

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

А. Н. ВОИНОВ

**О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО СПИНА**

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 24 IV 1950)

Явление так называемой спиновой детонации, при которой зона воспламенения («голова спина») распространяется по спиральной траектории, расположенной вблизи от стенок трубы, представлялось настолько противоречивым, что до недавнего времени не находило никакого рационального объяснения. Опытами А. С. Соколика и М. А. Ривина <sup>(1)</sup> и К. И. Щелкина с сотрудниками <sup>(2)</sup> доказано, что спин обязательно появляется вблизи от пределов распространения детонации в любых газовых смесях. Это означает, что возникновение спина должно с неизбежностью вытекать из особенностей воспламенения ударной волной газовых смесей в тех случаях, когда скорости реакции малы, а периоды задержек воспламенения соответственно велики.

Согласно предложенной К. И. Щелкиным <sup>(3)</sup> и развитой далее Я. Б. Зельдовичем <sup>(4)</sup> теории, объяснение спина сводится к следующему. Когда вследствие недостаточной скорости химической реакции в сильно обедненных или обогащенных смесях воспламенение уже не может произойти во фронте плоской ударной волны, то достаточно, чтобы эта ударная волна имела «излом», как за счет более высокой температуры в таком изломе в нем возникает очаг воспламенения, представляющий не что иное, как «голову» или «ядро» спина. Из газодинамических соображений следует, что распространение излома ударной волны и связанной с ним зоны воспламенения должно быть вполне устойчивым и эквивалентно распространению по спирали особой детонационной волны, окруженной с боков сжатым до высокого давления, не прореагировавшим газом и потому обладающей большей скоростью. Эта теория хорошо объясняет ряд казавшихся до этого противоречивыми экспериментальных данных, относящихся к спиновой детонации, но, приписывая первоначальное возникновение «излома» фронта ударной волны случайнym причинам, повидимому, еще недостаточна для объяснения исключительной закономерности появления спиновой детонации.

Регулярность возникновения и устойчивость спина в трубах самого различного профиля указывает на то, что в основе этого явления не могут лежать только случайные причины, а что возникновение спина должно быть обусловлено самими особенностями развития самовоспламенения, вызванного ударной волной, при относительно больших периодах задержки воспламенения.

Рассмотрим, каким образом может возникать первое самовоспламенение газа, по которому распространяется плоская ударная волна с постепенно возрастающей амплитудой (классический случай возникновения детонации в результате саморазгона пламени на некотором расстоянии перед фронтом последнего). Представим себе фронт ударной волны, распространяющейся в трубе со скоростью  $D$  (см. рис. 1); сразу же за

фронтом волны газ оказывается сжатым до давления  $P$  и нагретым до температуры  $T$  и движется со скоростью массового потока  $W$ , превосходящей скорость звука в сжатом газе за фронтом волны\*. В случае сверхзвукового потока трение газа о стенки трубы имеет динамический характер, проявляющийся в том, что около малейших неровностей на стенках возникают скачки уплотнения, распространяющиеся внутрь потока в виде так называемых линий Маха, наклоненных к оси потока под углом  $\sin \alpha = C / W$ . Каждая из таких линий Маха представляет ударную волну небольшой амплитуды, с фронтом, обращенным против потока, причем за фронтом такой волны давление и температура оказываются несколько повышенными, а скорость пониженной по сравнению с основной частью потока. Сетка этих линий в установленном потоке

имеет хорошо известный вид, показанный на рис. 1 слева, когда возникшие около стенок возмущения охватывают все сечение трубы, хотя и здесь, очевидно, амплитуда волн Маха вблизи от стенок должна быть больше, нежели в центральной части потока. Непосредственно же за фронтом ударной волны уплотнения

берущие начало от стенок, вообще не успевают захватить все сечение трубы, и картина должна отвечать изображенной на рис. 1 справа, где пунктирными линиями показаны элементарные волны с амплитудой, близкой к звуковой, а сплошными — линии Маха конечной амплитуды. Такой характер линий Маха за фронтом ударной волны был получен Боном, Фрезером и Уиллером (5) на шлирен-фотографиях ударных волн, хотя указанные авторы приписали его напряжениям, возникающим в стенках стеклянной трубы.

Так как за каждой из таких линий Маха давление и температура несколько выше, чем перед ней, то это означает, что за фронтом ударной волны должен двигаться со скоростью массового потока, чуть отставая от него, расположенный около стенок трубы кольцевой слой газа, дополнительно сжатого и нагретого за счет динамического трения о стенки. В соответствии с этим возникновение первого или нескольких первых очагов воспламенения должно иметь место именно в указанном кольцевом слое около стенок, где и давление и температура выше, нежели в остальном сечении трубы. Воспламенение в отдельных точках кольцевого слоя должно происходить вследствие неизбежных при указанном динамическом торможении флюктуаций температуры по периметру кольцевого слоя, связанных с различной шероховатостью стенок. Очевидно, что возникшее в первичном очаге воспламенения пламя должно в первую очередь распространяться в этом же кольцевом слое, где период задержки воспламенения и во всех смежных с первоначально воспламенившимся объемах предельно близок к своему завершению, т. е. практически равен нулю. При этом пламя будет распространяться в кольцевом слое с чрезвычайно высокими скоростями, совершенно аналогично тому, как это зарегистрировано в наших опытах на установке адиабатического сжатия, где самовоспламенение, возникающее за счет флюктуаций температуры первоначально также в отдельных очагах, распространяется затем по подготовленной к самовоспламенению соседней смеси со скоростями порядка звуковых. Эти же опыты в установке

\* Так, например, при распространении ударной волны в воздухе со скоростью  $D = 1500$  м/сек., при начальных 1 ата и  $20^\circ$ , скорость звука в ударно-сжатом газе составляет  $C = 750$  м/сек., а скорость массового потока  $W = 0,79$ ,  $D = 1185$  м/сек., т. е. для такого потока  $M_a = 1,58$ ; при  $D = 2000$  м/сек.,  $W = 0,81$ ,  $D = 1615$  м/сек.,  $M_a = 1,72$  (расчеты проведены в предположении постоянной теплоемкости  $\gamma = 1,4$ ).

адиабатического сжатия показывают, что столь быстрое распространение пламени сопровождается возникновением в газе ударной волны и что обычно дальнейшее распространение пламени осуществляется уже совместно с фронтом этой волны, т. е. по механизму, в принципе аналогичному детонации, хотя и отличающемуся от обычной детонации рядом особенностей.

Так как в рассматриваемом нами случае полностью подготовленная к самовоспламенению смесь сосредоточена только в кольцевом слое, то указанное быстрое распространение пламени может иметь место также только в этом слое, а следовательно, воспламенение будет в первую очередь распространяться по окружности трубы, а совместно с этим воспламенением и в дальнейшем инициируя его должна распространяться вызванная им поперечная, т. е. вращающаяся ударная волна. Направление вращения этой ударной волны и вызываемого ею воспламенения в кольцевом слое будет, очевидно, зависеть от чисто случайных причин, а именно от того, с какой стороны от первого очага воспламенения смесь оказалась более подготовленной к самовоспламенению в первый момент начала рассматриваемого процесса. Но коль скоро в результате быстрого распространения пламени в кольцевом слое возникла ударная волна, бегущая по окружности трубы, дальнейший процесс воспламенения в кольцевом слое приобретает уже организованный характер и является не чем иным, как распространением поперечной, т. е. вращающейся детонационной волны особого рода, которую правильно назвать волной самовоспламенения. Так как одновременно с распространением воспламенения по окружности трубы в кольцевом слое сам этот слой непрерывно возобновляется за счет сжатия основной, ударной волной и торможения у стенок все новых и новых порций свежего газа, то должны поддерживаться условия для устойчивого распространения такой волны самовоспламенения по спирали вблизи внутренней поверхности трубы. Распространение пламени по остальному сечению трубы будет, очевидно, происходить по механизму турбулентного горения, аналогично тому, как это предполагает Я. Б. Зельдович (6) в случае детонации в шероховатых трубах, а также М. А. Ривин (7).

Поперечная волна самовоспламенения распространяется по газу, сжатому в основной ударной волне до весьма высоких давлений и температур, а следовательно, уже при небольшой амплитуде эта волна, вероятно, сможет воспламенять на своем пути, с достаточно короткой задержкой, газ и за пределами полностью подготовленного к самовоспламенению кольцевого слоя. Это должно привести к тому, что зона воспламенения станет приближаться к фронту основной ударной волны, сохраняя свое движение по спирали, так как около стенок по-прежнему остаются наиболее благоприятные условия для воспламенения не только по причинам, рассмотренным выше, но теперь и за счет непрерывного набегания вращающейся ударной волны на стенку, при котором около стенок достигаются наиболее высокие температуры и давления.

В результате всего этого, повидимому, весьма скоро после возникновения первого очага самовоспламенения в кольцевом слое и начавшегося вслед за этим распространения дальнейшего воспламенения по спирали, движущаяся совместно с ним вращающаяся ударная волна должна догнать фронт впереди идущей плоской ударной волны и вызвать излом ее фронта, который в дальнейшем будет обеспечивать вполне устойчивое распространение спиновой детонации, как это теоретически показано К. И. Щелкиным и Я. Б. Зельдовичем.

Таким образом, наши дополнения к указанной теории сводятся к тому, что они обусловливают возникновение и устойчивость спина обязательным воспламенением газа, вызванным ударной волной в первую очередь в кольцевом слое около стенок трубы.

Такой вывод прежде всего хорошо согласуется с тем известным экспериментальным фактом, что детонация особенно легко возникает около любых неровностей на стенах; наличие на последних даже небольшой грязи приводит часто к значительному сокращению преддетонационного участка. Вполне понятным становится также и то, что спиновая детонация одинаково хорошо возникает и распространяется также и в трубах некруглого сечения, так как вполне очевидно, что нагрев газа около стенок за счет динамического трения не зависит от профиля трубы, и если устойчивое сохранение излома фронта ударной волны в этих условиях, повидимому, и затрудняется, то спин будет поддерживаться за счет кинетической неоднородности газовой смеси по сечению, при которой всегда обеспечивается распространение поперечной волны самовоспламенения в кольцевом слое около стенок.

Экспериментальные наблюдения показывают, что часто в первый период после своего возникновения детонация имеет спиновый характер, который затем исчезает, что также полностью вытекает из наших представлений, согласно которым любая детонация, возникающая в результате саморазгона пламени, вначале должна быть спиновой, но когда смесь далека от пределов, этот спиновый механизм воспламенения может длиться чрезвычайно короткое время. Представляется весьма вероятным, что, наоборот, в непосредственной близости от детонационных пределов реакция даже и в поперечной ударной волне будет развиваться настолько медленно, что распространяющаяся по спирали зона воспламенения так и не сможет догнать фронт основной ударной волны и вызвать ее излом. Несмотря на это, спиновая детонация может быть вполне устойчивой и шаг спина будет определяться в этом случае соотношением скоростей основной и поперечной ударных волн.

Таким образом, предположения о механизме воспламенения и горения газовой смеси во фронте ударной волны, вытекающие из опытов по изучению самовоспламенения в условиях установки адиабатического сжатия, в дополнение к газодинамическим объяснениям спина, обосновывают возникновение этого явления еще и специфическими особенностями воспламенения газа в сверхзвуковом массовом потоке, движущемся за фронтом ударной волны.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность А. С. Соколику, К. И. Щелкину и Я. Б. Зельдовичу за высказанные ими при обсуждении настоящей работы ценные замечания.

Поступило  
24 IV 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> М. А. Ривин и А. С. Соколик, ЖФХ, 8, 767 (1936). <sup>2</sup> Х. А. Ракипова, Я. К. Трошин и К. И. Щелкин, ЖТФ, 17, 1409 (1947). <sup>3</sup> К. И. Щелкин, ДАН, 47, 501 (1945). <sup>4</sup> Я. Б. Зельдович, ДАН, 52, 147 (1945). <sup>5</sup> W. Bone, R. Fraser and W. Wheeler, Phil. Trans. Roy. Soc., A 235, 29 (1935). <sup>6</sup> Я. Б. Зельдович, Теория горения и детонации газов, 1944. <sup>7</sup> М. А. Ривин, ДАН, 67, 875 (1949).