

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСИ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ВОЗДУХОМ В ТРУБЕ С ФОКУСИРУЮЩИМ СОПЛОМ

© 2011 г. С. М. Фролов, В. С. Аксенов, А. А. Скрипник

Представлено академиком А.А. Берлиным 24.08.2010 г.

Поступило 27.08.2010 г.

Экспериментально впервые показано, что установка в трубе осесимметричного сопла специальной формы позволяет обеспечить переход ударной волны (УВ) в детонацию в стехиометрической смеси природного газа с воздухом при нормальных условиях и скорости УВ на входе в сопло выше 1150 ± 30 м/с, что приблизительно соответствует числу Маха 3.3. Полученный результат важен для разработки горелочных устройств нового поколения, работающих на импульсно-детонационном (ИД) горении природного газа, а также для более глубокого понимания динамики аварийных газовых взрывов в горных выработках.

Существующие камеры сгорания промышленных горелочных устройств, работающие на медленном сжигании природного газа при небольших избыточных давлениях, имеют фундаментальные ограничения на теплонапряженность. Считается [1], что использование ИД-горения природного газа снимет эти ограничения и существенно увеличит производительность и эффективность энергетических установок. В горелочных ИД-устройствах (горелках) рабочий процесс будет проходить в режиме самовоспламенения при высоких давлениях и температурах в бегущей детонационной волне. Это обеспечит значительное (в сотни раз) повышение мощности энерговыделения, температуры горения (на 30–50%) и максимальной скорости продуктов горения (в 15–20 раз). Кроме того, ожидается, что, вследствие очень короткого (~1 мс) периода сгорания природного газа в циклическом рабочем процессе, в ИД-горелках будут достигаться низкие эмиссионные показатели оксидов азота.

Управляемое ИД-горение природного газа в воздухе может получить широкое практическое применение только при успешном решении задачи инициирования детонации с помощью слабых источников зажигания (с энергией ~1 Дж и менее). Дело в том, что детонационная способность

таких смесей чрезвычайно низка. Критический диаметр трубы, в которой смесь метана с воздухом может детонировать при нормальных условиях, близок к 100 мм [2, 3]. Энергия прямого инициирования детонации в таких трубах достигает 10 МДж/м² [4]. Расстояния, требуемые для перехода горения в детонацию (ПГД) при слабом источнике зажигания, составляют десятки метров даже в трубах со специальными турбулизирующими устройствами (препятствиями) [5]. Очевидно, что для использования в энергетике прямое инициирование детонации не применимо, а преддетонационные расстояния для ПГД в каналах с турбулизирующими устройствами слишком велики. Следовательно, требуются новые подходы к резкому сокращению преддетонационных расстояний при слабом инициировании процесса горения.

Один из таких подходов – организация быстрого ПГД путем целенаправленного ускорения пламени до образования относительно слабой УВ с ее последующей газодинамической фокусировкой [6]. В работе [7] концепция [6] была успешно применена для организации быстрого перехода УВ в детонацию в прямой трубе, заполненной стехиометрической пропано-воздушной смесью. При этом в качестве фокусирующего устройства использовали осесимметричное суживающе-расширяющееся сопло специальной формы. В [7] экспериментально показано, что установка в трубе фокусирующего сопла обеспечивает переход УВ в детонацию при ее скорости на входе в сопло выше 680 ± 20 м/с, что приблизительно соответствует числу Маха 2.0.

Цель данной работы – экспериментальное исследование быстрого перехода слабой УВ в детонацию в стехиометрической смеси природного газа с воздухом в прямой трубе с фокусирующим соплом.

Эксперименты проводили в прямой круглой трубе длиной 4500 мм и диаметром 94 мм (рис. 1), выполненной из нержавеющей стали. Труба состояла из двух секций, разделенных мембранным

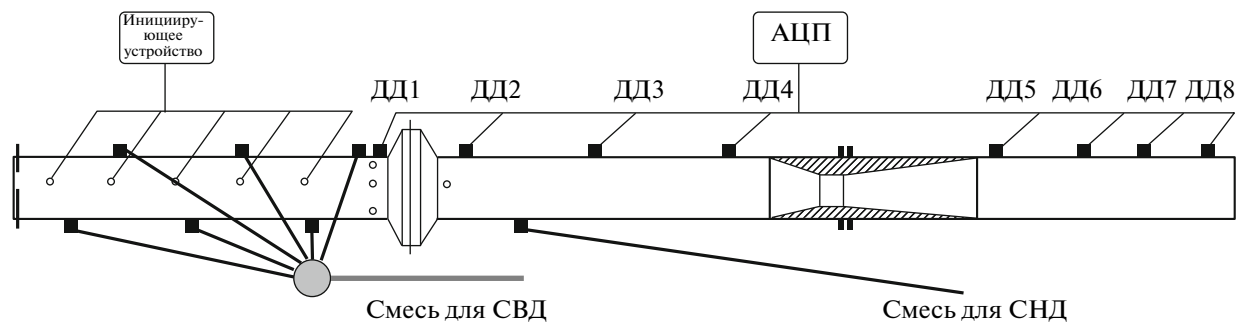


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

узлом: секции низкого давления (СНД) длиной 3400 мм и секции высокого давления (СВД) длиной 1000 мм. Один конец СНД был закрыт разрывной металлической мембраной, а другой – открыт в атмосферу. Перед опытом СНД продували пятикратным объемом стехиометрической взрывчатой смеси природный газ–воздух, подготовленной методом парциальных давлений в смесителе объемом 40 л с принудительным перемешиванием. Используемый природный газ, применяемый в качестве моторного топлива, содержал 98.9% метана.

Разрывные мембраны выполняли из отожженной меди толщиной 0.2 и 0.4 мм. Перед опытом мембрану надрезали с помощью специальной оснастки для управления давлением ее разрыва. Избыточного давления разрыва мембраны в СВД достигали сжиганием стехиометрической взрывчатой смеси природный газ–воздух при начальной температуре 293 ± 2 К и повышенном начальном давлении P_n . Для этой цели перед опытом СВД вакуумировали, а затем составляли в ней смесь методом парциальных давлений. Чтобы повысить однородность смешения и скорость нарастания давления в СВД, секцию оборудовали шестью отверстиями для подачи компонентов смеси и шестью автомобильными свечами зажигания, равномерно распределенными по ее длине.

В СНД на расстоянии 1600 мм от мембраны устанавливали профилированное препятствие – сопло, состоящее из суживающейся конической секции длиной 40 мм, цилиндрической втулки длиной 100 мм и расширяющейся конической секции длиной 430 мм. Диаметр минимального сечения сопла и втулки – 47 мм. Профиль суживающейся конической секции, предназначенной для газодинамической фокусировки УВ, соответствовал параболическому профилю, используемому в экспериментах [7] с соответствующим масштабированием на другой диаметр трубы. Цилиндрическая втулка обеспечивала энерговыделение за прошедшей УВ при сохранении высокой плотности реагирующей смеси [8]. Расширяющая-

ся коническая секция представляла собой прямой конус с углом раствора 6° .

Для регистрации профилей давления и скорости УВ в трубе размещали высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления ДД1–ДД8 типа ЛХ604 на следующих расстояниях от среза отверстия мембранного узла:

Датчик	ДД1	ДД2	ДД3	ДД4	ДД5	ДД6	ДД7	ДД8
Расстояние, мм	–100	593	994	1386	2188	2600	3000	3400

Сигналы всех датчиков регистрировали персональным компьютером с помощью усилителей и аналого-цифрового преобразователя USB 3000.

Методика исследований заключалась в следующем. Сначала провели калибровочные опыты для определения характеристик УВ в экспериментальной установке без фокусирующего сопла и с соплом. В этих опытах СНД продували чистым воздухом. Выяснилось, что для получения УВ с числом Маха 2.6–3.5 начальное давление взрывчатой смеси природного газа с воздухом в СВД необходимо было повысить до уровня $P_n = 6.5–8.3$ атм. Как и ожидалось, в опытах с соплом интенсивность УВ после прохождения сопла несколько уменьшалась.

Затем провели серию опытов с продувкой СНД не воздухом, а стехиометрической смесью природного газа с воздухом при прочих равных условиях. Эти опыты проводили без фокусирующего сопла. Выяснилось, что получаемые ударные волны не способны инициировать детонацию исследуемой смеси, по крайней мере в СНД выбранной длины.

Наконец, провели серию опытов с фокусирующим соплом и с продувкой СНД стехиометрической смесью природного газа с воздухом. В этой серии опытов зарегистрирован переход УВ в детонацию.

В табл. 1 приведены результаты 11 представительных опытов в виде значений средней скорости лидирующего фронта УВ на 7 измерительных

Таблица 1. Средняя скорость УВ (м/с) на разных измерительных базах в 11 представительных опытах

Опыт	Измерительная база							Примечание
	ДД1–ДД2	ДД2–ДД3	ДД3–ДД4	ДД4–ДД5	ДД5–ДД6	ДД6–ДД7	ДД7–ДД8	
1	1226	1122	1150	1709	1661	2000	1744	Детонация
2	1192	1114	1162	1680	1884	1744	1898	То же
3	1238	1193	1278	1769	1884	1808	1852	»
4	1176	1082	1146	1661	1471	1328	1200	Вторичные взрывы
5	1255	1175	1131	1566	1343	1261	1172	То же
6	1255	1059	1097	1617	1379	1402	1200	»
7	1209	1090	1122	1600	1486	1402	1220	»
8	797	895	992	993	984	1027	1042	Дифракция УВ
9	716	737	907	973	1066	993	980	То же
10	670	787	868	752	883	1389	1282	Вторичные взрывы
11	1048	934	1000	708	1932	1613	1415	То же

Примечание. Полужирным шрифтом выделены значения средней скорости лидирующей УВ внутри сопла.

базах ДД1–ДД2, ДД2–ДД3, ДД3–ДД4, ДД4–ДД5, ДД5–ДД6, ДД6–ДД7 и ДД7–ДД8. Среднюю скорость лидирующей УВ на каждой измерительной базе определяли по расстоянию между датчиками давления и интервалу времени между приходами фронта УВ на соответствующие датчики давления по осциллограмме. Погрешность определения средней скорости УВ не превышала 3%. Фокусирующее сопло находилось внутри измерительной базы ДД4–ДД5.

На рис. 2 показаны результаты опытов 1–9 из табл. 1. Вертикальной штриховой линией на от-

метке 1600 мм показано расположение входного сечения суживающейся части сопла. Верхняя штриховая горизонтальная линия соответствует скорости детонации Чепмена–Жуге (ЧЖ) ~1800 м/с. Из этого рисунка видно, что существует некоторое минимальное (критическое) значение средней скорости лидирующей УВ на входе в сопло (нижняя штриховая горизонтальная линия), при котором в трубе происходит инициирование детонации, т.е. переход УВ в детонацию носит пороговый характер. Полученное значение критической скорости для СНД длиной 3400 мм и диаметром

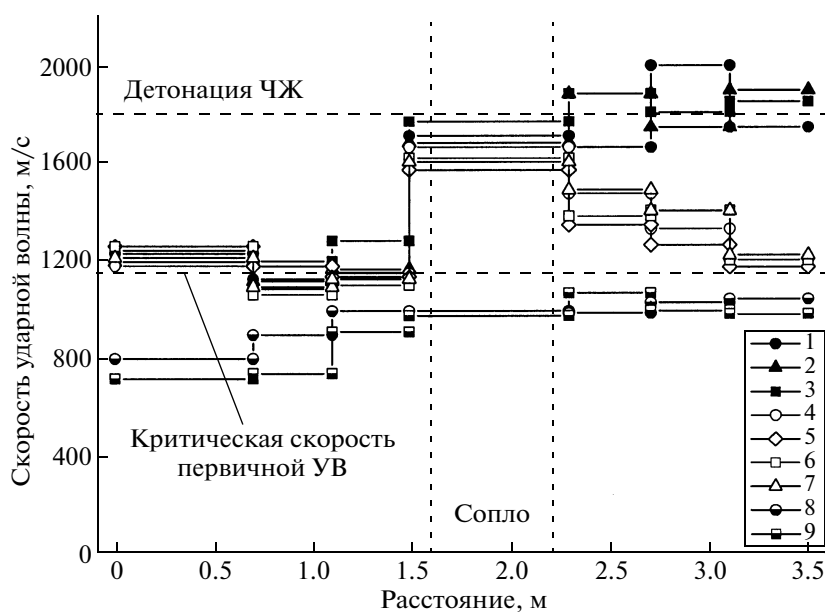


Рис. 2. Зависимость средней скорости лидирующего ударного фронта от пройденного расстояния на разных измерительных базах в представительных опытах 1–9 (табл. 1).

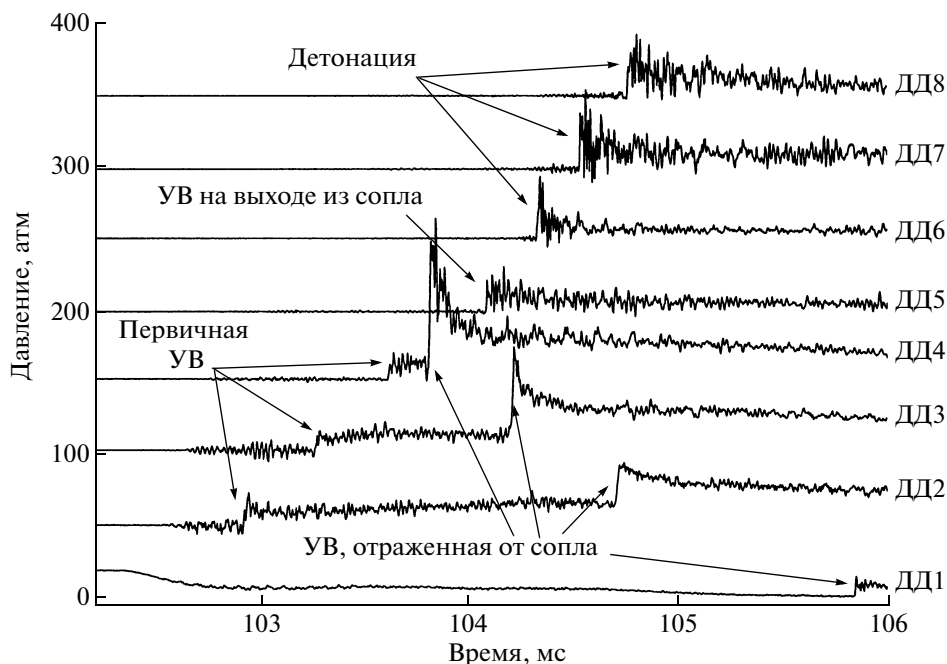


Рис. 3. Записи давления на датчиках ДД1–ДД8 в опыте 1 с расшифровкой волновых явлений.

94 мм равно 1150 ± 30 м/с. Для стехиометрической метано-воздушной смеси при нормальных условиях эта скорость соответствует числу Маха ~ 3.3 .

При средней скорости УВ на входе в сопло, существенно меньшей указанного критического значения, детонация не возникала (опыты 8 и 9 в табл. 1). В этом случае при дифракции УВ в сопле не было никаких признаков возникновения вторичных взрывных явлений ни внутри сопла, ни за его пределами.

При средней скорости УВ на входе в сопло, большей указанного критического значения, внутри сопла происходил переход УВ в детонацию (опыты 1–3 в табл. 1).

В опытах со средней скоростью УВ на входе в сопло, немного меньшей критического значения, в сопле происходили вторичные взрывные явления, не приводящие к детонации (опыты 4–7 в табл. 1). В этом случае вторичные волны сливались с лидирующим фронтом УВ внутри сопла, приводя к возникновению достаточно сильной результирующей взрывной волны. Однако после выхода из сопла такая волна затухала. Кроме того, при таких условиях наблюдали режимы с запаздывающим вторичным взрывом. Для примера в табл. 1 приведены результаты двух опытов (опыты 10 и 11), в которых средняя скорость лидирующей УВ скачкообразно возрастает лишь после выхода УВ из сопла. Скачок средней скорости лидирующей УВ вызван слиянием со вторичной взрывной волной, возникшей внутри сопла.

На рис. 3 показаны записи давления на датчиках ДД1–ДД8 в одном из опытов с инициированием детонации (опыт 1 в табл. 1) с расшифровкой волновых явлений. Погрешность измерения давления оценивалась как 30%. Из записи датчиков ДД1–ДД3 на этом рисунке видно, что избыточное давление в первичной УВ постоянно и длительность фазы сжатия в ней составляет по крайней мере 1.7 мс (в сечении датчика ДД2). Средняя скорость первичной УВ на входе в сопло в опыте 1 равна 1150 ± 30 м/с. В момент времени ~ 103.8 мс датчик ДД4, расположенный на расстоянии 214 мм от входа в сопло, регистрирует ударный фронт большой интенсивности, соответствующий УВ, отраженной от стенок суживающейся части сопла. Датчик ДД5, расположенный на расстоянии 18 мм от выходного сечения сопла, регистрирует детонационную волну. Средняя скорость волны внутри сопла несколько ниже скорости детонации ЧЖ (1709 ± 50 м/с). На измерительных базах ДД5–ДД6, ДД6–ДД7 и ДД7–ДД8 также регистрировалась детонация, распространявшаяся квазистационарно со средней скоростью 1600 ± 50 , 2000 ± 60 и 1740 ± 50 м/с соответственно. Наблюдаемый небольшой дефицит скорости детонации (~ 100 – 150 м/с) по сравнению с термодинамическим значением объясняется близостью диаметра трубы к предельному диаметру, при котором еще возможно распространение детонации.

Таким образом, в работе впервые экспериментально показано, что для инициирования детонации

ции ударной волной в стехиометрической смеси природного газа с воздухом в трубе с фокусирующим соплом скорость УВ должна превышать 1150 ± 30 м/с. Таковую УВ можно получить, например, заменив СВД в используемой экспериментальной установке и участок трубы перед соплом на секцию трубы с турбулизирующими препятствиями [9]. Полученный результат важен для разработки горелочных устройств нового поколения, работающих на ИД-горении природного газа, а также для более глубокого понимания динамики аварийных газовых взрывов в горных выработках. В последнем случае роль турбулизирующих препятствий могут играть крепежные элементы, а роль фокусирующих устройств – повороты, разветвления и сужения галерей горных выработок.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (государственный контракт 02.516.12.6026 “Разработка процесса импульсного детонационного горения природного газа для повышения эффективности работы энергетических установок”, государственный контракт П502 “Разработка методов численного моделирования нестационарного горения и детонации газов и капельных смесей в каналах сложной геометрии и полуограниченных объемах для применения в импульсно-детонационных энергетических установках”), а

также при поддержке РФФИ (грант 08–08–00068) и Президиума РАН (программа фундаментальных исследований № 11).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.М. // Тяжелое машиностроение. 2003. № 9. С. 18–22.
2. Борисов А.А., Лобань С.А. // ФГВ. 1977. № 5. С. 729–734.
3. Knystautas R., Guirao C., Lee J.H., Sulmistras A. // Progress Astronaut. and Aeronaut. 1984. V. 94. P. 23–37.
4. Borisov A.A. Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Applications. Moscow: ENAS Publ., 1999. P. 3–24.
5. Higgins A.J., Pinard P., Yoshinaka A.C., Lee J.H.S. High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control. Moscow: ELEX–KM Publ., 2001. P. 45–62.
6. Фролов С.М. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
7. Фролов С.М., Аксенов В.С. // ДАН. 2009. Т. 427. № 3. С. 344–347.
8. Фролов С.М., Аксенов В.С., Берлин А.А. Заявка на патент РФ № 2010107752 от 04.03.2010.
9. Фролов С.М., Аксенов В.С., Берлин А.А. Заявка на патент РФ № 2010107750 от 04.03.2010.