

**О ПРЕДЕЛАХ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ МЕТАНА С КИСЛОРОДОМ,
РАЗБАВЛЕННЫХ АРГОНОМ ИЛИ ГЕЛИЕМ**

А. А. Борисов, В. П. Козенко, С. М. Когарко

(Москва)

К настоящему времени изучение вопроса о пределах распространения стационарной детонации в газах ни теоретически, ни экспериментально полностью не завершено. Наиболее подробно вопрос о пределах детонации был рассмотрен Я. Б. Зельдовичем [1] в рамках предложенной им гидродинамической модели детонации.

По теории Я. Б. Зельдовича предел детонации объясняется тепловыми потерями из зоны реакции непосредственно в стенки трубы. Под тепловыми потерями понимаются как прямые потери тепла теплоотдачи от нагретого в ударной волне газа, так и уменьшение скорости волны за счет трения газового потока о стенки трубы. Эта теория пределов детонации не получила дальнейшего развития и не была достаточно надежно проверена экспериментально.

Возможно, это связано с тем, что детонация на пределе всегда имеет четко выраженный периодический спиновый характер и не может рассматриваться как классическая одномерная детонационная волна, для которой была развита теория пределов Я. Б. Зельдовичем. Следует отметить, что в работе [2] впервые была сделана попытка качественно связать пределы детонации с явлением спиновой детонации, используя модель К. И. Щелкина [3].

В связи с тем, что периодичное явление спина, как показывает большое количество опытов с различными смесями, оказывается необходимым условием стационарности детонационной волны на пределе, можно более формально (чем в теории Я. Б. Зельдовича) подойти к вопросу о нахождении пределов детонации, принимая за основу строгую периодичность и стационарность распространения спиновой детонации.

Если принять модель спиновой детонации, предложенную Б. В. Войцеховским [4], то тогда, предположив, что поперечная детонационная волна может стационарно распространяться по газу в зоне между ударным фронтом и зоной воспламенения только в том случае, когда за полный ее оборот по трубе фронт воспламенения сдвинется на расстояние не меньшее, чем размер зоны несгоревшего газа, получим выражение для предельного диаметра

$$\pi d \operatorname{ctg} \alpha \geq \tau(D - w), \quad (1)$$

здесь d — диаметр трубы; D — скорость волны; w — скорость газа за ударной волной; α — угол между осью трубы и следом спирали спина; τ — задержка воспламенения.

Выражение (1), в сущности, идентично условию, полученному ранее

К. И. Щелкиным [3], и отличается от него только численным коэффициентом и, может быть, несколькими иными рассуждениями, которые были использованы при его выводе. Следует, правда, отметить, что условие К. И. Щелкина было получено для плоской волны, тогда как движение газа в случае спиновой детонации трехмерно и максимальная задержка воспламенения за волной должна быть больше в этом случае, чем за плоской волной, распространяющейся с той же скоростью. Последнее связано с тем, что ударный фронт наклонен по отношению к направлению движения [4, 5].

Условие стационарности, безусловно, не означает, что предел детонации не связан с потерями тепла. Все рассуждения о замедлении волны и растягивании зоны реакции при наличии теплопотерь остаются в силе и для трехмерной спиновой волны с той лишь разницей, что теперь зона реакции на пределе детонации не может расти до бесконечности, а ее размер ограничен условием периодичности процесса.

Наличие сильных гидродинамических разрывов за фронтом ударной волны, ведущей спиновую детонацию, и неоднородность течения приводят к тому, что в зоне детонационной волны, кроме обычных потерь на теплоотдачу и трение, необходимо учитывать также и газодинамическое охлаждение волнами разрежения области сжатого непрореагировавшего газа, которое не учитывается в одномерной модели из-за того, что там волны разрежения не могут проникнуть в зону реакции через точку Жуге.

Кроме указанных выше потерь следует учитывать расход энергии излучения волн сжатия конечной амплитуды из зоны реакции в область сгоревшего газа и на кинетическую энергию поперечного движения газа внутри зоны детонационной волны.

Все же, несмотря на указанную сложность явлений, имеющих место в зоне детонационной волны на пределе ее распространения, соотношение¹ (1) качественно и в некоторой степени даже количественно описывает характеристики детонационной волны на пределе ее распространения. В настоящей статье приведены некоторые экспериментальные результаты, которые в какой-то мере служат подтверждением справедливости предложенного критерия (1).

Используя экспериментальные зависимости задержек воспламенения от температуры и давления [7] был вычислен предельный диаметр детонации в этих смесях с использованием экспериментально определенных скоростей детонации [8].

Для стехиометрической смеси метана с воздухом было получено значение предельного диаметра — 9 см (экспериментально определено, что детонация распространяется в трубе диаметром 30,5 см и не распространяется в трубе диаметром 5 см). Для предельных смесей в трубе диаметром 30,5 см (6,5 и 13,5% метана в воздухе со скоростями детонации 1447 и 1505 м/сек соответственно) теоретические предельные диаметры оказались 38—40 см, что можно считать очень хорошим согласием, если учесть ошибку в определении скорости детонации и неточность измерения задержки воспламенения. Для стехиометрической смеси метана с кислородом при начальном давлении 25 мм рт. ст. экспериментальный предельный диаметр равняется 6,5 см; теоретический,

¹ Вследствие того, что задержка воспламенения подвержена значительным флуктуациям, то даже в условиях однородного нагрева ударной волной воспламенение происходит неоднородно [6], поэтому процесс может быть стационарным только при

$$\pi d \operatorname{ctg} \alpha > \tau(D-w).$$

с учетом того, что фронт ударной волны в том месте, где температура за ним минимальна, наклонен относительно оси трубы на 12° [5], оказался равным 3 см.

По-видимому, такое близкое соответствие измеренных и рассчитанных предельных диаметров может быть истолковано как свидетельство незначительной роли теплотеря на пределе распространения стационарной спиновой детонации. Однако, как будет показано ниже, различие в результатах, полученных при разбавлении стехиометрической смеси метана с кислородом, аргоном и гелием, не дает оснований считать этот вывод твердо установленным.

Скорость спиновой детонации в трубе диаметром 65 мм

Состав	Давление, мм рт.ст.	Скорость, м/сек
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	25	1900
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + \text{Ar}$	13	1770
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 2\text{Ar}$	25	1720
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 3\text{Ar}$	50	1610
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7\text{Ar}$	165	1465
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + \text{He}$	25	2125
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 2\text{He}$	55	2275

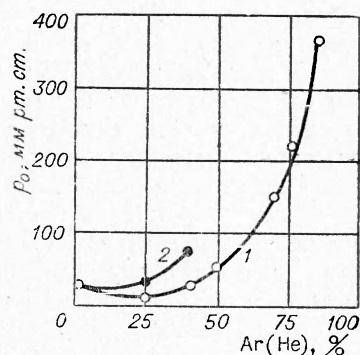
При экспериментальном определении пределов распространения спиновой детонации в стехиометрической смеси метана с кислородом, разбавленной инертными одноатомными газами — аргоном и гелием — было обнаружено весьма интересное явление.

Опыты проводились в гладкой медной трубе с внутренним диаметром 65 мм и общей длиной 4,5 м. Детонация инициировалась подрывом небольшого объема ($50\text{--}100\text{ см}^3$) стехиометрической смеси метана с кислородом при начальном давлении 1 атм. Для контроля стационарности распространения и наличия «спина» применялась следовая методика с закопченными сажей стенками [5, 9]. Кроме того, проводилось измерение скорости распространения детонации ионизационными датчиками, электроды которых были выполнены в виде колец, что позволило на малой базе (50 мм) получать точные значения скорости. Скорость измерялась в двух точках на расстоянии 3 и 4 м от инициатора (см. таблицу).

В результате проведенных экспериментов была определена зависимость предельного давления распространения спиновой детонации от степени разбавления смеси метана с кислородом, аргоном или гелием (см. рисунок).

Казалось бы, несколько неожиданно снижение предельного давления спиновой детонации примерно в два раза при разбавлении смеси 25% аргона. Используя условие стационарности (1), можно дать следующее объяснение этому факту.

Наиболее чувствительным параметром, определяющим предел детонации, является задержка воспламенения, которая экспоненциально зависит от температуры. Если по скорости детонации на пределе провести расчет температуры за плоской ударной волной в непрореагировавших смесях $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ и $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + \text{Ar}(\text{He})$, то получим, что температура в случае разбавленной смеси на 35° выше (1380 и 1415°K). Это, по-видимому, приводит к уменьшению задержки воспламенения в



Зависимость предельного давления стационарной спиновой детонации от степени разбавления смеси инертными газами в трубе диаметром 65 мм:

1 — аргон; 2 — гелий.

зоне за ударной волной, за счет чего и может произойти расширение предела распространения спиновой детонации по давлению.

Обращает внимание на себя и тот факт, что предел детонации по давлению у смесей, разбавленных гелием, выше, чем у смесей, разбавленных аргоном. Температуры газа за ударной волной в обеих смесях приблизительно одинаковы, $\gamma = c_p/c_v$ у них одно и то же, а числа Маха волны в пределах ошибки эксперимента совпадают. Этот факт нельзя объяснить различием в ширине зоны индукции, так как, не смотря на рост скорости газа с уменьшением общего молекулярного веса смеси, произведение $\tau(D - w)$ не может увеличиться в два раза при замене в смеси аргона на гелий, к тому же задержка воспламенения при этом, по-видимому, должна сократиться [10].

Различие в результатах для смесей метана с кислородом, разбавленных аргоном или гелием, можно объяснить влиянием потерь энергии на предельные характеристики волны.

К сожалению, пока нельзя сказать, какие из потерь (теплоотдача и трение или потери, связанные с наличием контактных разрывов, ударных волн, волн разрежения в зоне детонационной волны, а также потери, связанные с излучением волн сжатия из зоны реакции) играют основную роль, так как и потери теплопроводностью и газодинамические потери одновременно возрастают при уменьшении среднего молекулярного веса смеси.

*Поступила в редакцию
21/1 1967*

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. Теория детонации. Гостехиздат, 1955.
2. С. М. Когарко, Я. Б. Зельдович. Докл. АН СССР, 1948, 63, 5.
3. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения, М., Изд-во АН СССР, 1963.
4. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчинян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
5. А. А. Борисов, С. М. Когарко. Докл. АН СССР, 1963, 149, 3.
6. С. Г. Зайцев, Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР, 1958, 122, 6.
7. А. А. Борисов, С. М. Когарко, А. В. Любимов. Докл. АН СССР, 1963, 149, 4.
8. С. М. Когарко. Канд. дисс. ИХФ АН СССР, 1952.
9. Я. К. Трошин, Ю. Н. Денисов. Докл. АН СССР, 1959, 125, 1.
10. В. В. Воеводский, Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР, 1965, 161, 5.