе тем меньше, чем больше ширина излома  $b_2$ ; с амплитудой волны связана и температура, при которой в изломе начинается реакция. Вычисленное раньше (5) значение  $T_2 = T_{20}$  относилось к случаю  $b_2/h \rightarrow 0$ ; при  $b_2/h \rightarrow 1$ , очевидно,  $T_2 = T_1$  — температуре в плоской волне. Таким образом, при увеличении  $b_2/h$ ,  $T_2$  падает, а время реакции  $\tau_2$  растет. Отсюда следует физический вывод: при малом  $\tau_2$  возможно малое  $b_2$  и малое  $h$ , в трубе могут одновременно находиться много голов спина, притом тем больше, чем больше диаметр трубы. В трубе данного диаметра  $d$  при увеличении  $\tau_2$  возможное число голов уменьшается. При некоторых  $\tau_2$  возможна только одна голова. При этом  $h = \pi d$ ;  $b_2 \sim h$ ;  $\tau_2 \sim b_2 \sim h \sim d$ ; чем больше  $d$ , тем больше соответствующее  $\tau_2$  при одноголовом спине. При еще большем  $\tau_2$  становится невозможной спиновая детонация. Таким образом, при приближении

\* Так как из зоны воспламенения в голове спина происходит быстрое истечение газа, а не медленная теплоотдача, то критическое значение  $\tau_2/b_2$  в голове меньше критического значения  $\tau_1/d$  для нормальной волны в трубе.

\*\* При наличии одной только головы под  $h$  надо понимать расстояние от этой головы до нее самое, отсчитанное по окружности, т. е.  $h = \pi d$ .

к пределу число голов уменьшается. Пределы спиновой детонации также должны расширяться при увеличении диаметра трубы.

Величина  $\tau_2$  относилась к времени воспламенения в голове. Полное время реакции  $\tau_3$  всей газовой смеси во всем сечении трубы при спиновой детонации определяется временем турбулентного распространения пламени от воспламеняющихся голов по всему сечению. В данной трубе это время тем меньше, чем больше точек воспламенения, чем больше голов. При приближении к пределу, когда число голов уменьшается, достигается максимальная величина времени реакции  $\tau_{3m}$ . Скорость турбулентного распространения пропорциональна скорости детонации\*, так что  $\tau_{3m}$  (время реакции всей смеси на пределе) пропорционально диаметру трубы  $d$ .

Таким образом, развитые здесь теоретические представления о полной картине спиновой детонации приводят к наблюдаемым выводам, неожиданно близким к выводам, сделанным ранее для нормальной детонационной волны: расширение предела и увеличение максимального времени реакции на пределе при увеличении диаметра. Выводы эти хорошо согласуются с результатами проделанных опытов в весьма широких трубах.

Поступило  
19 X 1948

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> М. А. Ривин и А. С. Соколик, ЖФХ, 10, 692 (1937). <sup>2</sup> Я. Б. Зельдович, ЖЭТФ, 10, 542 (1940). <sup>3</sup> Х. А. Ракипова, Я. К. Трошин и К. И. Щелкин, ЖТФ, 17, 1409 (1947). <sup>4</sup> К. И. Щелкин, ДАН, 47, 501 (1945). <sup>5</sup> Я. Б. Зельдович, ДАН, 52, 147 (1945). <sup>6</sup> К. И. Щелкин, ЖТФ, 13, 520 (1943).

\* Турбулентное распространение происходит на границе двух слоев газа, движущихся с разной скоростью: газа, сгоревшего в изломе, и газа, сжатого плоской волной. Из расчета следует, что разность скоростей этих соседних слоев пропорциональна скорости детонации. Пульсационная скорость на границе струй пропорциональна разности скоростей. Скорость турбулентного распространения, по К. И. Щелкину (<sup>6</sup>), приблизительно пропорциональна пульсационной скорости.