

УДК 536.71; 537.5; 662.61

Моделирование перехода горения в детонацию в цилиндрических пузырях с негладкой границей

В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

E-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Проведено экспериментальное моделирование сжигания стехиометрической пропан-кислородной смеси для квазицилиндрических пузырей с негладкой границей с помощью поливинилхлоридных трубок с препятствиями из множественных и одиночных капель воды и шариков из полистирола и стали. Показано, что переход горения в детонацию происходит как перед препятствием, так и за ним, независимо от материала препятствия.

Ключевые слова: механизмы горения, переходные процессы, волны сжатия, режимы горения, дефлаграция, детонация.

Введение

Настоящая работа посвящена изучению процесса сжигания газов в квазицилиндрических пузырях в жидкости; рассматриваемый вопрос является важным для разработки принципиально новых тепловых генераторов и водных двигателей [1, 2]. При выполнении работ с отдельной подачей горючего газа и окислителя в воду в циклических режимах была обнаружена нестабильность взрывов в пузырях от выстрела к выстрелу. Была выдвинута следующая гипотеза: реализуется либо режим дефлаграционного горения, либо режим с переходом горения в детонацию. Иницирование зажигания в указанных работах обеспечивалось обычной автомобильной искрой. Отмеченные особенности не позволяют однозначно интерпретировать получаемые результаты для циклических режимов импульсного сжигания газов в жидкости. В связи с этим ставилась задача выявления механизмов перехода горения в детонацию в пузырях со стехиометрической пропан-кислородной газовой смесью в воде.

Задачам перехода горения в детонацию посвящено значительное число работ [3, 4]. В них исследовались различные методы ускоренного перехода горения в детонацию для экспериментальных постановок в металлических ударных трубах и специальных устройствах. Однако в этих работах не изучались возможности генерации ускоренного перехода горения в детонацию в жидкостных оболочках. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований ускоренного инициирования горения и детонации применительно к эластичным и жидкостным оболочкам; исследованы условия ускоренного инициирования детонации для стехиометрической пропан-кислородной смеси в полихлорвиниловой трубке с «препятствиями» в виде капель воды и одиночных шариков из стали и полистирола.

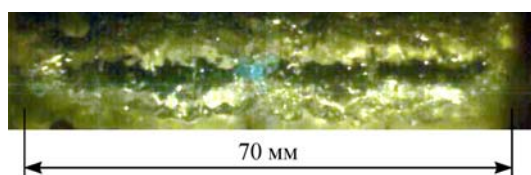


Рис. 1. Квазицилиндрический пузырь, выдуваемый из двух линейных щелей.

Постановка эксперимента

Из ранее полученных экспериментальных результатов [2] известно, что переход горения в детонацию не наблюдался в стационарно устанавливаемых гладких пузырях. Однако этот переход с последующим инициированием зажигания наблюдался в импульсно выдуваемых в воду пузырях. На рис. 1 представлена типичная фотография квазицилиндрического пузыря с газом до взрыва при импульсной инжекции в воду газов из двух линейных щелей в режиме раздельной подачи горючего газа и окислителя [2]. Из рисунка видно, что газовый пузырь, выдуваемый из линейных щелей, имеет гофрировано-шероховатую границу, которую можно интерпретировать как результат неустойчивости типа Релея–Тейлора с высотой волн на границе пузыря до 5 мм. Полученные результаты послужили основанием для постановки модельных экспериментов по выявлению роли подобных границ на процессы горения газа внутри пузырей с негладкими границами.

В качестве модели цилиндрического пузыря были выбраны прозрачные эластичные поливинилхлоридные трубки с внутренним диаметром 6–8 мм и длиной 160–200 мм. Трубка заполнялась заранее заготовленной стехиометрической смесью пропана с кислородом ($C_3H_8 + 5O_2$) и затем полностью перекрывалась со стороны подвода газа. На рис. 2 представлена постановка экспериментов в виде фотографии. Электрическое инициирование осуществлялось как слева, так и справа. Для инициирования со стороны подвода газа использовались две иглы, а в варианте, изображенном на рис. 2, использовались металлическая пробка и игла. При инициировании газа со стороны его подвода имелась возможность располагать на внутреннем торце пробки различные материалы и жидкости.

Высоковольтный искровой пробой обеспечивался электрическим разрядом конденсатора емкостью $C = 4$ мкФ, заряжаемым до $U = 0,4–0,5$ кВ. Управление разрядом осуществлялось тиристором с последующим разрядом на первичную обмотку трансформатора типа ТВС-90. При этом энергия искры не превышала 0,3 Дж. Все эксперименты проводились с заранее заготовленной стехиометрической пропан-кислородной смесью при исходном давлении смеси 10^5 Па.

В среднюю часть трубки помещались препятствия в виде множественных и одиночных капель воды различных размеров. Дополнительно проводились эксперименты с установкой в трубку стальных и пенополистирольных шариков диаметром 1–2,5 мм. Регистрация процессов горения в трубке осуществлялась с помощью цифровой видеокамеры MotionXtra HG-LE со скоростью съемки до 50000 кадр/сек без использования дополнительных подсветок.

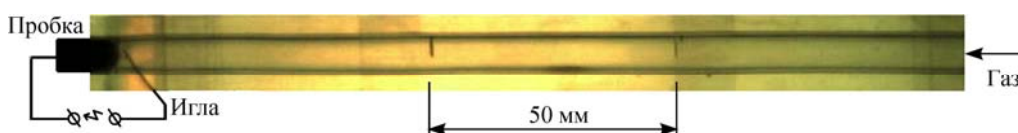


Рис. 2. Постановка модельных экспериментов.

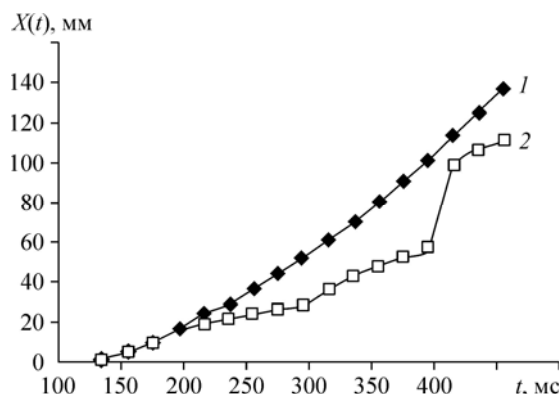


Рис. 3. Графики движения фронтов волны сжатия (1) и пламени (2) для случая инициирования газа в трубке без препятствий.

Результаты экспериментов

Из результатов скоростных съемок гидродинамических процессов в трубке видно, что в отсутствие каких-либо препятствий в трубке регистрировалась только волна сжатия (ВС) в виде голубого свечения, при этом факел пламени мог переходить во фронт горения по всему сечению трубки, однако он не догонял фронт ВС. Эксперименты с трубкой без препятствий показали отсутствие режимов развития детонации на всей длине. Детонация возникала только на противоположном конце трубки в зоне расположения пробки, изготовленной из любого материала: сталь, латунь, вода. При этом фронт детонации развивался навстречу факелам горения, усиливая их свечение.

На рис. 3 представлены два графика движения $X(t)$ для случая инициирования газа в трубке без препятствий: для фронта волны сжатия и фронта пламени. Из рисунка следует, что волна сжатия при распространении до противоположного торца трубки не обеспечивала условий инициирования процессов детонации, хотя и наблюдалось увеличение скорости ВС до 0,5–0,6 км/сек. При касании волной сжатия торца трубки в обратном направлении наблюдалось распространение фронта белого свечения со скоростями 2,2–2,5 км/сек.

Результаты скоростных киносъемок с введением в трубки одиночных и множественных капель воды или шариков из пенополистирола показали, что для всех экспериментов переход горения в детонационный режим происходил в зонах расположения препятствий.

На рис. 4, 5 представлены примеры кинограмм инициирования детонации на препятствии в виде одиночной капли воды. В конце кинограмм в едином масштабе представлены теневые фотографии трубки перед инициированием зажигания. Капля воды отмечена стрелкой. Кинограмма рис. 4 соответствует варианту инициирования детонационного режима перед каплей. Видно, что после касания ВС капли (кадр 405 мкс) перед каплей возникает яркая белая вспышка (кадр 425 мкс) с распространением фронта свечения влево. Затем, с точностью 20 мкс, аналогичный процесс развивается за каплей, с ускорением фронта до 1,8 км/сек. Кинограмма рис. 5 соответствует варианту инициирования детонации за каплей. В отличие от процессов для кинограммы рис. 4, на кинограмме рис. 5 первая белая вспышка возникает за каплей (466 мкс), а затем уже перед каплей (486 мкс). Следует отметить, что яркость голубого свечения волны сжатия при натекании ее на каплю увеличивается (кадры 426, 446 мкс).

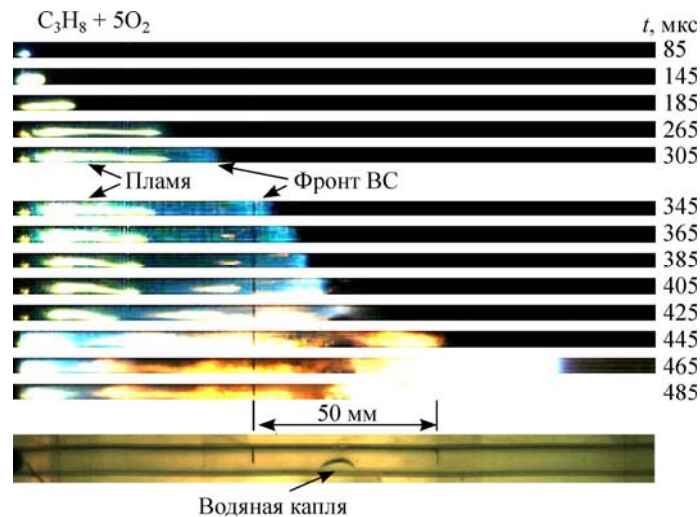


Рис. 4. Переход горения в детонацию перед препятствием в виде водяной капли.

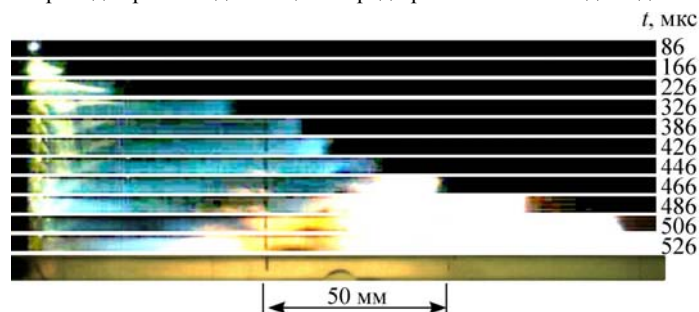
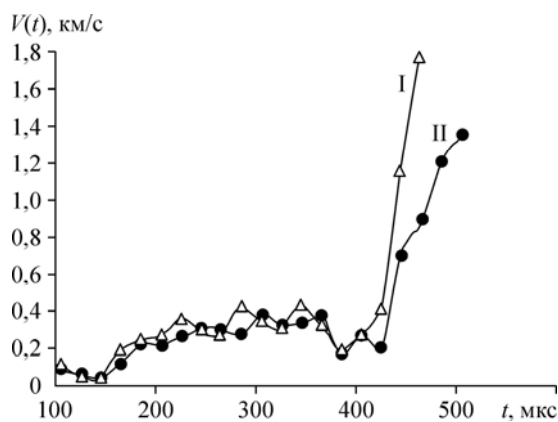


Рис. 5. Переход горения в детонацию за каплей.

На рис. 6 изображены зависимости скорости фронта ВС от времени $V(t)$ при распространении волны сжатия по трубке с препятствием в виде капли с переходом в режим детонации. График I соответствует кинограмме рис. 4 с началом инициирования детонации перед каплей. Зависимости скорости ВС от времени с переходом в режим детонации для кинограммы рис. 5 представлен графиком II на рис. 6. Также проводились эксперименты и с более мелкими каплями, и с шариками из стали и пенополистирола ($d \approx 2,5$ мм). В целом качественная картина процессов была аналогична результатам



с каплями воды, представленным на рис. 4 и 5. Отметим интересный факт: шарик из пенополистирола, который никак не закреплялся, после развития детонации оставался на месте его установки.

Рис. 6. Зависимость скорости распространения ВС от времени.

I — соответствует кинограмме рис. 4 (развитие детонации перед каплей),
II — соответствует кинограмме рис. 5 (развитие детонации за каплей).

Краткий анализ результатов

Отметим важный факт: низкоскоростной детонационный режим развивается как перед препятствием, так и за препятствием после контакта ВС с препятствием. Примерно с точностью 20 мкс и с некоторой вероятностью детонационный режим перед препятствием развивается раньше, чем за препятствием (иногда бывает и наоборот). Полученные экспериментальные результаты качественно коррелируют с результатами работы [5], в которых представлены расчеты поля температур при распространении ударных волн в каналах с различными препятствиями. Исходя из этих результатов, можно предполагать, что локальное повышение температуры в области препятствий может происходить за счет образования вихревых зон с повышением температуры. При этом температура в вихревых зонах может превышать температуру в падающей или в отраженной волне сжатия, которая необходима для инициирования горения и детонации [6, 7].

Имеет смысл ввести две категории «шероховатостей» границ (δ): а) мелкомасштабные, когда $\delta < 1$ мм, б) крупномасштабные, когда $\delta > 1$ мм. Почти на всех кинопленках за фронтом волны сжатия наблюдаются с различными задержками вспышки зажигания смеси. Например, на рис. 4 эти вспышки наблюдаются на кадрах 365–385 мкс. Предполагается, что наблюдаемые вспышки инициируются мелкомасштабными шероховатостями, которые неизбежно присутствуют на стенке трубки. Шероховатости, которые задаются каплями или твердыми частицами, следует относить к крупномасштабным. Именно на крупномасштабных препятствиях ($\delta > 1$ мм) в виде капель или твердых частиц осуществляются быстрые процессы зажигания с переходом в детонационный режим.

Полученные результаты показывают, что локальные препятствия в виде капель воды обеспечивают условия зажигания и детонацию на более коротких участках, чем для ударных труб с системными препятствиями [4].

Следует отметить, что ВС, которая может соответствовать слабой ударной волне (при числах Маха $M < 1,5$), образуется в среднем через 200 мкс после искрового разряда на расстояниях 40–60 мм от него. Из данных экспериментов следует, что ВС в трубке формируется после сжигания определенного объема газа и его расширения с образовавшимися продуктами сгорания, играющего роль поршня, на фронте которого образуется ускоряющаяся волна сжатия. На этой стадии сгорание за волной сжатия является неполным, поэтому детонация от препятствия распространяется и в обратном направлении от препятствия. Фронт свечения в виде ВС регистрируется легко, а отследить скорость фронта детонации навстречу факелам пламени затруднительно, т.к. первоначальные языки пламени маскируют фронт. Этот процесс аналогичен процессам «детонации», характерным для порошковых взрывчатых веществ. В данном случае детонация распространяется по несгоревшему, но уже нагретому газу волной сжатия. Этот процесс благоприятен для целей сжигания газов в жидкости в квазицилиндрических и кольцевых пузрырях.

Выводы

Путем моделирования сжигания стехиометрической пропан-кислородной смеси в поливинилхлоридной трубке с препятствиями в виде капель воды показано, что переход горения в детонацию в водных пузырях может происходить на препятствиях в виде неустойчивостей типа Релея–Тейлора. При этом зона перехода соизмерима с размером препятствия. Крупномасштабные шероховатости в виде неустойчивостей границы пузыря могут обеспечивать естественные короткие зоны инициирования горения с переходом в детонацию.

Список литературы

1. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н., Батраев И.С. Сжигание газов в воде в линейных и кольцевых пузырях // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 4. С. 497–507.
2. Medvedev R.N., Drozhzhin A.P., Teslenko V.S. Thrust generation by pulse combustion of gas in a submerged chamber // Intern. J. of Multiphase Flow. 2016. Vol. 83. P. 232–238.
3. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 250 с.
4. Фролов С.М. Быстрый переход горения в детонацию // Химическая физика. 2008. Т. 27, вып. 6. С. 31–44.
5. Федоров А.В., Федорова Н.Н., Хмель Т.А., Бедарев И.А., Федорченко И.А., Кратова Ю.В., Захарова Ю.В. Математическое моделирование высокоскоростных течений гомогенных/гетерогенных систем. Новосибирск, 2010. 170 с.
6. Васильев А.А. Ячеистая структура многофронтной детонационной волны и инициирование (обзор) // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 1. С. 9–30.
7. Борисов А.А., Сметанюк В.А., Трошин К.Я., Шамшин И.О. Самовоспламенение в газовых вихрях // Горение и взрыв. 2016. Т. 9, № 1. С. 4–13.

*Статья поступила в редакцию 3 марта 2017 г.,
после доработки — 28 марта 2017 г.*