

СНИЖЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВЫХОДЕ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

П. Н. Кривошеев, О. Г. Пенязьков

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 220072 Минск, Беларусь
pavlik@dnп.itmo.by

Классические способы возбуждения детонации в объеме реагирующей смеси изучены достаточно хорошо, но не всегда приемлемы с точки зрения практической реализации. В работе исследовано влияние различных стадий перехода горения в детонацию в трубе малого диаметра на эффективность возбуждения газовой детонации при выходе в полуограниченное пространство. Описанные способы инициирования имеют важное значение для оценки рисков пожаро- и взрывобезопасности в быту и особенно на производстве.

Ключевые слова: инициирование и реинициирование детонации, комплекс «ударная волна — фронт пламени», переход из трубы в объем, покадровая визуализация.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к процессам инициирования газовой детонации в первую очередь связан с необходимостью решения ряда прикладных задач: создание эффективных камер сгорания, совершенствование уже существующих и разработка новых типов детонационных и гиперзвуковых прямооточных воздушно-реактивных двигателей, подавление детонации в двигателях внутреннего сгорания, а также решение проблем пожарной и взрывной безопасности в быту, на производстве и особенно в горнодобывающей промышленности.

Среди классических и достаточно подробно изученных способов возбуждения детонации в объеме реагирующей смеси, как правило, выделяют следующие:

— прямое инициирование путем быстрого локализованного выделения энергии, вызванного различными источниками: взрывчатые вещества, нить накаливания, лазерный пробой, высоковольтный разряд и т. д. [1–5];

— инициирование при выходе детонационной волны, сформировавшейся в трубе малого диаметра, в объем или канал с большим поперечным сечением [6–9];

— зажигание смеси маломощным источником энергии с последующим переходом горения в детонацию (ПГД) [10–14].

Последний способ, вероятно, реализуется только в ограниченных пространствах. Прямых экспериментальных доказательств ПГД в неограниченном объеме не существует, для

его стимулирования требуется создание искусственных преград.

К настоящему времени разработаны аналитические модели, описывающие процессы прямого инициирования детонации в объеме, предложены классификация по виду инициирования (плоское, цилиндрическое и сферическое) и формулы для оценки критической энергии [15–20], позволяющие удовлетворительно описывать совокупность имеющихся экспериментальных результатов. На основании большого количества исследований определены критические условия, необходимые для успешного реинициирования в случае выхода детонационной волны из канала меньшего диаметра [8].

Вместе с тем, стоит отметить, что на практике иногда очень сложно определить непосредственный характер инициирования. Часто наблюдается значительное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями критической энергии инициирования, что связано с неточным описанием кинетики химических реакций и погрешностью определения ряда эмпирических параметров, например размеров детонационной ячейки горючей смеси [21].

Кроме того, прямое приложение классических методов инициирования детонации не всегда возможно, поскольку требует использования мощных источников зажигания. Например, критическая энергия инициирования сферической детонации в пропановоздушной смеси при

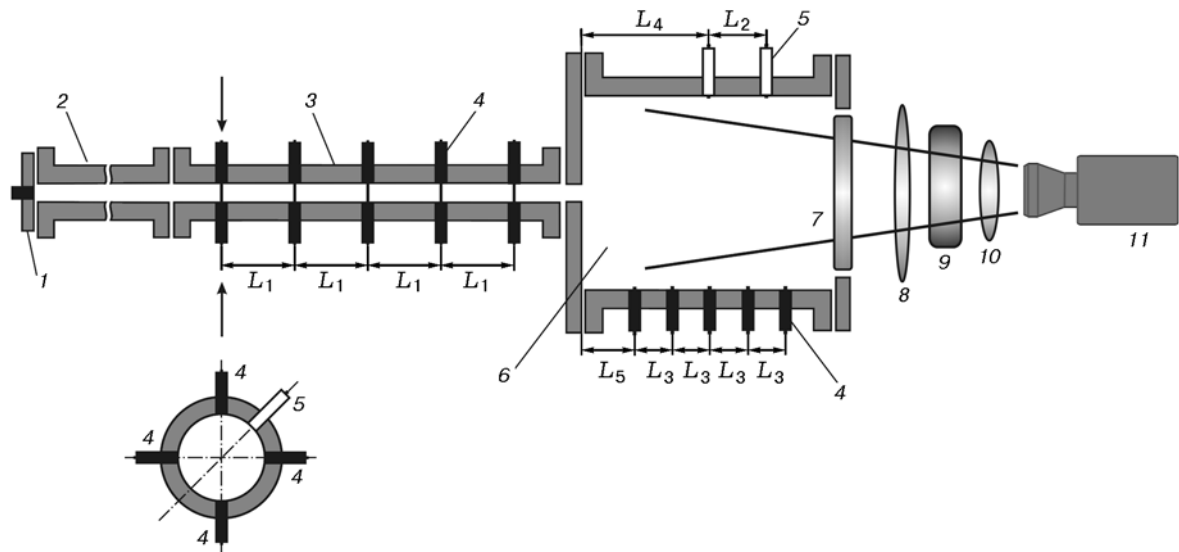


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — система высоковольтного электродного поджига, 2 — управляющая труба диаметром 30 мм, 3 — измерительная секция управляющей трубы, расстояние между датчиками $L_1 = 90$ мм, 4 — ионизационные датчики, расстояния между датчиками $L_1 = 90$ мм и $L_3 = 50$ мм, расстояние от первого датчика до среза выходного сечения $L_5 = 75$ мм, 5 — датчики давления, расстояние между датчиками $L_2 = 100$ мм, расстояние от первого датчика до среза выходного сечения $L_4 = 175$ мм, 6 — емкость диаметром 142 мм с торцевым фланцем (7) из плексигласа, 8 — широкополосный ($\Delta\lambda \approx 50$ нм) светофильтр ФС-1, 9 — объектив Carl Zeiss Makro-Planar T*2/100 mm ZF, 10 — узкополосный монохроматический фильтр ($\lambda = 430.4 \pm 1.3$ нм), 11 — быстродействующая CCD-камера PCO Dicom Pro

атмосферном давлении эквивалентна взрыву 50 г тринитротолуола [22]. Если же речь идет об иницировании при выходе из трубы малого диаметра, то приходится иметь дело с детонационной волной, характерный размер ячейки которой, как минимум, на порядок меньше размера канала [8]. Это приводит к необходимости оперировать либо высококалорийными смесями, либо смесями при повышенных начальных давлениях, что не всегда приемлемо с точки зрения безопасности.

Известно, что формированию стационарной детонации в трубе предшествуют процесс перехода горения в детонацию и возникновение сильно пересжатой детонационной волны с последующим выходом на стационарный для данных условий режим распространения. Снижение начального давления смеси приводит к смещению области ПГД от источника иницирования к выходному сечению. В работе [23] обнаружено, что смещение области (точки) ПГД непосредственно к дифракционному сечению позволяет существенно уменьшить критическое начальное давление. Цель данной работы состояла в детальном изучении влияния различных стадий перехода горения в детонацию в трубе

малого диаметра на эффективность возбуждения газовой детонации при выходе в полуограниченное пространство.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Основным элементом установки являлась стальная детонационная труба (управляющая труба) постоянного сечения (внутренний диаметр 30 мм), длиной 3.5 м, на конце которой имела измерительная секция длиной 500 мм. Труба состыковывалась с емкостью диаметром 142 мм и длиной 0.4 м, объем которой равен 6.33 л (рис. 1). Перед проведением эксперимента установку вакуумировали до остаточного давления 10^{-2} Торр и заполняли горючей смесью под необходимым давлением.

Для приготовления смесей использовали химически чистые (99.9 %) газы. Горючие смеси готовили в отдельных баллонах методом парциальных давлений и выдерживали перед использованием не менее суток. Исследовалась стехиометрическая пропанокислородная смесь, разбавленная на 25 и 50 % азотом: 12.5 % C_3H_8 + 62.5 % O_2 + 25 % N_2 и 8.33 % C_3H_8 + 41.67 % O_2 + 50 % N_2 .

Горение в управляющей трубе инициировалось маломощным источником зажигания — стандартной автомобильной свечой с высоковольтным электроискровым воспламенением с энергией ≈ 0.8 мДж.

Скорость и давление за фронтом головной ударной волны (УВ), возглавляющей структуру ускоряющейся дефлаграции в управляющей трубе, измеряли с временным разрешением менее 1 мкс пятью высокочастотными пьезоэлектрическими датчиками РСВ Piezotronics, последовательно установленными на расстоянии 90 мм друг от друга. Расстояние от последнего датчика по ходу движения волны до сечения перехода в измерительную емкость составляло 85 мм (см. рис. 1). Для одновременной фиксации времени прихода, скорости и пространственной конфигурации фронта пламени за головной УВ в каждом сечении измерения, наряду с датчиком давления, дополнительно устанавливали четыре ионизационных датчика. Они позволяли проводить локальное измерение тока ионизации среды на стенке управляющей трубы с временным разрешением до 0.5 мкс и пространственным до 0.9 мм.

Измерительные сигналы регистрировались цифровыми осциллографами (модель В-421, полоса пропускания 200 МГц, частота дискретизации $2 \cdot 10^8$ отсч./с), а затем обрабатывались на компьютере.

Подобная схема эксперимента обеспечивала определение таких важных динамических характеристик процесса ПГД, как скорости УВ и фронта пламени, пространственная конфигурация фронта пламени, длина и конфигурация индукционной зоны между УВ и фронтом пламени.

Факт затухания или реинициирования детонации после выхода ускоряющейся дефлаграции или детонации в емкость устанавливался посредством анализа сигналов, регистрируемых датчиками ионизации и давления. Пять ионизационных датчиков располагались на боковой стенке емкости в одну линию на расстоянии 50 мм друг от друга. Первый из них смещен на 75 мм вниз по потоку от среза управляющей трубы, что соответствует 103.3 мм (≈ 3 диаметрам управляющей трубы) от центра ее выходного сечения. Дополнительно на расстояниях 175 и 275 мм от среза размещались два высокочастотных датчика давления РСВ Piezotronics (см. рис. 1). Инициирование детонации считалось успешным, если на первой

и последующих базах регистрировались скорости УВ и фронта реакции, не меньшие скорости детонации Чепмена — Жуге в данных условиях. В других случаях детонация могла быть вызвана эффектами реинициирования при взаимодействии УВ со стенками емкости.

Визуализация режимов затухания и реинициирования детонации в объеме при выходе из управляющей трубы (см. рис. 1) осуществлялась через толстостенный торцевой фланец, выполненный из плексигласа. Съемка проводилась быстродействующей ССD-камерой PCO Dicom Pro, которая позволяет получать до двух кадров за один эксперимент с экспозицией до 5 нс и временной задержкой между кадрами до 5 нс. Предметная плоскость изображающего объектива камеры находилась на расстоянии $30 \div 40$ мм от среза управляющей трубы. Глубина резкости объектива была достаточной для наблюдения резких сфокусированных изображений реинициирования и распада детонации. Для улучшения контрастности и исключения влияния паразитного свечения продуктов сгорания съемка осуществлялась через широкополосные ($\Delta\lambda \approx 50$ нм) синие светофильтры с различными значениями коэффициента пропускания в комбинации с узкополосным монохроматическим фильтром на длине волны $\lambda = 430.4 \pm 1.3$ нм, которая соответствует свечению промежуточных радикалов СН в зоне химической реакции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Путем изменения начального давления смеси были реализованы различные режимы течения в управляющей трубе при выходе в емкость. При давлениях ниже атмосферного, когда чувствительности смеси недостаточно для регистрации ПГД в измерительной секции, длину управляющей трубы увеличивали. Ниже рассматриваются и обсуждаются только те эксперименты, в которых инициирование детонации в емкости было успешным.

В классическом и хорошо изученном случае выхода стационарной детонации, распространяющейся в пропанокислородной смеси, разбавленной 25 % азота, критическое начальное давление составило 0.088 МПа. Зафиксированная скорость детонации $v = 2250$ м/с совпала, с учетом погрешности измерений, со скоростью детонации Чепмена — Жуге для данных начальных условий ($v_{CJ} = 2218$ м/с). Измерения показали, что в этом случае длина

индукционной зоны между головной УВ и зоной реакции не превышает 1 мм, и, таким образом, фронт детонации можно считать почти плоским. Детонация успешно реиницируется вниз по потоку от сечения перехода и формирует практически стационарную детонационную волну в емкости.

Из-за ограничений, вызванных техническими характеристиками и конструкцией установки, и по соображениям безопасности нам не удалось установить критическое давление инициирования детонации стационарной детонационной волной в пропано-кислородной смеси, разбавленной 50 % азота. Эксперименты были прекращены при начальном давлении 0.203 МПа, когда успешного реиницирования детонации зафиксировано не было. Тем не менее будем отталкиваться от данного результата при дальнейшем обсуждении.

С уменьшением начального давления зона ПГД начинала смещаться вниз по потоку от места поджига, режим ПГД возникал в измерительной секции управляющей трубы на расстоянии не более 500 мм от ее выходного сечения, и, как следствие, наблюдался переход пересжатой детонационной волны.

При этом, в отличие от переходов стационарной детонационной волны и несмотря на существенное снижение давления в обеих смесях и соответственно увеличение размеров детонационной ячейки, процесс реиницирования детонации в емкости при вылете сильно пересжатой волны был значительно более эффективным. В смеси с 25%-м разбавлением азотом наблюдаемый уровень критического давления снизился в 3.3 раза и составил 0.027 МПа, а в смеси с 50%-м разбавлением азотом снизился, как минимум, в 5 раз (с учетом того, что нам так и не удалось достичь критического давления) и был равен 0.041 МПа.

На рис. 2, *a* приведены характерные $x-t$ -диаграммы движения фронтов УВ и пламени в измерительной секции (x — расстояние вдоль оси трубы, t — время). Хорошо видно, что до момента ПГД длина индукционной зоны между головным ударным скачком и лидирующей частью следующего за ним фронта пламени достигает 200 мм (6–7 диаметров канала). При этом фронт дефлаграции неплоский и имеет вид «языка», вытянутого вдоль оси в направлении распространения. С учетом того, что локальные измерения тока ионизации в четырех точках по периметру управляющей трубы

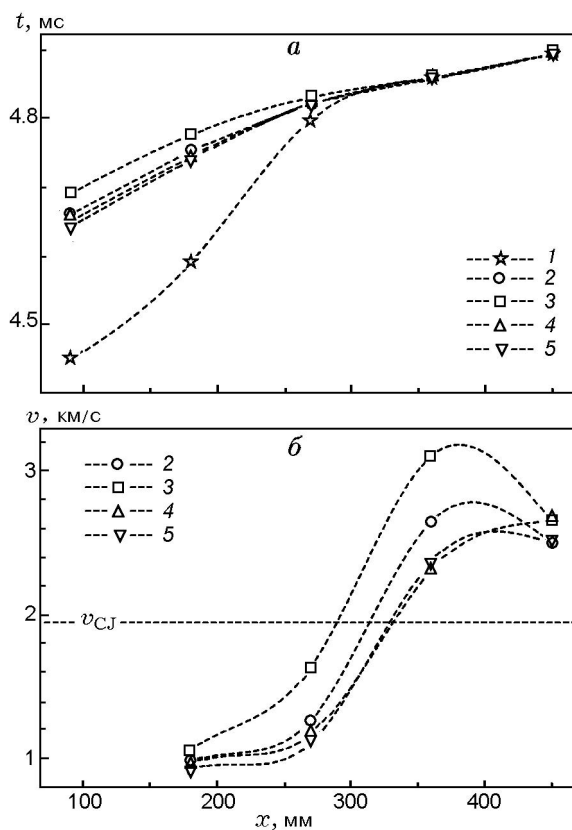


Рис. 2. Измерительная секция управляющей трубы, режим перехода пересжатой детонации:

a — типичные $x-t$ -диаграммы распространения ударной волны и фронта пламени, *b* — скорости фронта пламени; 1 — ударная волна, 2–5 — фронт пламени, линии различных ионизационных датчиков

не дают адекватного представления о глубине и форме зоны индукции, в некоторых экспериментах зарегистрированная длина «языка» фронта пламени составляла 3–4 диаметра канала, а ее максимальные значения могли быть еще больше. Отметим еще одну важную особенность ускоряющейся дефлаграции: по мере приближения к преддетонационному состоянию пространственная конфигурация и ориентация ее фронта по отношению к поверхности трубы перестают быть «жесткими» и лидирующие участки фронта пламени могут вращаться или колебаться в поперечном направлении, что свидетельствует о возникновении поперечных пульсаций скорости потока в индукционной зоне.

На рис. 2, *b* представлены зависимости скорости распространения фронта пламени вдоль

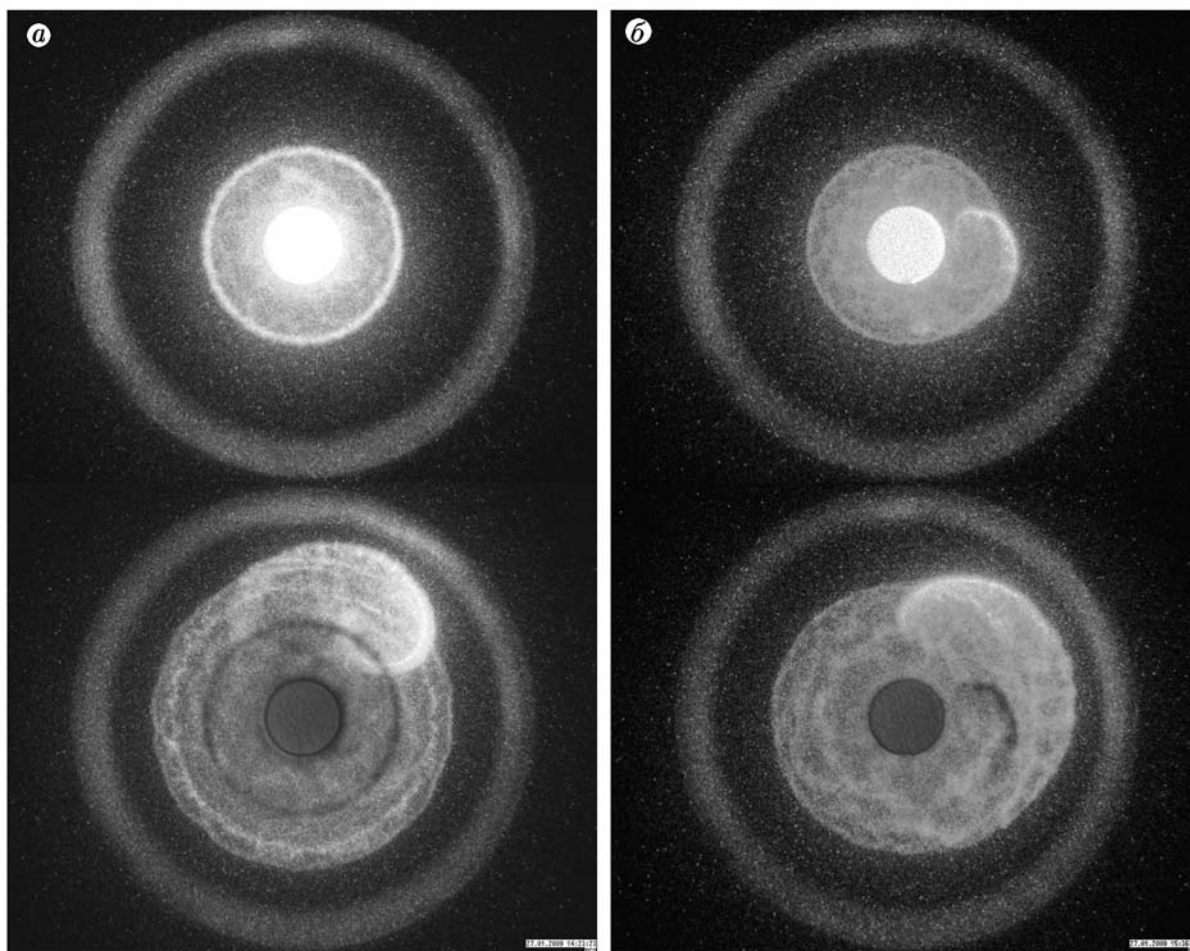


Рис. 3. Фотографии перехода пересжатой детонации из трубы меньшего диаметра:
 время экспозиции 100 нс, задержка между кадрами 10 мкс; смесь 12.5 % C_3H_8 + 62.5 % O_2 + 25 % N_2 ,
 начальное давление 0.029 МПа

оси трубы, измеренные по четырем линиям ионизационных датчиков. В определенный момент времени при переходе к детонации скорость фронта пламени начинает лавинообразно возрастать и он догоняет находящийся впереди него фронт головной УВ, что приводит к возникновению сильно пересжатой детонационной волны. Ее продольная скорость может достигать ≈ 3000 м/с, что в $1.4 \div 1.5$ раза превышает скорость Чепмена — Жуге для данных условий. Описанное явление происходит на незначительном расстоянии — $150 \div 200$ мм (5–6 диаметров канала). Как видно из рис. 2, б, отстающая часть «языка» фронта пламени ускоряется более интенсивно, стремясь догнать лидирующую часть и придать фронту плоскую форму. Как было отмечено выше, последую-

щий выход сильно пересжатой волны в объем емкости существенно облегчает реиницирование детонации вниз по потоку и значительно снижает уровень критического давления смеси по сравнению с выходом стационарной детонации.

На рис. 3, а, б приведены моментальные фотографии различных стадий процесса реиницирования детонации при выходах пересжатой детонации, полученные в серии экспериментов при одних и тех же начальных условиях. Отметим, что реиницирование всегда носит локальный характер и происходит в одной или двух точках. В результате формируется пересжатая детонация, которая распространяется по индукционному шаровому слою между фронтом расширяющейся головной УВ и фрон-

том пламени, что приводит к восстановлению структуры фронта детонации в объеме.

При дальнейшем снижении начального давления смеси переход горения в детонацию может возникать уже в окрестности выходного сечения управляющей трубы. В этом случае в измерительной секции вблизи выхода в объем регистрируется комплекс, состоящий из головной УВ и фронта ускоряющейся дефлаграции (рис. 4). Его скорость вблизи сечения перехода составляла $1.3 \div 1.4$ км/с, а длина индукционной зоны достигала 53 мм (почти два диаметра трубы). С учетом неопределенности ориентации ионизационных датчиков по отношению к пространственной конфигурации фронта пламени измеренная в данном опыте длина «языка» фронта составляла 17 мм (0.5 диаметра канала).

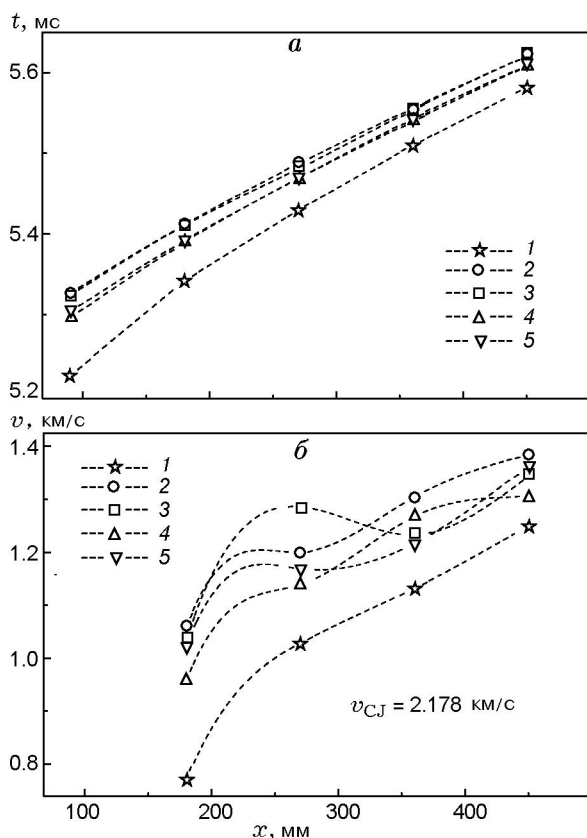


Рис. 4. Измерительная секция управляющей трубы, режим перехода комплекса «ударная волна — фронт пламени»:

a — типичные $x-t$ -диаграммы распространения ударной волны и фронта пламени, b — скорости ударной волны и фронта пламени; 1 — ударная волна, 2–5 — фронт пламени, линии различных ионизационных датчиков

Локализация ПГД вблизи среза управляющей трубы приводит к тому, что формирование и распространение пересжатой детонации происходят в индукционной зоне сложной геометрической формы, ограниченной поверхностью уже сгоревшей смеси при выходе из трубы. При этом источник инициирования оказывается сдвинут относительно оси к стенкам управляющей трубы. На рис. 5, a, b приведены мгновенные фотографии различных стадий процесса реиницирования детонации при переходах комплекса «ударная волна — фронт пламени» из трубы меньшего диаметра, полученные в ряде экспериментов при одних и тех же начальных условиях. В результате сильно пересжатая сферическая детонация распространяется в полуограниченный объем по индукционному слою за фронтом сферической головной УВ.

В стехиометрической пропанокислородной смеси, разбавленной на 25 % азотом, такой вид инициирования позволил добиться снижения критического давления смеси (0.027 МПа) в 3.3 раза по сравнению с выходом стационарной детонации.

Описанная тенденция в случае выхода комплекса «ударная волна — фронт пламени» сохраняется и при переходе к менее чувствительной (50 % азота) стехиометрической пропанокислородной смеси. Здесь наблюдаемый уровень критического давления уменьшился еще более существенно, как минимум в 5 раз, и составил 0.041 МПа.

ВЫВОДЫ

Показано, что перспективным способом возбуждения детонации в объеме является воспламенение смеси маломощным источником зажигания, форсирование перехода горения в детонацию в трубе малого диаметра за счет собственного энерговыделения смеси и последующее использование энергии пересжатой детонации, распространяющейся в индукционной зоне сложной геометрической формы при выходе из трубы, для реиницирования детонации в основном объеме.

Как и в работе [23], при выходе нестационарного комплекса «ударная волна — фронт ускоряющегося пламени» и при выходе пересжатой детонационной волны зафиксировано снижение в 3–5 раз критического давления смеси, необходимого для реиницирования детонации в объеме, по сравнению с классическим

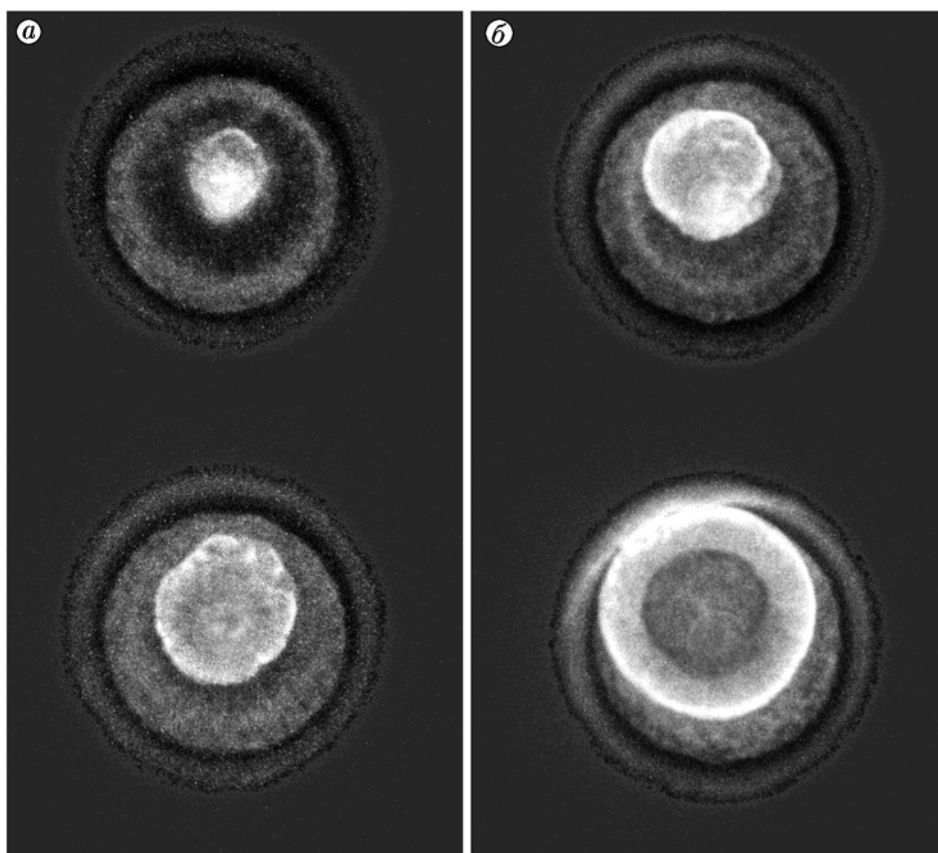


Рис. 5. Фотографии перехода комплекса «ударная волна — фронт пламени» из трубы меньшего диаметра:

время экспозиции 200 нс, задержка между кадрами 10 мкс; смесь 12.5 % C_3H_8 + 62.5 % O_2 + 25 % N_2 , начальное давление 0.027 МПа

случаем перехода стационарной детонации из трубы в полуограниченное пространство.

Описанные способы инициирования имеют важное значение для оценки рисков пожаро- и взрывобезопасности в быту и особенно на производстве. Они демонстрируют, что классические подходы для оценки критического давления смеси и диаметра детонационной трубы не всегда корректно учитывают потенциальную возможность реиницирования детонации при выходе из трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Litcheld E. L., Hay M. H., Forshey D. R. Direct electrical initiation of freely expanding gaseous detonation waves // Proc. of 9th Symp. (Intern.) on Combustion. — 1962. — P. 282–286.
2. Lee J. H., Lee B. H. K., Knystautas R. Direct initiation of cylindrical gaseous detonations // Phys. Fluids. — 1966. — V. 9, N 1. — P. 221–222.
3. Klimkin V. F., Soloukhin R. I., Wolansky P. Initial stages of spherical detonation directly initiated by a laser spark // Combust. and Flame. — 1973. — V. 21, N 1. — P. 111–117.
4. Lee J. H., Matsui H. A comparison of the critical energies for direct initiation of spherical detonation in acetylene-oxygen mixtures // Combust. and Flame. — 1977. — V. 28, N 1. — P. 61–66.
5. Moen I. O., Funk J. W., Ward S. A., Rude G. M., Thibault P. A. Detonation length scales for fuel-air mixtures // Dynamics of Shock Waves, Explosions, and Detonations / J. R. Bowen, N. Manson, A. K. Oppenheim, R. I. Soloukhin (Eds). — 1984. — P. 55–79. — (Prog. in Astronautics and Aeronautics; V. 94).
6. Зельдович Я. Б., Когарко С. М., Симонов Н. И. Экспериментальное исследование сферической детонации // ЖТФ. — 1957. — Т. 26, вып. 8. — С. 1744–1752.

7. Гвоздева Л. Г. Экспериментальное исследование дифракции детонационных волн в стехиометрической смеси метана с воздухом // ПМТФ. — 1961. — № 5. — С. 53–56.
8. Митрофанов В. В., Солоухин Р. И. О дифракции многофронтной волны // Докл. АН СССР. — 1964. — Т. 159, № 5. — С. 1003–1006.
9. Edwards D. H., Thomas G. O., Nettleton M. A. The diffraction of a planar detonation wave at an abrupt area change // J. Fluid Mech. — 1979. — V. 95. — P. 79–96.
10. Когарко С. М., Адушкин В. В., Лямин А. Г. Исследование сферической детонации газовых смесей // Науч.-техн. проблемы горения и взрыва. — 1965. — № 2. — С. 22–34.
11. Подгребенников А. Л., Гельфанд Б. Е., Когарко С. М., Борисов А. А. О причинах возникновения сферической детонации в замкнутом объеме // Докл. АН СССР. — 1969. — Т. 184, № 4. — С. 883–885.
12. Wagner G., Dodge K., Pangritz D. Experiments on velocity augmentation of spherical flames by grids // Acta Astronautica. — 1976. — V. 3. — P. 1067–1076.
13. Горев В. А., Мирошников С. Н. Ускоряющееся горение в газовых объемах // Хим. физика. — 1982, № 6. — С. 111.
14. Макеев В. И., Гостинцев Ю. А., Строгонов В. В., Бохон Ю. А., Чернушкин Ю. Н., Куликов В. Н. Горение и детонация водородно-воздушных смесей в свободных объемах // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 5. — С. 16–18.
15. Knystautas R., Lee J. H. On the effective energy for direct initiation of gaseous detonation // Combust. and Flame. — 1976. — V. 27, N 2. — P. 221–228.
16. Васильев А. А., Николаев Ю. А., Ульяницкий В. Ю. Критическая энергия инициирования многофронтной детонации // Физика горения и взрыва. — 1979. — Т. 15, № 6. — С. 94–104.
17. Ульяницкий В. Ю. Замкнутая модель прямого инициирования газовой детонации с учетом неустойчивости. I. Точечное инициирование // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 3. — С. 101–113.
18. Ульяницкий В. Ю. Замкнутая модель прямого инициирования газовой детонации с учетом неустойчивости. II. Неточечное инициирование // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 4. — С. 79–89.
19. He L., Clavin P. On the direct initiation of gaseous detonations by an energy source // J. Fluid Mech. — 1994. — V. 277. — P. 227–248.
20. Lee J. H. S., Higgins A. J. Comments on criteria for direct initiation of detonation // Phil. Trans. Roy. Soc. London. — 1999. — V. A 357. — P. 3503–3521.
21. Николаев Ю. А., Васильев А. А., Ульяницкий В. Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 4. — С. 22–54.
22. Bull D. C., Elsworth J. E., Hooper G., Quinn C. P. Initiation of spherical detonation in hydrocarbon/air mixtures // Acta Astronautica. — 1978. — V. 5. — P. 997–1008.
23. Васильев А. А., Дроздов М. С., Хидиров С. Г. Неклассические режимы дифракции волн в горючих смесях // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 6. — С. 137–143.

Поступила в редакцию 4/V 2010 г.