

**ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОМПЛЕКСА
“УДАРНАЯ ВОЛНА – ЗОНА РЕАКЦИИ”
В МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ**

© 2014 г. А. А. Борисов, А. С. Коваль, А. Е. Маилков, В. А. Сметанюк, С. М. Фролов*

Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва

Центр импульсно-детонационного горения, Москва

Национальный исследовательский ядерный университет – Московский инженерно-физический институт

**E-mail: smfrol@chph.ras.ru*

Поступила в редакцию 03.06.2013

Экспериментально исследована динамика процессов горения стехиометрической метановоздушной смеси при переходе волны горения из трубы большого диаметра в трубу меньшего диаметра. Показано, что совместный эффект увеличения скорости и длительности течения газа, а также его турбулизации за счет уменьшения площади поперечного сечения трубы и установки в трубе препятствий-турбулизаторов существенно увеличивает вероятность возникновения режимов горения с интенсивными ударными волнами. Получены режимы горения, ведомые ударной волной, воспламеняющей смесь на препятствиях, и распространяющиеся со скоростью до 1400 м/с на расстояниях, составляющих около 14 калибров трубы.

Ключевые слова: смеси метан–воздух, горение, ударные волны.

DOI: 10.7868/S0207401X14030054

ВВЕДЕНИЕ

Метан – основной компонент природного газа – самый широко используемый на практике горючий газ. Метановоздушные смеси могут образовываться в разнообразных условиях: как в замкнутых объемах, так и в открытом пространстве. Взрывоопасность таких смесей исследовалась на протяжении нескольких сотен лет.

Несмотря на то, что детонацию в метановоздушных смесях возбудить очень трудно вследствие низкой реакционной способности метана в реакциях с кислородом воздуха, детонационный взрыв традиционно считается наиболее опасным и разрушительным. Сегодня общепринято, что предельный диаметр гладкой трубы, в которой возможно прямое инициирование детонации метановоздушной смеси при нормальных условиях (например, перепуском детонационной волны из кислородной смеси в воздушную, взрывом активного заряда или газодинамической фокусировкой относительно слабой ударной волны), составляет 80–100 мм (см., например, [1–3]), хотя в литературе имеются данные [4] о возможности прямого инициирования детонации (скорее всего – пережатой детонации) в трубе диаметром 50 мм. Критическая энергия прямого инициирования

детонации метановоздушных смесей в трубах достигает 50–70 г ВВ [2, 5] или 9–10 МДж/м² [4, 6].

Сегодня можно лишь предположить, что пределы детонации метановоздушных смесей в трубах при сильном инициировании и при переходе горения в детонацию (ПГД) близки друг к другу. Дело в том, что до сих пор о ПГД в трубах с метановоздушными смесями в литературе имеются весьма противоречивые данные. Так, в соответствии с оценками, сделанными в работах [2, 7], преддетонационное расстояние для стехиометрической метановоздушной смеси в гладкой трубе должно составить 50–125 диаметров трубы, однако сегодня нет ни экспериментального подтверждения этим оценкам, ни фактов о самой возможности ПГД в гладких трубах. Наличие регулярных препятствий внутри трубы сокращает длину преддетонационного участка до 20–30 диаметров трубы [8–17]. Однако при этом по одним данным [9, 10] при нормальных условиях предельный диаметр трубы уменьшается (до 50 мм [9] или даже до 36 мм [10]), по другим данным [11, 12] предельный диаметр остается на том же уровне, что и при прямом инициировании детонации (100 мм [11] или около 94 мм [12]), а по третьим данным [13] предельный диаметр трубы увеличивается (авторы работы [13] сообщают о том, что в

трубе диаметром 121 мм с регулярными кольцевыми препятствиями-турбулизаторами ПГД в стехиометрической метановоздушной смеси возможен только при начальном давлении выше 2 атм). Во всех указанных случаях подразумевается, что образовавшаяся в результате ПГД детонационная волна способна распространяться в самоподдерживающемся режиме на гладком участке рабочей секции трубы, присоединенном к участку трубы с препятствиями-турбулизаторами.

Подчеркнем, что в отличие от работ [9, 10, 13], в которых использовались регулярные кольцевые препятствия-турбулизаторы или спирали Шелкина, в работе [11] применялись специальные (запатентованные) препятствия-турбулизаторы, а в работе [12] – специально спрофилированные препятствия-турбулизаторы, обеспечивающие оптимальное согласование темпов ускорения пламени и усиления ударной волны, порожденной пламенем, т.е. были обеспечены условия для быстрого ПГД (по терминологии [18]).

Кроме детонации существуют и другие взрывные режимы. Для задач взрывобезопасности наибольший интерес представляют режимы горения метановоздушных смесей с образованием интенсивных волн давления, способных произвести существенные разрушения. К таким режимам горения относят переходные режимы между распространением пламени с видимыми скоростями в несколько десятков метров в секунду и нормальной детонацией, распространяющейся со скоростями 1600–1800 м/с. К переходным режимам горения относят и так называемую галолирующую детонацию [1], когда участки, на которых наблюдается детонация, чередуются с участками, где ударная волна и фронт пламени разделяются, а также неидеальную детонацию в шероховатых трубах и в трубах с регулярными препятствиями [19–22], при которой пламя и ударная волна достаточно устойчиво связаны друг с другом только на периферии трубы за счет самовоспламенения смеси в местах отражения ударной волны от элементов шероховатости или препятствий. В литературе все эти режимы иногда объединяют одним термином – “быстрое дефлаграционное горение”.

При исследовании таких разрушительных режимов горения важно выяснить не только саму возможность их возникновения, но и определить условия, при которых они возникают на коротких расстояниях от источника зажигания. Последнее важно для оценки рисков возникновения опасных ситуаций и для практики проектирования взрывоопасных производств. Кроме того, это важно для практического использования переходных режимов горения в различных технологических устройствах [23], например в горелочных устройствах нового типа – импульсно-детонационных горелках, совмещающих комбинированное воз-

действие на объекты, обдуваемые продуктами горения: ударно-волновое (механическое) и тепловое [12, 16].

Цель данной экспериментальной работы – выяснить условия, при которых режимы быстрого горения с интенсивными ударными волнами, близкие к детонационным, могут возникать при зажигании смеси источником, не генерирующим начальные ударные волны. При этом специально выбрана геометрические параметры трубы, не оптимальные для ПГД, а именно: 1) диаметр трубы в 70 мм, при котором в [1] наблюдалось устойчивое распространение детонации в гладкой трубе длиной 17 м с заметными флуктуациями скорости волны только в стехиометрической метановоздушной смеси, и 2) длина участка, на котором регистрировалось развитие процесса, не превышает 2.5 м.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Известно, что быстрое возникновение турбулентности в газовом потоке перед пламенем – один из основных факторов, ускоряющих процесс распространения пламени, а следовательно, и формирование интенсивной волны давления. Возможны два способа интенсификации турбулентности в потоке: установка препятствий-турбулизаторов [8] и увеличение скорости течения газа [12, 15, 16]. Если первый метод широко используется в исследованиях ПГД [9–22], то второму уделялось меньше внимания. На практике часто встречаются ситуации, когда газовые смеси первоначально покоятся, и высокие скорости потока может создать только сам процесс горения вследствие расширения продуктов реакции. В реальных условиях горение может возникнуть в больших объемах, а затем переходить в другие объемы через каналы, в которых течение перед пламенем резко ускоряется.

В данной работе использованы оба подхода к ускорению процесса горения: за счет создания начального турбулентного потока газа и за счет турбулизации пламени на препятствиях. На рис. 1а показана схема проточной экспериментальной установки. Установка состоит из трех сообщающихся секций: форкамеры (А), бустера (Б) и рабочей секции (В) с препятствиями-турбулизаторами. Форкамера предназначена для надежного зажигания смеси в бустере, бустер – для создания начального турбулентного потока газа в рабочей секции, а препятствия-турбулизаторы в рабочей секции – для дополнительной турбулизации пламени и создания горячих точек при отражении ударных волн.

В большинстве опытов в качестве форкамеры использовали трубу внутренним диаметром 51 мм и длиной 180 мм (объем форкамеры – 0.37 л). Вблизи закрытого торца форкамеры размещали искровой источник зажигания, а ее открытый то-

рец сообщался с бустером через расходную шайбу с круглым центральным отверстием диаметром 16 мм. В дальнейшем эти опыты будем называть опытами без активации. В некоторых опытах в качестве форкамеры использовали трубку внутренним диаметром 12.7 мм и длиной 800 мм (объем форкамеры 0.1 л) с двумя закрытыми торцами. В одном торце размещался источник зажигания в виде электрически пережигаемой проволоочки, а вблизи другого торца были сделаны 6 радиальных отверстий диаметром 3 мм, равномерно распределенных по периметру поперечного сечения трубки. Участок трубки с отверстиями неглубоко утапливали в бустер через переходник. Опыты с такой форкамерой будем называть опытами с активацией.

В опытах без активации саму форкамеру, а также бустер и рабочую секцию заполняли стехиометрической метановоздушной смесью. Опыты с активацией проводили для изучения влияния энергии и мощности зажигания на развитие взрывного процесса: в форкамеру вводили стехиометрическую метанокислородную смесь, причем количество вводимой смеси определялось по падению давления в однолитровом баллоне и не превышало 0.1 л. Во всех случаях метановоздушная смесь в бустере зажигалась одной или несколькими турбулентными струями продуктов горения, истекающими из форкамеры через расходную шайбу или через радиальные отверстия.

Бустер — это прямая труба диаметром 130 мм и длиной 280 мм, один конец которой сообщается с форкамерой, а другой — с рабочей секцией. Для ускорения сгорания смеси в бустере устанавливали перфорированную перегородку с двенадцатью отверстиями диаметром 14 мм, равномерно распределенными вдоль периферийной части перегородки. В отдельных опытах в бустере дополнительно монтировали вторую перегородку (ниже по потоку от первой) с восемью отверстиями диаметром 14 мм.

Рабочая секция — это прямая труба диаметром 70 мм и длиной 2.5 м, один конец которой сообщается с бустером, а другой открыт в атмосферу. Через открытый конец в рабочую секцию может вводиться вставка в виде сборки одинаковых препятствий-турбулизаторов длиной от 0.5 до 1.5 м (рис. 1б). Одиночное препятствие-турбулизатор — это кольцо с внешним диаметром 70 мм, внутренним диаметром 50 мм и толщиной 4 мм. Относительное перекрытие проходного сечения рабочей секции таким кольцом — 0.49. В отдельных опытах между бустером и рабочей секцией устанавливали кольцевую диафрагму с относительным перекрытием проходного сечения, составляющим 0.67.

Стехиометрическую метановоздушную смесь приготавливали по парциальным давлениям компонентов в смесителе большого объема, оборудо-

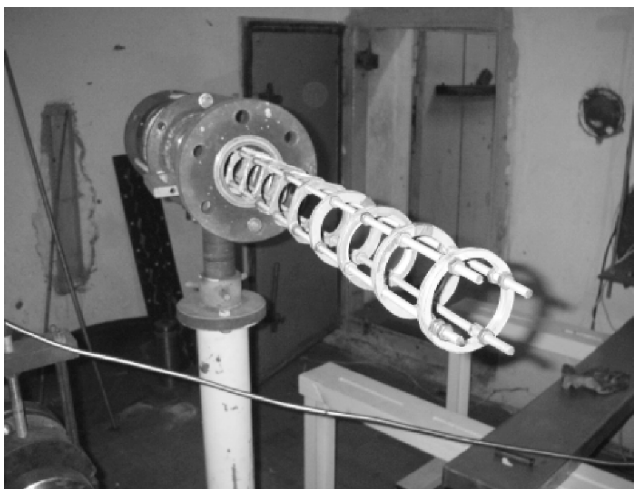
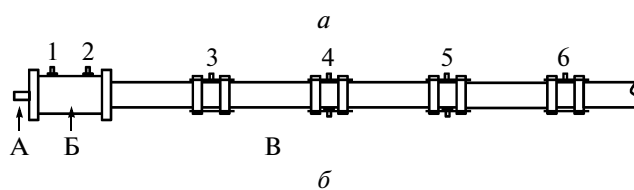


Рис. 1. Схема установки (а) и фотография сборки препятствий-турбулизаторов (б).

ванном вентилятором для принудительного смешения. Объем смесителя — 30 л, давление в нем — до 3 атм. В опытах без активации смесь вводили в установку через форкамеру, причем количество смеси, продуваемой через установку перед зажиганием, было не менее 8–9 объемов установки. В опытах с активацией метанокислородную смесь объемом 0.1 л вводили в форкамеру непосредственно перед зажиганием.

Система регистрации включала два низкочастотных и четыре высокочастотных датчика давления и два фотодиода. Низкочастотные датчики давления 1 и 2 (см. рис. 1а) устанавливались в бустере, а высокочастотные датчики 3–6 — в рабочей секции. Фотодиоды L1 и L2 устанавливались в тех же сечениях, что и высокочастотные датчики давления. Сигналы с датчиков давления и фотодиодов поступали в персональный компьютер через аналогово-цифровой преобразователь. По сигналам датчиков давления определяли скорости распространения возникающих волн давления (максимальная относительная погрешность составила 5% с учетом возможной размытости фронта). По уровню измеряемого давления датчики давления не калибровались, поэтому анализ регистраций проводился только на основе измеряемых скоростей волновых фронтов. По сигналам фотодиодов оценивали положение фронта свечения относительно волны давления, а также среднюю скорость распространения и характерную ширину фронта свечения (относительная по-

Таблица 1. Условия представительных опытов

№ опыта	Заполнение метано-воздушной смесью	Активация зажигания метано-кислородной смесью	Перегородки в бустере	Диафрагма между бустером и рабочей секцией	Препятствия в рабочей секции
I	нет	да	одна	нет	нет
II	полное	да	одна	нет	нет
III	нет	да	одна	нет	есть
IV	полное	да	одна	нет	есть
V	полное	нет	две	нет	есть
VI	полное	нет	две	есть	есть

Таблица 2. Местоположение датчиков давления 1–6 и фотодиодов L1 и L2 (в мм)

№ опыта	1	2	3	4	5	6	L1	L2
I	20	260	613	945	985	1317	945	1317
II	20	260	613	945	985	1317	945	1317
III	20	260	613	945	1277	1617	945	1277
IV	20	260	613	945	1277	1617	945	1277
V	20	613	945	1277	1617	1982	1277	1617
VI	20	260	613	945	1277	1617	945	1277

грешность определения скорости фронта составила 10%, с учетом поля зрения фотодиода).

В экспериментах изменяли энергию и мощность зажигающего импульса в форкамере (опыты с активацией и без активации зажигания), количество перфорированных перегородок в бустере (опыты с одной и с двумя перегородками), конфигурацию рабочей секции (опыты без препятствий-турбулизаторов и с их вставкой), а также конфигурацию сочленения бустера и рабочей секции (опыты с кольцевой диафрагмой и без нее).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для удобства изложения экспериментальных результатов в табл. 1 представлены условия некоторых представительных опытов (опыты I–VI), а в табл. 2 – данные о местоположении датчиков давления и фотодиодов в этих опытах (расстояние до датчика/фотодиода измеряется от внутренней стенки бустера со стороны форкамеры).

Цель опытов I и II – определить структуру волн давления на гладком участке рабочей секции трубы, т.е. без вставки с препятствиями-турбулизаторами. В опыте I (рис. 2а) в установку подава-

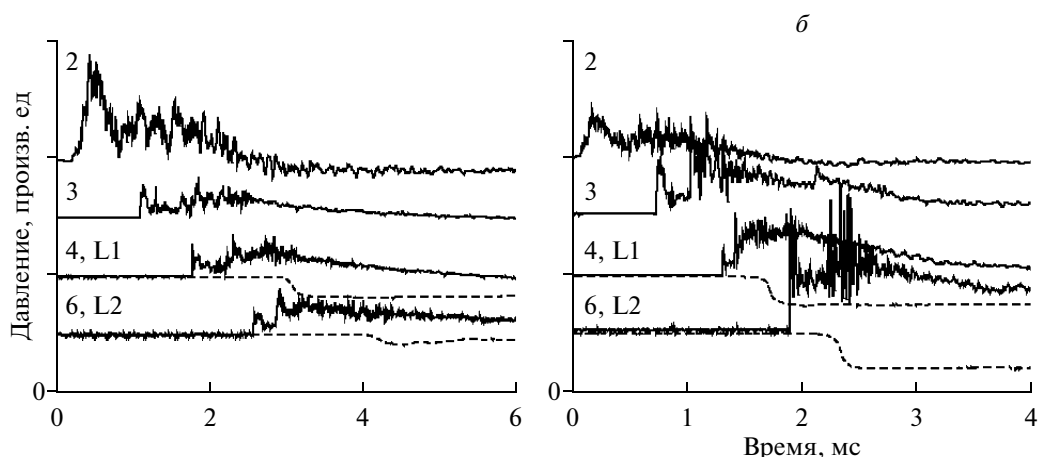


Рис. 2. Записи давления датчиками 2–4 и 6 (сплошные кривые) и свечения фотодиодами L1 и L2 (штриховые кривые) в опытах I (а) и II (б).

ли только стехиометрическую метанокислородную смесь (в количестве 0.1 л), так что перед зажиганием смесь находилась только в форкамере, а в бустере и в рабочей секции был воздух. В опыте II (рис. 2б) всю установку заполняли метановоздушной смесью, а для активации зажигания в форкамеру дополнительно вводили 0.1 л стехиометрической метанокислородной смеси.

Записи датчика давления 2 в бустере в опытах I и II (сигнал давления 2 на рис. 2) показывают достаточно быстрое (200–300 мкс) нарастание давления до максимума на начальной стадии процесса, которая соответствует сгоранию метанокислородной смеси в форкамере. За первичным пиком давления следует ступенчатое, но медленное (в среднем) вторичное повышение давления в течение приблизительно 1 мс за счет догорания непрореагировавшей метанокислородной смеси, вытесненной из форкамеры в объем бустера и смешавшейся с окружающим газом. Отметим, что здесь и далее начало отсчета времени зависит от опыта, т.е. при анализе результатов следует принимать во внимание только интервалы времени.

Структура волн давления, распространяющихся в рабочей секции трубы (сигналы давления 3–6 на рис. 2), во многом соответствует форме сигнала, зарегистрированного датчиком 2 в бустере. Здесь можно выделить первичную ударную волну и серию бегущих за ней вторичных волн давления, приводящих к ступенчатому, но медленному (в среднем) повышению давления.

Из сравнения рис. 2а и б следует, что первичная ударная волна образуется вследствие быстрого сгорания метанокислородной смеси в форкамере. В опыте I (рис. 2а) скорость первичной ударной волны в рабочей секции практически постоянна и составляет 400–450 м/с, тогда как в опыте II (рис. 2б) она увеличивается от 400–450 м/с в начале рабочей секции и до 600–650 м/с в ее конце. Поскольку серия вторичных волн давления регистрируется в рабочей секции и в опыте I (рис. 2а), и в опыте II (рис. 2б), их образование связано с истечением газа из форкамеры в бустер и из бустера в рабочую секцию.

В опыте I (рис. 2а) видимая скорость первой (в серии) вторичной волны давления, распространяющейся в спутном потоке газа за первичной ударной волной, составляет около 550–600 м/с. На сигналах давления 3, 4 и 6 (рис. 2а) за первой (в серии) вторичной волной отчетливо наблюдается еще один плавный максимум давления, соответствующий второй (в серии) вторичной волне давления. Интересно, что в конце рабочей секции (сигнал давления 6 на рис. 2а) первая вторичная волна превращается в относительно слабую ударную волну с крутым фронтом.

В опыте II (рис. 2б) сгорание смеси в бустере и в рабочей секции способствует существенному

усилению вторичных волн давления. Так, первая (в серии) вторичная волна давления превращается в ударную волну с крутым фронтом уже в начале рабочей секции (сигнал давления 3 на рис. 2б), а в конце этой секции она сливается с первичной ударной волной (кривая 6 на рис. 2б). На кривой для сигнала 4 (рис. 2б) за первой (в серии) вторичной ударной волной отчетливо наблюдается еще два плавных максимума давления, соответствующих второй и третьей (в серии) вторичным волнам. На кривой для сигнала 6 (рис. 2б) эти волны видны уже как вторичные ударные волны с крутым фронтом.

Рассмотрение записей фотодиодов (штриховые кривые на рис. 2) показывает, что средняя видимая скорость светящихся продуктов горения между датчиками L1 и L2 в опыте I составляет около 300 м/с, а в опыте II – 550–600 м/с. Интересно, что в опыте II положение фронта свечения практически совпадает с положением максимума давления в одной из вторичных волн (сравнить кривые для сигнала 4 и L1 на рис. 2б). В связи с этим отметим, что локальное самовоспламенение метановоздушной смеси в таких условиях маловероятно, а указанное положение фронта свечения скорее всего связано с положением фронта пламени.

Цель опытов III и IV – определить структуру волн давления в загроможденной рабочей секции, т.е. со вставкой с препятствиями-турбулизаторами. В обоих опытах первое препятствие-турбулизатор находилось на расстоянии 610 мм от начала бустера, а участок рабочей секции от бустера до первого препятствия-турбулизатора был гладким. Все остальные условия в опыте III были такими же, как в опыте I, а в опыте IV – как в опыте II. На указанном гладком участке рабочей секции в опытах I–IV картины течения оказались очень схожими и качественно, и количественно. Так, на рис. 3 показаны осциллограммы давления (зарегистрированные датчиками 3–6) и записи свечения (зарегистрированные фотодиодами L1 и L2) в опыте IV. Из сравнения рис. 3 с рис. 2б видно, что записи датчика давления 3 в опытах II и IV очень похожи. В обоих опытах средняя скорость первичной ударной волны на этом участке рабочей секции была на уровне 450–500 м/с.

Различия между сериями опытов I–II и III–IV возникают при рассмотрении картины течения на участке рабочей секции с препятствиями-турбулизаторами. Если при сравнении опытов I и III это различие сводится к некоторому ослаблению первичной ударной волны в опыте III вследствие потерь количества движения [24], то при сравнении опытов II и IV наблюдается существенное качественное различие. Действительно, на осциллограмме датчика 4 (см. рис. 3), расположенного внутри сборки препятствий-турбулизаторов, наблюда-

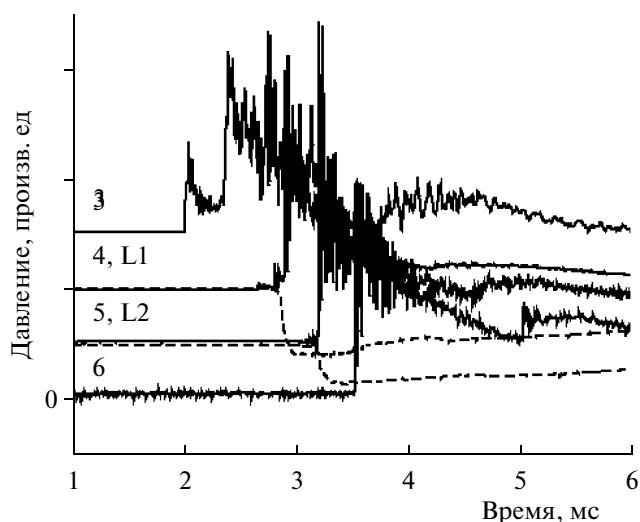


Рис. 3. Записи давления датчиками 3–6 (сплошные кривые) и свечения фотодиодами L1 и L2 (штриховые кривые) в опыте IV.

ется резкое повышение давления в первичной ударной волне, вызванное слиянием с интенсивной вторичной волной. При этом амплитуда образованной ударной волны приблизительно на порядок превышает амплитуду первичной ударной волны на гладком участке рабочей секции. Такая волна может возникнуть только при локальном взрыве значительного объема смеси. Причиной взрыва может быть либо быстрое сгорание сильно турбулизованного объема смеси вблизи препятствий при контакте с распространяющимся пламенем, либо локальное самовоспламенение смеси при многократных отражениях ударной волны от препятствий. По нашему мнению, тот факт, что фронт ударной волны (сигналы давления 4 и 5 на рис. 3) практически совпадает с фронтом свечения (сигналы L1 и L2), больше свидетельствует в пользу второго механизма – локального самовоспламенения смеси при многократных отражениях ударной волны от препятствий. Другими словами, комплекс “ударная волна – зона реакции” здесь распространяется по механизму детонации в шероховатых трубах [19–22]. Анализ осциллограмм давления на рис. 3 показывает, что в сборке препятствий-турбулизаторов такой комплекс ускоряется до ~ 1000 м/с.

В опытах I–IV инициирование первичной ударной волны происходило благодаря использованию небольшого количества метанохлоридной смеси, подаваемой в форкамеру. Возникает вопрос: возможны ли такие взрывные процессы, как, например процесс, изображенный на рис. 3, при зажигании стехиометрической метановоздушной смеси без активации? Для ответа на этот вопрос рассмотрим результаты опыта V (см. табл. 1).

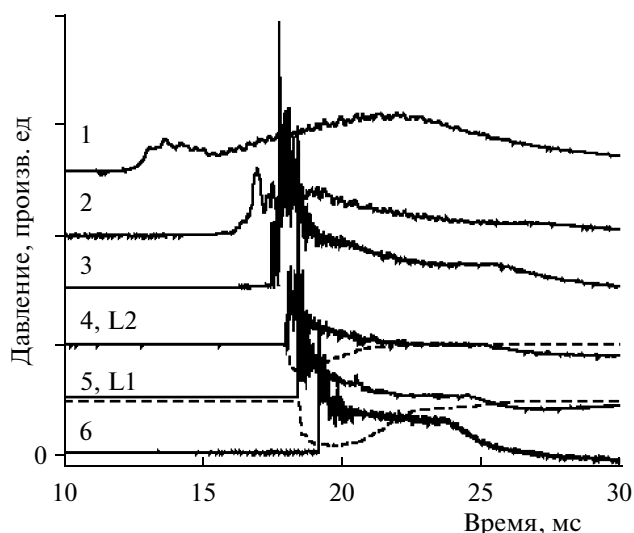


Рис. 4. Записи давления датчиками 1–6 (сплошные кривые) и свечения фотодиодами L1 и L2 (штриховые кривые) в опыте V.

В опыте V установку перед зажиганием продували стехиометрической метановоздушной смесью, но в отличие от опытов II и IV использовали форкамеру объемом 0.37 л и метанохлоридную смесь в форкамеру не подавали. Другое отличие условий опыта V от условий опытов II и IV – наличие второй перфорированной перегородки в бустере, предназначенной для интенсификации сгорания смеси.

На рис. 4 показаны осциллограммы давления (зарегистрированные датчиками 1–6) и записи свечения (зарегистрированные фотодиодами L1 и L2) в опыте V. Видно, что в этом опыте интенсивная ударная волна возникает в самом начале участка рабочей секции с препятствиями-турбулизаторами (датчик 3), а внутри этого участка (между датчиками 3 и 4) ее скорость достигает ~ 1400 м/с. Момент прихода ударной волны на датчик 4 (см. рис. 4) практически совпадает с моментом отклонения сигнала свечения на фотодиоде L1, расположенном в том же сечении рабочей секции, т.е. комплекс “ударная волна – зона реакции” здесь распространяется по механизму детонации в шероховатых трубах с локальным самовоспламенением смеси при многократных отражениях ударной волны от препятствий.

После того как ударная волна выходит из участка с препятствиями-турбулизаторами на гладкий участок рабочей секции, скорость ее распространения быстро уменьшается до 850–900 м/с и далее остается приблизительно постоянной. Такое падение скорости волны связано с изменением условий протекания химических превращений за ударным фронтом: на гладком участке рабочей секции нет локального самовоспламенения смеси при многократных отражениях ударной волны от препят-

ствий. Интересно, что момент прихода ударной волны на датчик 5 (см. рис. 4) также практически совпадает с моментом отклонения сигнала свечения на фотодиоде L2, расположенном в том же сечении гладкого участка рабочей секции. По нашему мнению, причина, по которой комплекс “ударная волна – зона реакции” продолжает распространяться по механизму детонации в шероховатых трубах, связана с существенной неоднородностью течения в гладкой трубе после выхода ударной волны из секции с препятствиями-турбулизаторами. Быстрое самовоспламенение смеси за фронтом волны у стенок трубы могло быть связано с продолжающимися некоторое время отражениями поперечных ударных волн, которые неизбежно делают сам фронт волны существенно неоднородным.

Таким образом, высокоскоростной комплекс “ударная волна – зона реакции” может формироваться и распространяться в стехиометрической метановоздушной смеси даже без активации зажигания с помощью малого количества метано-кислородной смеси. Для наблюдения такого комплекса в опыте V понадобилось лишь увеличить скорость горения смеси в бустере за счет размещения дополнительной перфорированной перегородки.

В опыте VI (см. табл. 1) между бустером и рабочей секцией установили кольцевую диафрагму, уменьшающую площадь проходного сечения на 67%, а все другие условия оставили такими же, как в опыте V. Цель опыта VI – изучить влияние линейной скорости истечения газов из бустера (и, следовательно, уровня турбулентности свежей смеси в рабочей секции) на динамику формирования высокоскоростного комплекса “ударная волна – зона реакции”. Результаты опыта VI представлены на рис. 5. В отличие от опыта V в опыте VI в участок с препятствиями-турбулизаторами входит не волна с ярко выраженным ударным фронтом (см. рис. 4), а волна с относительно плавным нарастанием давления. Тем не менее внутри участка с препятствиями-турбулизаторами эта волна трансформируется в ударную волну и распространяется со скоростью ~1300 м/с. Интересно, что в отличие от опыта V в опыте VI фронт свечения (сигнал фотодиода L1 на рис. 5) в месте расположения датчика давления 4 отстает от ведущего ударного фронта на ~500 мкс. Это означает, что в образованном высокоскоростном комплексе “ударная волна – зона реакции”, по-видимому, изменился механизм распространения зоны реакции: она распространяется благодаря быстрому сгоранию сильно турбулизованного объема свежей смеси вблизи препятствий при контакте с распространяющимся турбулентным пламенем. Как и в опыте V, в опыте VI скорость ударной волны после выхода на гладкий участок рабочей секции уменьшилась с ~1300 м/с до 850–900 м/с. При этом

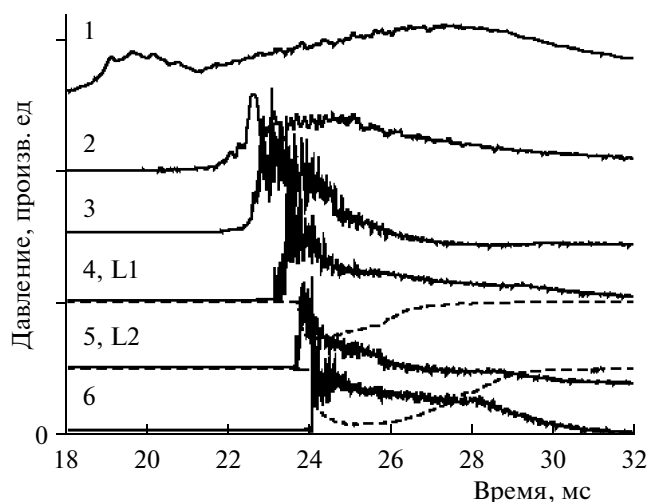


Рис. 5. Записи давления датчиками 1–6 (сплошные кривые) и свечения фотодиодами L1 и L2 (штриховые кривые) в опыте VI.

отставание зоны реакции (сигнал фотодиода L2 на рис. 5) от ударного фронта (сигнал датчика давления на рис. 5) сохранилось на уровне ~500 мкс.

Результаты опыта VI указывают на то, что увеличение линейной скорости течения и уровня турбулентности в свежей смеси способствует ускорению процесса возникновения опасных режимов горения метановоздушных смесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что комбинированный эффект ускорения течения за счет перехода процесса горения из трубы большего диаметра (бустера) в трубу меньшего диаметра (рабочую секцию) и за счет препятствий-турбулизаторов существенно сокращает расстояние формирования комплекса “ударная волна – зона реакции” в стехиометрической метановоздушной смеси: такой комплекс может сформироваться в трубе с препятствиями-турбулизаторами на расстояниях ~1 м (~14 калибров рабочей секции) от источника зажигания и может распространяться в такой трубе со скоростью 1300–1400 м/с. После выхода комплекса “ударная волна – зона реакции” из участка трубы с препятствиями-турбулизаторами на гладкий участок он может далее распространяться со скоростью 850–900 м/с без существенного затухания, по крайней мере, на расстоянии 0.5–1 м.

Следует подчеркнуть, что в опытах с трубами постоянного диаметра в 174 и 520 мм и регулярными препятствиями-турбулизаторами [14] уровень скорости в 1300–1400 м/с достигался на расстояниях в 40 и 30 калибров трубы соответственно, что в 2–3 раза больше, чем в наших опытах. Далее, опыты [20] с перепуском нормальной газо-

вой детонации в трубу постоянного диаметра со спиралью Щелкина показали, что в такой трубе скорость комплекса “ударная волна — зона реакции” устанавливается на уровне, не превышающем 1000 м/с. Все это означает, что переходные процессы горения в системах, содержащих сообщающиеся каналы разного диаметра и препятствия-турбулизаторы, могут быть более опасными и разрушительными, чем процессы горения в загроможденных трубах постоянного диаметра.

Работа выполнена при поддержке Министерством образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.526.12.6018 “Разработка высокоскоростной энергосберегающей импульсно-детонационной газовой горелки для повышения эффективности тепловой работы промышленных печей и теплоэнергетических установок”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов А.А., Лобань С.А. // Физика горения взрыва. 1977. № 5. С. 729.
2. Knystautas R., Guirao C., Lee J.H., Sulmistras A. // Progress in Astronaut. and Aeronaut. 1984. V. 94. P. 23.
3. Фролов С.М., Аксенов В.С., Скрипник А.А. // Докл. РАН. 2011. Т. 436. № 3. С. 346.
4. Wolanski P., Kauman C.W., Sichel M., Nicholls J.A. // Proc. Combust. Inst. 1981. V. 18. P. 1651.
5. Когарко С.М. // ЖТФ. 1958. Т. 28. № 9. С. 2072.
6. Borisov A.A. // Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Applications / Eds. Roy G., Frolov S., Kailasanath K., Smirnov N. Moscow: ENAS Publ., 1999. P. 3.
7. Bartknecht W. Explosion. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1981.
8. Щелкин К.И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М.: Воениздат, 1949.
9. Lindstedt R.P., Michels H.J. // Combust. and Flame. 1989. V. 76. P. 169.
10. Matsui H. // J. de Phys. IV. 2002. V. 76. P. Pr7.
11. Vasil'ev A.A. // Confined detonations and pulse detonation engines / Eds. Roy G., Frolov S., Santoro R., Tsyganov S. M.: Torus Press, 2003. P. 41.
12. Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С., Медведев С.Н., Сметанюк В.А., Авдеев К.А., Фролов Ф.С. // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 7. С. 77.
13. Kuznetsov M., Alekseev V., Matsukov I., Kim T.H. // Proc. 8th ISHPMIE. Jokohama, Japan, 2010. Paper № ISH-118.
14. Kuznetsov M., Ciccarelli G., Dorofeev S. et al. // Shock Waves. 2002. V. 12. P. 215.
15. Фролов С.М., Аксенов В.С., Авдеев К.А., Борисов А.А., Гусев П.А., Иванов В.С., Коваль А.С., Медведев С.Н., Сметанюк В.А., Фролов Ф.С., Шамшин И.О. // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 6. С. 669.
16. Фролов С.М., Аксенов В.С., Авдеев К.А., Борисов А.А., Иванов В.С., Коваль А.С., Медведев С.Н., Сметанюк В.А., Фролов Ф.С., Шамшин И.О. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 3. С. 39.
17. Zipf R.K., Gamezo V.N., Sapko M.J. et al. // J. Loss Prevention in the Process Industries. 2013. V. 26. P. 295.
18. Фролов С.М. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31.
19. Lee J.H.S., Knystautas R., Feiman A. // Combust. and Flame. 1984. V. 56. P. 227.
20. Зельдович Я.Б., Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Хомик С.В., Маилков А.Е. // Докл. АН СССР. 1984. Т. 279. № 6. С. 1359.
21. Зельдович Я. Б., Гельфанд Б. Е., Каждан Я. М., Фролов С.М. // Физика горения взрыва. 1986. № 3. С. 103.
22. Gelfand B.E., Frolov S.M., Nettleton M.A. // Progr. Energy Combust. Sci. 1991. V. 17. № 4. P. 327.
23. Фролов С.М. // Тяжелое машиностроение. 2003. № 9. С. 18.
24. Гельфанд Б.Е., Фролов С.М., Медведев С.П. // Физика горения взрыва. 1990. Т. 26. № 3. С. 91.