

4. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1968, 182, 5.
5. С. А. Лесняк, Я. К. Трошин. ФГВ, 1970, 6, 4.
6. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1968, 183, 3.
7. К. К. Папок, Н. А. Рагозин. Технический словарь-справочник по топливу и маслам. М., Гостоптехиздат, 1963.
8. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.
9. Г. Майрлс. В сб. Ударные трубы. Под ред. Х. А. Рахматуллина. М., ИЛ, 1962.
10. R. A. Hartunian, A. L. Russo. J. of the Acrospase Sciences, 1960, 27, 8.
11. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1969.
12. В. С. Авдеевский, В. Н. Калашник. Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1967, 5.
13. В. Н. Крюков, В. П. Солнцев. В сб. Тепло- и массоперенос. Т. 1, ч. 1. Минск, 1972.
14. А. А. Бузуков. ПМТФ, 1963, 2.
15. Нукияма, Таназава. В сб. Процессы горения. Под. ред. Б. Льюиса, Р. Н. Пиза и Х. С. Тейлора. М., Физматгиз, 1961.
16. А. А. Борисов, С. М. Когарко, А. В. Любимов. Докл. АН СССР, 1965, 164, 1.
17. А. И. Сербинов. Докл. АН СССР, 1959, 129, 3.

УДК 662.215.1

ДЕТОНАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НЕ СМЕШАННЫХ ФАЗ

И. Н. Зверев, В. М. Гендугов, Н. И. Зверев

(Москва)

Экспериментальное исследование детонации гетерогенных систем в трубах, когда топливо и окислитель находятся в разных фазах и заранее не смешаны, описано в [1] и в дальнейшем привлекало широкий интерес исследователей, например [2—5]. Эксперименты показали сложный неоднородный и нестационарный характер этого явления. В дальнейшем [6, 7] были построены различные теоретические модели процесса, основанные на одномерной постановке задачи. В работе [8] предложена двумерная модель при отсутствии вторичных ударных волн.

В настоящей работе предлагается неоднородная нестационарная модель возникновения и развития детонации. Приведем основные результаты известных экспериментальных исследований. Эксперименты [2] проводились в трубах квадратного поперечного сечения 20×20 мм. На одну или две противоположные стенки трубы наносился тонкий слой топлива (различные жидкие смазочные масла). Труба заполнялась газообразным окислителем: чистым воздухом, воздухом, обогащенным кислородом и чистым кислородом. Иницирование детонации проводилось у одного из концов трубы. Было установлено, что в отличие от гомогенных газовых смесей, где в непосредственной близости от сильного источника иницирования возникает пересжатая детонация, в изучаемых системах при иницировании возникает ускоряющееся горение, переходящее затем в детонацию.

На моментальных фотографиях [9] наблюдается сложная картина течения. Впереди идет головная ударная волна. Воспламенение топлива происходит на расстоянии, примерно равном поперечному размеру трубы от головной УВ в тонком пристеночном слое. По мере удаления от головной УВ зона горения незначительно отходит от стенок и утолщается. За головной УВ наблюдаются вторичные ударные волны дугообразной конфигурации, догоняющие головные. В местах возникновения вторичных УВ, вблизи стенок трубы происходят поперечные колебания продуктов горения.

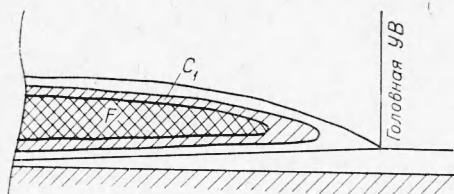


Рис. 1.

Теневые покадровые фотографии [10] выявляют периодичный режим распространения детонации. Как отмечается в работах [9, 11], вторичные УВ выступают в роли механизма, передающего энергию головной УВ от зоны горения, однако, природа и механизм первых неясны.

Для описания нестационарной неоднородной модели детонации гетерогенных систем предварительно не смешанных фаз рассмотрим для определенности возникновение и распространение ее в трубе прямоугольного сечения, заполненной газообразным окислителем, на одну из стенок которой нанесен тонкий слой топлива толщиной, необходимой для распространения детонации. Иницирование происходит плоской ударной волной, распространяющейся по окислителю вдоль оси трубы. Она сжимает, разогревает и приводит в движение газ. За ней у стенки трубы образуется пограничный слой. От нагретого газа тепло передается топливу, которое начинает интенсивно испаряться в пограничный слой, образуя с окислителем горючую смесь. Пары топлива накапливаются в пограничном слое и образуется зона возможного горения C_1 , в которой топливо с окислителем находится в концентрационных пределах горения, и зона возможной детонации F_1 . Зона F_1 заключена в зоне C_1 , так как концентрационные пределы горения шире таких пределов детонации (рис. 1). Эти зоны расширяются внутрь трубы с ростом пограничного слоя. В области C_1 , на некотором расстоянии от головной УВ, характеризуемом временем задержки воспламенения, начинается горение, которое порождает волны сжатия, распространяющиеся вверх и вниз по потоку.

В результате случайных неоднородностей потока волны сжатия взаимодействуют друг с другом и, отражаясь от стенок трубы, создают градиенты давления и зоны повышенной температуры, достаточные для иницирования детонации в области F_1 . Место и время возникновения первой детонации носит случайный характер, но появление самого взрыва предопределено развитием процесса. Возникшая в зоне F_1 детонация вне ее вырождается во вторичную ударную волну (рис. 2, а). Эта ударная волна достигает противоположной (верхней) стенки, отражается от нее и снова падает на нижнюю стенку (рис. 2, б). За это время в пограничный слой на нижней стенке между зоной продуктов детонации P и головной УВ испаряется топливо и образуются новые зоны возможного горения C_2 и возможной детонации F_2 . Детонация в зоне F_2 возникает, если падающая на нее отраженная вторичная УВ имеет интенсивность больше некоторой предельной (минимальной) интенсивности, необходимой для иницирования детонации. Вновь образованная в результате детонации в F_2 вторичная УВ после отражения от верхней стенки падает

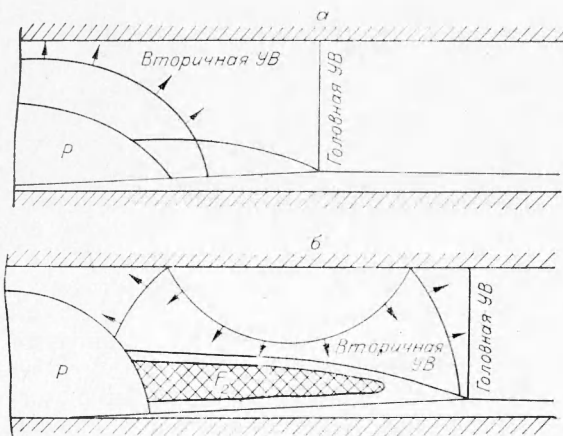


Рис. 2.

на пограничный слой нижней стенки и вызывает детонацию в следующей вновь приготовленной области F_3 . Таким образом, процесс образования вторичных УВ, начиная со второй, носит вынужденный, повторяющийся характер.

Вторичная УВ, распространяясь вверх по потоку, догоняет и взаимодействует с головной УВ. В результате взаимодействия в первый момент интенсивность последней скачком увеличивается, а затем следующее за фронтом вторичной УВ разрежение ослабляет головную волну. В период между двумя последовательными взаимодействиями интенсивность головной волны ослабляется также за счет оттока тепла в стенки и трения газа о стенки.

В стадии развития процесса вторичные УВ сообщают головной волне энергию большую, чем потери последней за период между взаимодействиями, в результате чего последняя ускоряется. С увеличением ее скорости испарение топлива со стенок увеличивается, время задержки самовоспламенения уменьшается и в зонах возможного горения C_n может начаться горение до падения на нее вторичной УВ $_{n-1}$. Тем не менее в силу конечности скорости реакции горения в зоне C_n к моменту падения на нее этой волны будет существовать зона возможной детонации F_n . Отметим, что волны сжатия, образующиеся в результате горения в зоне C_n , догоняют и усиливают головную волну.

Рассмотрим влияние потока на головную УВ за время между двумя последовательными взаимодействиями головной УВ со вторичными УВ $_{n-1}$ и УВ $_n$. Для этого выделим основные факторы, оказывающие влияние на головную волну: 1) влияние вторичной УВ $_{n-1}$ и следующего за ней разрежения; 2) влияние пограничных слоев всех стенок за счет трения газа о стенки, теплоток в стенки и выделения тепла в результате горения в зоне C_n ; 3) влияние потока, расположенного вниз по течению относительно зоны C_n , за счет трения газа о стенки и догорания продуктов детонации. Заметим, что влияние последнего фактора трудно оценить ввиду крайне сложной структуры течения в зоне P . Однако качественно это влияние суммарно можно представить, как влияние поршня,двигающегося в трубу и поддерживающего некоторую минимальную скорость головной волны.

Характер распространения процесса в среднем за период определяется соотношением потерь и поступлений энергии к головной волне за счет влияния первого и второго факторов. При развитии детонации, как описывалось выше, т. е. при относительно малых скоростях головной УВ, поступления энергии преобладают над потерями, и головная волна ускоряется в среднем за период. С ускорением головной УВ рост потерь ее энергии за период происходит быстрее возрастания поступлений энергии. Таким образом, через некоторое время после возникновения детонация выходит на конечный самоподдерживающийся режим распространения со скоростью головной УВ, постоянной в среднем за период, который характеризуется равенством потерь и поступлений энергии к волне. Как указывалось, возникновение первой детонации происходит в результате случайной неоднородности потока. В случае, когда первое возникновение детонации задерживается, в пограничный слой испаряется такое количество топлива, что образующаяся в итоге вторичная УВ настолько сильна, что после взаимодействия ее с головной последняя приобретает скорость, большую, чем скорость ее конечного, самоподдерживающегося режима распространения. Далее, развитие процесса, как и в описанном выше случае, носит вынужденный характер. Так как при скорости головной волны, большей, чем скорость ее в конечном режиме, результирующее влияние течения на нее за период отрицательно, то головная УВ замедляется в среднем за период. Замедление происходит до тех пор, пока детонация не выйдет на свой конечный самоподдерживающийся режим.

В зависимости от скорости химических реакций в пограничном слое возможны три типа распространения детонации.

Первый тип характеризуется столь медленными химическими реакциями, что в зонах S_n не происходит горения до инициирования детонации в зонах F_n . Возникающие в результате детонации вторичные УВ взаимодействуют с головными и инициируют новые детонационные взрывы, как описано выше, в зонах F_n , в которых горения нет.

Развитие и конечный самоподдерживающийся режим в этом случае (детонация-I) определяется соотношением потерь и поступлений энергии к головной УВ за период за счет вторичной УВ и следующего за ними разрежения, потока тепла в стенки и трения в пограничном слое между головной волной и местом возникновения детонации.

Распространение детонации-I носит пульсирующий характер, за головными волнами периодически возникают вторичные волны.

При втором типе распространения детонации скорость химических реакций такова, что горение в зонах S_n начинается до падения на нее вторичной УВ_{n-1}, однако к моменту падения смесь не успевает полностью сгореть. Количество смеси, способной детонировать, уменьшается за счет горения, но остается таким, что детонация в области, занятой этой смесью, возможна. Под воздействием вторичной волны в этих областях смесь детонирует и образуются новые волны, инициирующие новые детонационные взрывы и взаимодействующие с головной волной.

Развитие и конечный самоподдерживающийся режим распространения детонации-II определяется соотношением потерь и поступлений энергии к головной волне за период за счет вторичной УВ и следующего за ними разрежения, потока тепла в стенки и трения в пограничном слое, а также выделения тепла при горении в S_n . Распространение детонации-II носит пульсирующий характер, за головной волной периодически возникают вторичные УВ.

Третьему типу детонации соответствуют столь быстрые химические реакции в пограничном слое за головной УВ, что зоны возможной детонации F_n не образуются. При этом типе детонации вторичные УВ вырождаются. Развитие и конечный самоподдерживающийся режим распространения детонации-III определяются соотношением потерь и поступлений энергии к головной волне за счет потока тепла в стенки, трения и выделения тепла в результате горения в пограничном слое. Детонация-III в конечном режиме распространяется с постоянной скоростью, расчет ее параметров приведен в [8]. Детонации первого и третьего типа являются предельными случаями существования детонации гетерогенных систем предварительно не смешанных враз.

В случае, когда топливо нанесено на две противоположные стенки трубы, процесс образования зон возможного горения и возможной детонации на каждой стенке аналогичен описанному выше. В зависимости от того, когда произойдет первое случайное возникновение детонации на каждой из стенок, возможны две различные схемы инициирования последующих детонационных взрывов в конечном режиме.

Первая схема такова, что вторичная волна, образованная в результате детонации в зоне F_n на нижней стенке, достигает верхней стенки и инициирует в зоне возможной детонации F'_n , образованной в пограничном слое верхней стенки. Образованная в этом случае в зоне F'_n вторичная УВ достигает нижней стенки и инициирует в образовавшейся зоне F_{n+1} новую детонацию. Таким образом, вторичная волна образуется поочередно на каждой из стенок трубы, смоченных топливом, в «шахматном» порядке. Головная волна испытывает взаимодействие со вторичной примерно в два раза чаще, чем при одной смоченной топливом стенке.

По второй схеме возникновения детонаций в зонах F_n и F'_n происходит одновременно. Образованные вторичные волны, достигая противоположных стенок, инициируют новые детонационные взрывы, если к моменту их падения успеет образоваться зона возможной детонации. Далее вторичные волны образуются одновременно на каждой из смоченных стенок, новые детонационные взрывы инициируются вторичными волнами, образованными у противоположных стенок. Головная УВ испытывает взаимодействия со вторичной примерно в четыре раза чаще, чем при одной смоченной стенке.

Первая схема реализуется, когда происходит только одно первое случайное возникновение детонации на одной из стенок в зоне F_1 , а на противоположной стенке детонация в зоне F'_1 инициируется вторичной УВ₁. Ко второй схеме приводит случай, когда случайное возникновение детонации происходит на обеих стенках (не обязательно одновременно). В этом случае на образование зоны возможной детонации, в которой инициирование детонации производит вторичная УВ, возникшая позднее, затрачивается больше времени, что приводит к увеличению размеров этой зоны относительно той, в которой инициирует детонацию вторичная УВ, возникшая первой. Поскольку при детонации в большей зоне выделяется больше энергии, то интенсивность волны, образованной в результате детонации в большей зоне, будет большей. Поэтому все вторичные волны, образованные в результате последовательности детонационных взрывов, начатой более поздним случайным инициированием, будут иметь скорость, большую, чем скорость соответствующих вторичных УВ, которым положило начало первое инициирование. Такое различие в скоростях уменьшает различие во времени между соответствующими инициированиями детонации, и с истечением некоторого времени образование вторичных УВ будет происходить одновременно на противоположных стенках. Возможность существования двух стенок инициирования вторичных волн при двух смоченных топливом стенках подтверждается экспериментально [10]. Режим распространения детонации в трубе с двумя смоченными топливом стенками определяется, как и при одной смоченной стенке, потерями и поступлением энергии к головной волне за период. В трубе с двумя смоченными стенками можно рассмотреть распространение детонации трех типов аналогично описанному выше.

Предложенная модель детонации гетерогенных систем предварительно не смешанных фаз позволяет объяснить некоторые экспериментальные результаты. Для определенности сначала рассмотрим детонацию в трубах с одной смоченной стенкой. Ее развитие во многом лимитируется количеством топлива, испаряемого в пограничный слой, и наличием достаточно сильного инициатора детонации. Инициировать детонацию можно только ударной волной такой интенсивности, при которой обеспечивается испарение топлива в пограничный слой, необходимого для образования зон C_n и F_n , т. е. существует минимальная интенсивность ударной волны, способной инициировать детонацию.

Известно, что детонация может распространяться в объеме смеси, если поперечный размер этого объема не меньше критического. Это накладывает определенные условия на размер зон F_n и, следовательно, на толщину слоя топлива, нанесенного на стенку, который может быть настолько тонким, что после его полного испарения в пограничный слой и перемешивания с окислителем поперечный размер зоны возможной детонации будет меньше критического и детонация не возникнет. Значит, существует такая предельная (минимальная) толщина слоя топлива h_0 , что при меньшей толщине детонация невозможна.

Вследствие конечной скорости испарения топлива за время с начала образования зоны F_n до инициирования в ней детонации с поверхности стенки трубы успевает испариться лишь верхняя часть слоя топ-

лива толщиной h_1 . Если толщина нанесенного на стенку топлива меньше h_1 , но больше h_0 , то количество топлива, испаренного в пограничный слой, размеры зон F_n , интенсивность образующихся вторичных УВ_n, а следовательно, и режим распространения детонации зависят от толщины слоя топлива (h). При толщине слоя топлива, большей h_1 , режим распространения детонации не зависит от толщины слоя топлива, нанесенного на стенку.

Чем больше путь, пройденный вторичной УВ_n от места ее возникновения до зоны F_{n+1} , в которой она инициирует детонацию, тем меньше ее интенсивность при падении на зону F_{n+1} , следовательно, при увеличении ширины трубы интенсивность падающей на зону F_{n+1} вторичной УВ_n уменьшается и может стать меньше, чем минимальная интенсивность, необходимая для инициирования детонации. Значит, существует верхний предел ширины трубы, и если ширина трубы больше его, то при прочих одинаковых условиях детонация невозможна.

Заметим, что с уменьшением расстояния между верхней и нижней стенками вторичная УВ_n, отразившись от верхней стенки, может достигнуть нижней стенки раньше, чем там успеет образоваться зона возможной детонации. Тогда инициирование детонации произойдет после $(2k+1)$ -го отражения вторичной УВ, когда на нижней стенке образуется зона F_{n+1} . Здесь распространение детонации идет аналогично описанному выше случаю, только период будет определяться не однократным, а $(2k+1)$ -кратным отражением вторичной УВ.

Какие параметры при соблюдении необходимых условий влияют на конечный режим распространения детонации? Как указывалось выше, при толщине слоя топлива на стенке, большей h_0 и меньшей h_1 , режим детонации зависит от h . С ростом h в этих пределах увеличивается количество испаряющегося в пограничный слой топлива, что ведет к росту интенсивности вторичных УВ и скорости конечного режима распространения детонации. При увеличении ширины трубы выделяемая в потоке за головной волной энергия распределяется на больший объем и детонация замедляется. Следовательно конечный режим распространения детонации зависит от ширины трубы. При фиксированных ширине трубы и толщине слоя топлива режим распространения детонации определяется физико-химическими свойствами топлива и окислителя, от которых зависят интенсивность испарения, размеры зон F_n и интенсивность вторичных УВ_n, образовавшихся при детонации в F_n .

Рассмотрим те различия, которые вносит в свойства детонации наличие слоя топлива на двух противоположных стенках трубы. Вторичные УВ_n инициируют детонацию в зонах F'_n на противоположных стенках, что почти вдвое уменьшает расстояние, проходимое этими волнами от места возникновения до зоны F'_n , относительно случая с одной смоченной стенкой. Таким образом, при прочих одинаковых условиях интенсивность вторичной УВ к моменту падения ее на зону будет больше при двух смоченных топливом стенках. В результате этого верхняя предельная ширина трубы, ограничивающая возможность детонации для этого случая, больше. Этим объясняется то, что в экспериментах [9] при некоторых фиксированных толщинах трубы и слоя топлива распространение детонации возможно при двух смоченных топливом стенках, но невозможно при одной. Головная волна испытывает взаимодействие со вторичной примерно в два или четыре раза чаще, вследствие чего детонация в конечном режиме в среднем за период распространяется быстрее.

Таким образом, предложенная модель отражает неоднородность и нестационарность процессов при детонации гетерогенных систем предельно смешанных фаз. Выявлена природа и объяснен механизм образования вторичных УВ, играющих важную роль в установлении режима распространения детонации и инициировании новых вторичных

волн. Прослежен процесс развития детонации от первого случайного инициирования до конечного самоподдерживающегося режима распространения. Обоснована возможность существования трех типов детонации.

Поступила в редакцию
30/IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Гордеев, В. Ф. Комов и др. Промышленная энергетика, 1964, **19**, 12.
2. В. Е. Гордеев, В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1965, **160**, 4.
3. Рэгланд. РТК, 1970, **7**, 3.
4. Regland, C. F. Garcia. Combustion and Flame, 1972, 1.
5. M. Sichel, C. S. Rav, J. Nickolls. A simple theory for the propagation of film detonation, Ann Arbor, Michigan, 1970.
6. Г. П. Черепанов. ПМТФ, 1965, 4.
7. С. С. Рыбанин. Докл. АН СССР, 1966, **168**, 4.
8. В. М. Гендугов. ФГВ, 1972, **8**, 4.
9. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1965, **162**, 1.
10. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, **175**, 1.
11. Рэгланд, Николлс. РТК, 1969, **7**, 5.

УДК 534.222+533.6.011.72

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЫХ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ НА ДЕТОНАЦИЮ ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко
(Москва)

Исследование влияния взвешенных твердых частиц на характеристики детонационных волн в газах представляет интерес для изменения условий протекания детонации (подавление детонации добавлением инертных частиц [1]) и для получения ускоренных потоков взвешенных нагретых частиц для ряда практических применений (например, для нанесения покрытий на твердую поверхность [2, 3]). В отличие от детонационных волн в газах в таких системах энергия и импульс газовой фазы могут передаваться не только к стенке, но и в конденсированную среду. Эти потери могут уменьшить скорость волны, расширить зону реакции и изменить пределы детонации. В настоящей работе предлагается методика расчета скорости детонации горючей газовой смеси при добавлении инертных твердых частиц. Количественно оценивается концентрация взвешенных частиц, необходимая для изменения скорости детонации, ширина зоны реакции, оценивается нагрев и ускорение частиц в пределах зоны реакции.

Поскольку структура фронта волны, скорость ее распространения и предел детонации в основном определяются кинетикой тепловыделения и теплоотвода в зоне до плоскости Чемпена — Жуге, то все расчеты в работе выполнены именно в этой зоне.

Постановка задачи

Рассмотрим горючую газовую смесь, в которой однородно по объему распределены инертные твердые частицы одинакового размера. По смеси движется одномерная плоская детонационная волна со скоростью