

32. В. И. Манжалей, В. А. Субботин. ФГВ, 1976, 12, 6.
 33. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Наука, 1963.
 34. N. Manson. Compt. Rendus, 1946, 222, 46.
 35. J. A. Fay. J. Chem. Phys., 1952, 20, 6.
 36. Chu Boa — Teh. Proceeding of Symposium Aerothermochem, 1955. Evanston, 1956.
 37. Н. Н. Смирнов. Вестн. МГУ, 1980, 2.
 38. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/Ред. В. П. Глушко, Т. II. М.: Изд-во АН СССР, 1962.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В КОНИЧЕСКИХ ТРУБАХ

С. А. Губин, С. М. Когарко, В. Н. Михалкин
(Москва)

Детонация горючих газовых смесей находит все более широкое применение в различных технологических процессах. Встречаются случаи, когда необходимо перепустить детонационную волну из трубы малого диаметра в трубу большого диаметра. Обычно такой перепуск осуществляется через конические трубки. Переход детонационной волны из трубы постоянного сечения в коническую сопровождается ее ослаблением или полным разрушением. На величину ослабления детонационной волны при таком переходе влияют угол раствора и диаметр отверстия при вершине конической трубы [1]. Для смесей одинакового состава и начального давления условия перехода детонационной волны сохраняются в установках с различными геометрическими размерами, если остается постоянным отношение $l \frac{\operatorname{tg}(\alpha/2)}{r}$, где l — ширина зоны реакции; α , r — угол раствора и радиус входного отверстия конической трубы.

В случае расходящейся детонационной волны происходит постоянное увеличение поверхности фронта детонационной волны, а следовательно, изменение внутренней структуры волны.

Изучение структуры фронта детонационной волны позволило установить, что детонационная волна представляет собой трехмерный газодинамический процесс [2—6], в котором главную роль в распространении самоподдерживающейся детонации играют столкновения поперечных волн. В работе [7] экспериментально исследовался механизм возникновения дополнительных поперечных волн во фронте расходящейся детонационной волны в плоском расширяющемся канале.

В [8] изучалось поведение ячеистой структуры, полученной по отпечаткам на боковой поверхности плоского расширяющегося канала, для водородно-кислородной стехиометрической смеси, разбавленной различными количествами аргона. В зависимости от разбавления аргоном смеси и угла раствора расширяющейся секции обнаружено, что при распространении расходящейся цилиндрической волны происходит ее ослабление с частичным исчезновением поперечных волн и последующее восстановление волны на некотором расстоянии. Средний размер неоднородности или поперечный размер ячейки зависит от средней скорости волны, температуры сжатого газа за пей и кинетики реакции [9—11]. Поэтому размер ячейки многофронтной детонации — важная характеристика структуры детонационной волны.

В связи с перечисленными выше фактами значительный научный интерес представляет изучение поведения многофронтной газовой детонации в конических трубах.

В настоящей работе изучались следующие вопросы:

- 1) изменение структуры многофронтной газовой детонации при переходе из трубы постоянного сечения в коническую трубу;

- 2) режимы, при которых происходит перепуск детонации через коническую трубу;
- 3) влияние состава горючей смеси на структуру многофронтной детонационной волны и условия распространения детонации в конических трубах.

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования выполнены на установке, схема которой приведена на рис. 1. Детонационная труба 3 с внутренним диаметром 32 мм и длиной 3 м служит для получения плоской детонационной волны. Использовались сменные конические трубы 5 с углами раствора 60 и 45°. В зависимости от условий опыта к широкому торцу конической трубы 5 присоединялась труба 7 большого диаметра (148 мм), закрытая фланцем 8, или торец конической трубы закрывается фланцем 6. Детонационная труба оснащена пьезокерамическими датчиками давления 4 и ионизационными датчиками 9 для измерения средней скорости детонационной волны, электрической свечой 1 для воспламенения смеси, турбулизационной спиралью 2 для сокращения преддетонационного расстояния. В трубе 7 и в конце трубы 3 перед конической трубой 5 параллельно оси делались щелевые окна 10 и 13.

Для оптической регистрации процесса распространения детонационной волны использовался фоторегистратор ЖФР-2. В опытах скорость развертки составляла 50, 100 и 200 м/с.

Заполнение детонационной установки горючей смесью, откачка продуктов детонации осуществляется через систему вентилях 15, связанных коммуникациями с форвакуумным насосом 14 и смесителем газов 16, где заранее готовилась горючая смесь. Откачка установки и заполнение ее горючей смесью контролировались по показаниям образцового вакуумметра.

В работе исследовались водородно- и метано-кислородные смеси с различными отношениями горючего к окислителю. Компоненты смеси дозировались по образцовому манометру с ценой деления 0,04 атм/дел. Электрические сигналы регистрировались пятилучевым осциллографом С1-33, запуск которого производился через импульсный усилитель электрическим сигналом от одного из датчиков давления 4 при приходе детонационной волны к месту расположения датчика.

Изменения структуры фронта детонационной волны изучались методом торцевых следовых отпечатков [4, 6]. Для получения последних в различных сечениях конической трубы располагались гипсовые вставки 11, полученные формованием в конических трубах, где закреплялось заочеченное стекло 12. Применение вставок позволяло выделить для исследования нужное сечение по оси конической трубы. Средний размер неоднородности фронта детонационной волны рассчитывался по методике, изложенной в [4, 6].

Чтобы установить, происходит ли перепуск детонации через коническую трубу для смеси данного состава при разных начальных давлениях, проводилась фоторазвертка процесса до и после конической трубы [1]. Но она не дает возможности судить о том, происходит ли непрерывный

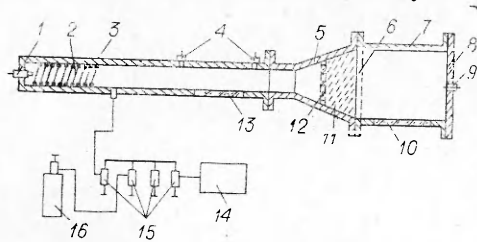


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

переход газовой детонации без разрушения или осуществляется ее разрушение с последующим восстановлением в конической трубе. С целью получения фоторазвертки выполнены опыты в стеклянных конических колбах (Эрленмейера), расположенных в широкой трубе 7 со щелевым окном 10. Использовались колбы диаметром входного отверстия 29,5 и

31,2 мм и углами раствора конической части 22 и 37° соответственно.

Сложность подготовки опытов для получения фоторазвертки детонации в стеклянных колбах и трудности, связанные с оптической регистрацией слабосветящихся продуктов детонации, ограничивают возможность использования метода фоторазвертки для изучения перепуска детонации.

Для непрерывного измерения скорости газовой детонации применялась методика реостатного датчика, которая разработана для измерения скорости детонации в конденсированных взрывчатых веществах [12, 13]. Внутри детонационной трубы по оси помещается реостатный датчик (два электрических проводника, один из которых имел большое линейное электрическое сопротивление, сопротивление другого практически равно нулю).

Детонационная волна — область достаточно высокой электрической проводимости — по мере продвижения в трубе замыкает электрические проводники датчика и приводит к уменьшению электрического сопротивления цепи. При этом скорость изменения напряжения на реостатном датчике связана со скоростью детонационной волны соотношением

$$D = 1/i_0 r_0 \cdot dU/dt,$$

где i_0 — постоянный ток, протекающий через реостатный датчик; r_0 — линейное электрическое сопротивление проводника; dU/dt — производная напряжения по времени.

Из формулы видно, что наибольшая ошибка при определении скорости детонации достигается при графическом дифференцировании сигнала. Для уменьшения такой ошибки параллельно с записью сигнала изменения напряжения на реостатном датчике проводилось электрическое дифференцирование сигнала с реостатного датчика на RC -цепочке и запись производной этого сигнала. Это позволяет более точно построить зависимость изменения скорости детонации от расстояния в конических трубах.

Использованный в опытах реостатный датчик представлял собой медный стержень диаметром 1,5 мм с натянутым на нем константовым проводником диаметром 0,015 мм и линейным электрическим сопротивлением 1500 Ом/м. Один конец проводника припаивается к медному стержню, а другой — к кабелю, по которому на проводник подавалось напряжение. Стержень электрически заземляется. Расстояние между проводником и стержнем составляло 1 мм. Рабочий ток датчика в зависимости от условий опытов устанавливался в интервале от 3,2 до 9,5 мА, а рабочее напряжение изменялось от 180 до 240 В.

Отработка метода измерения скорости детонации реостатным датчиком выполнена в трубе постоянного сечения. В опытах регистрировалась средняя скорость детонации на постоянной базе и определялась скорость с помощью реостатного датчика. Проведенные эксперименты показали хорошее согласие в определении скоростей по двум методам. Относительная ошибка в определении скорости распространения детонации в газовой смеси реостатным датчиком составляла не более 3%.

В работе измерялась скорость детонации при переходе из трубы постоянного сечения в коническую с помощью реостатного датчика, который через отверстие во фланце 6 на торце установки располагался по всей длине трубы, причем часть датчика вводилась в трубу постоянного сечения 3. Это позволяло непрерывно регистрировать скорость детонации в трубе постоянного сечения и ее изменение в конической трубе.

Результаты экспериментов

Проведенные опыты по изучению структуры многофронтной детонационной волны при ее распространении в конических трубах показывают, что характерный размер неоднородностей волны увеличивается с расстоянием по оси конической трубы, достигает своего максимального значения, а затем уменьшается.

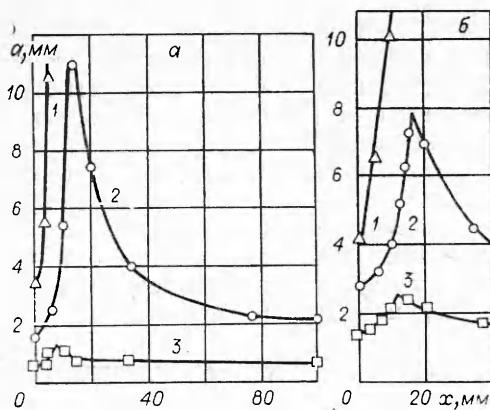


Рис. 2. Зависимости изменения размера неоднородности a по оси трубы от начала конической секции до водородно-кислородных (а) и метано-кислородных (б) смесей.

Начальное давление, атм: 1 — 0,3, 2 — 0,5, 3 — 1,0.

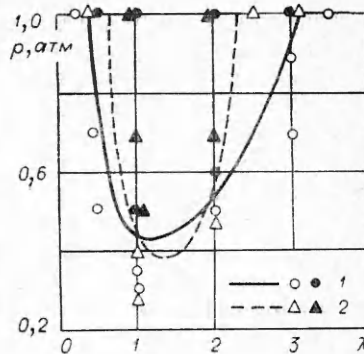


Рис. 3. Результаты передачи детонации через коническую трубу с углом раскрытия 60° для различных начальных давлений p и составов смеси λ .

1 — водородно-кислородные смеси; 2 — метано-кислородные смеси. Темные точки — детонация переходит, светлые — детонация разрушается.

С уменьшением начального давления смеси увеличивается характерный размер неоднородностей фронта волны в критическом сечении при переходе детонационной волны из трубы постоянного сечения в коническую. В экспериментах надежно фиксируются неоднородности до 10—11 мм. С увеличением размера неоднородностей более 10 мм он становится сравним с размером трубы, что затрудняет их регистрацию.

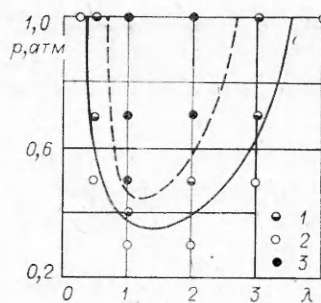
На рис. 2 приведено изменение размера неоднородности от расстояния от начала изменения поперечного сечения конической трубы. Расстояние по оси трубы, на котором размер неоднородности достигает максимального значения, увеличивается с уменьшением начального давления детонирующей смеси. Для установления связи между условиями перепуска детонационной волны и ее внутренней структурой, определяемой по торцевым отпечаткам, выполнены опыты по определению состава и начального давления горючих смесей, при которых происходит переход детонационной волны через коническую трубу. Уменьшение начального давления смеси приводит к ухудшению условий перехода детонации через коническую трубу. Для данного состава горючей смеси существует критическая величина начального давления, ниже которого детонационная волна не переходит через коническую трубу.

Результаты исследований по перепуску детонационной волны через коническую трубу для смесей с различным эквивалентным отношением горючего к окислителю показывают, что и при обогащении, и при обеднении смеси горючим происходит ухудшение условий перехода газовой детонации. На рис. 3 показаны экспериментальные результаты по перепуску детонации через коническую трубу с углом раскрытия 60° в зависимости от эквивалентного отношения и начального давления смеси.

На рис. 4 приведены данные по перепуску детонации через коническую трубу с углом раскрытия 45° для водородно-кислородных смесей в зависимости от начального давления смеси и эквивалентного отношения состава смеси. На рис. 4 выше штриховой кривой располагается область состава и начальных давлений горючих смесей, при которых всегда происходит перепуск детонации через коническую трубу без разрушения. При этом в любом сечении трубы регистрируются неоднородности во фронте волны. Переход детонационной волны через трубу с разрушением детонационной волны и последующим ее инициированием наблюдается для горючих смесей с начальным давлением и составом, заключенным в области между штриховой и сплошной кривыми на рис. 4. Перепуск де-

Рис. 4. Результаты передачи детонации через коническую трубу с углом раскрытия 45° для водородно-кислородных смесей при различных начальных давлениях.

1 — детонация переходит; 2 — детонация разрушается; 3 — детонация переходит, фиксируются неоднородности в любом сечении конической трубы.



тонационной волны через трубу не осуществляется для составов и начальных давлений горючих смесей, представленных на рис. 3, 4 ниже сплошных кривых.

Из анализа опытов с помощью фоторазвертки следует, что в некоторых случаях для данных геометрических размеров стеклянных колб при перепуске детонации происходит ее разрушение с последующим восстановлением (рис. 5).

Серия опытов по измерению скорости детонации реостатным датчиком в конических трубах также показывает, что переход детонации может осуществляться с разрушением и без разрушения. На рис. 6 приведена типичная осциллограмма одного из опытов. На луче 3 регистрируется сигнал с датчика давления, расположенного в трубе постоянного сечения на расстоянии 7 см от входного отверстия конической трубы. На луч 2 выводится сигнал с реостатного датчика, а луч 1 — запись производной изменения напряжения на реостатном датчике.

Поскольку производная напряжения сигнала с реостатного датчика пропорциональна скорости детонационной волны, то по этой записи легко видеть, что на участке датчика, введенного в цилиндрическую трубу, скорость детонации есть постоянная величина. После выхода детонационной волны из цилиндрической трубы в коническую происходит ее ослабление до ~ 1100 м/с, а через некоторое время наблюдается резкое увеличение скорости до значения, превышающего первоначальное значение, а затем выход на стационарный режим. Наблюдаемые в конце регистрации колебания вызваны отражением волны от торца и прогоранием проводника датчика.

Обсуждение результатов

Выполненные опыты по перепуску детонационной волны через конические трубы показывают, что переход детонационной волны может осуществляться двумя способами. Возможен непрерывный переход детонационной волны, сопровождаемый уменьшением скорости волны и деформацией внутренней структуры фронта. При этом в месте максимального ослабления волны наибольшее падение скорости волны не должно превышать 15% от скорости детонации в цилиндрической трубе. Другой способ осуществляется с разрушением детонационной волны и последующим ее восстановлением. При этом скорость волны падает сильнее, чем в первом случае. Происходит разрушение структуры детонационного фронта.

На факт разрушения детонационной волны и ее вторичное инициирование указывает регистрация скорости распространения волны, выполненная с помощью реостатного датчика и фоторазвертки. В опытах наблюдалось уменьшение как скорости волны ионизации до 40—50% от скорости детонации в цилиндрической трубе, так и интенсивности свечения за волной. Подобное изменение скорости волны возможно при разрушении детонационной волны. При этом реостатный датчик регистрирует скорость течения продуктов детонации, обладающих электрической проводимостью. Восстановление детонационной волны происходит за счет взрыва сжатой горючей смеси за отошедшей ударной волной. Вторичное инициирование регистрируется на фоторазвертке (см. рис. 5) и реостатным датчиком (см. рис. 6). На рис. 6 это хорошо видно по записи изменения сигнала производной напряжения (луч 1), где после уменьшения

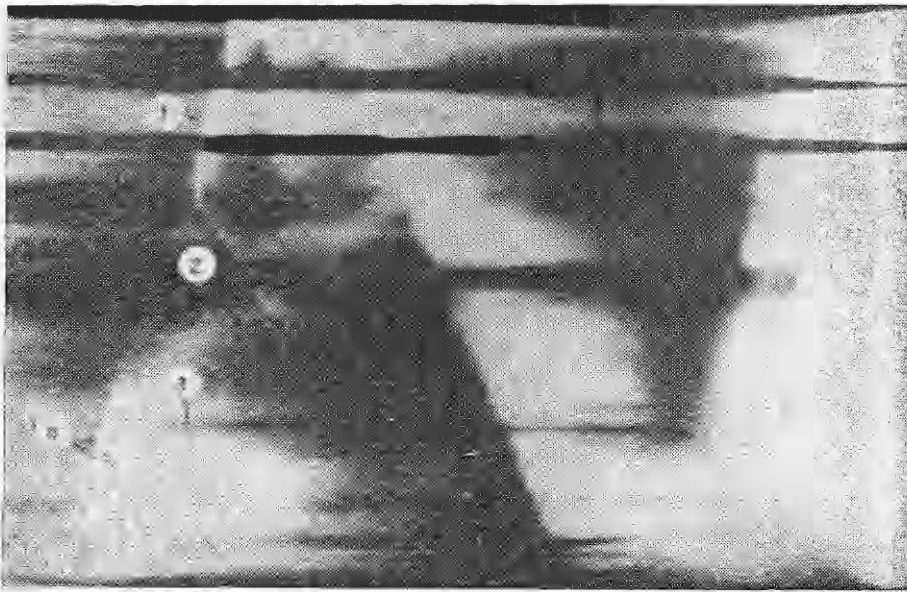


Рис. 5. Фотография фоторазвертки процесса передачи детонации через коническую стеклянную колбу для метано-кислородной смеси стехиометрического состава; диаметр цилиндрической трубки d — 31,2 мм, угол раствора конической части 22° . Скорость развертки 50 м/с.

1 — инициированная детонационная волна; 2 — детонационная волна; 3 — начало изменения сечения трубы; 4 — падающая детонационная волна.

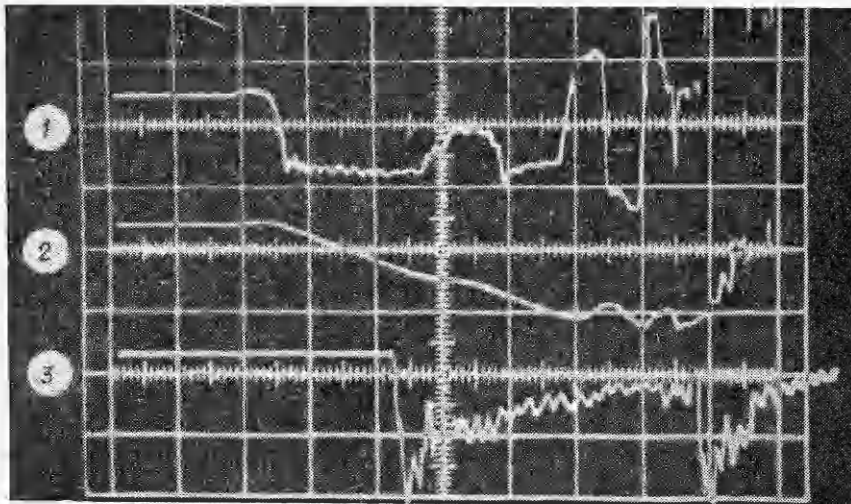


Рис. 6. Типичная осциллограмма регистрации сигнала с реостатного датчика. Скорость развертки осциллографа 50 мкс/см. Смесь метана с кислородом при стехиометрическом соотношении.

Чувствительность лучей, В/см: 1 — 0,1, 2 — 2, 3 — 0,1.

скорости волны при выходе в коническую трубу происходит резкое возрастание скорости волны до значения выше первоначального уровня на 15—20% и последующий спад сигнала до уровня, соответствующего скорости детонации в цилиндрической трубе.

Расстояние, на котором происходит вторичное инициирование детонационной волны, зависит от начального давления и состава горючей смеси, интенсивности ослабления волны в конической трубе. Если ослабление ударной волны приводит к существенному падению температуры за фронтом волны и значительному возрастанию задержки воспламенения

сжатой горючей смеси, то ее взрыв не приводит к вторичному инициированию детонационной волны. Интенсивность ударной волны, образовавшейся от взорвавшейся сжатой смеси, оказывается недостаточной для инициирования детонации в несгоревшей смеси. В этом случае перепуска детонационной волны не наблюдается.

Поступила в редакцию 2/XII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Когарко. Изв. АН СССР. ОХН, 1956, 4.
2. К. И. Шелкин. ЖЭТФ, 1959, 36, 2.
3. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. ПМТФ, 1960, 1.
4. Б. П. Волин, Я. К. Трошин и др. ПМТФ, 1960, 2.
5. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
6. К. И. Шелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
7. К. Я. Трошин. Докл. АН СССР, 1978, 240, 3.
8. R. A. Strehlow, R. J. Salm. Acta Astronautica, 1976, 3.
9. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев. ФГВ, 1976, 12, 5.
10. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев, В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1977, 13, 3.
11. В. В. Митрофанов, В. А. Субботин.— В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1977.
12. J. G. Gibson, M. L. Bowser, C. M. Mason. Rev. Sci. Instr., 1959, 30, 10.
13. A. V. Amster, P. A. Kendall et al. Rev. Sci. Instr., 1960, 31, 2.

ПЕРЕДАЧА ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ ОБРАЗЦЫ

И. М. Воскобойников, А. Ю. Долгобородов, М. Ф. Гогоуля
(Москва)

Расчет динамических давлений, передаваемых через пористые образцы, когда известны состояние в среде перед образцами и сжимаемость материалов пористых образцов, является актуальной научной и технической задачей. Ее решение, несмотря на большое число работ, посвященных определению состояния за фронтом ударных волн в пористых образцах, в общем случае вызывает затруднение, поскольку давление в среде за пористым образцом, как правило, экспериментально не определялось. В значительной мере это связано с тем, что направленные исследования передачи динамических давлений через пористые образцы проводились в ограниченном объеме для решения конкретных технических вопросов, а их результаты не получили должных обобщений.

В исследованиях ударного сжатия пористых образцов измеряемым параметром чаще всего была скорость ударной волны $D_{пор}$, характеризующая передаваемое давление только при дополнительных предположениях. Как будет показано ниже, такая информация не всегда достаточна, что делает необходимым измерение еще какого-нибудь параметра для определения давления.

Выделим случаи соотношений сжимаемости среды перед пористым образцом и материала образца: 1 — сжимаемости близки, 2 — сжимаемость среды больше, 3 — сжимаемость среды меньше. Первый случай исследован в работе [1], где обнаружено, что скорости свободной поверхности образцов различной пористости в пределах ошибки измерений совпадают, если средой перед образцом является сплошной материал образца. В работе [2] получено, что давления, передаваемые из сплошного алюминия через алюминий различной пористости в нитрометан и четыреххлористый углерод, одинаковы. Следовательно, передаваемое давление не зависит от пористости образцов (минимальная плотность образца составляла 0,1 плотности материала, а давление в среде перед образцом 20—50 ГПа).