

**ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ
С РАЗДЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ****© 2013 г. С. М. Фролов, В. С. Аксенов, К. А. Авдеев, А. А. Борисов, В. С. Иванов,
А. С. Коваль, С. Н. Медведев, В. А. Сметанюк, Ф. С. Фролов, И. О. Шамшин**

Представлено академиком А.А. Берлиным 02.10.2012 г.

Поступило 02.10.2012 г.

DOI: 10.7868/S086956521312013X

В работе [1] сообщалось о создании экспериментального образца импульсно-детонационного горелочного устройства (ИДГУ) на природном газе — прообразе промышленных горелочных устройств нового поколения, не имеющих мировых аналогов. На образце ИДГУ в [1] проведены экспериментальные исследования низкочастотного (0.03 Гц) циклического управляемого перехода горения в детонацию (ПГД) при раздельной непрерывной подаче природного газа и воздуха с относительно низкой скоростью (~0.5–1.0 м/с). Важнейшее достижение [1] — организация “быстрого” ПГД [2] в прямой трубе диаметром 94 мм благодаря тщательным подборам формы и расстановке препятствий-турбулизаторов, обеспечивающих оптимальное согласование темпов ускорения пламени и усиления ударной волны.

В настоящей работе впервые экспериментально доказана возможность “быстрого” ПГД в условиях раздельной подачи топливных компонентов — природного газа и воздуха — с существенно большими, чем в [1], скоростями (~10 м/с), что позволит значительно увеличить рабочую частоту и тепловую мощность перспективных ИДГУ.

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из двух сопряженных секций смесительно-зажигающего устройства (СЗУ) с искровым источником зажигания (энергия зажигания ~1 Дж) и прямой детонационной трубы диаметром 150 мм и длиной 5500 мм с препятствиями специальной формы и расстановки. Конструкция секций и детали их сопряжения, а также форма и расстановка препятствий — предметы патентования, и здесь не обсуждаются.

Конец детонационной трубы был открыт. Участок трубы длиной 2000 мм, примыкающий к открытому концу, был гладким, т.е. препятствия в нем отсутствовали. Природный газ и атмосферный воздух непрерывно подавали в установку через раздельные магистрали: природный газ подавался из ресивера объемом 200 л с избыточным давлением 0.3 атм, а воздух — с помощью вихревой воздуходувки SCL-K11TS. Воздуходувка обеспечивала расход воздуха до 500 л/с. Расход газов регулировали таким образом, чтобы получить стехиометрический состав смеси. Используемый природный газ содержал 98.9% метана (“моторный” газ).

В эксперименте регистрировали следующие параметры процесса: давление в СЗУ (с помощью низкочастотных датчиков давления типа КАРАТ-ДИ60), давление в разных измерительных сечениях детонационной трубы (с помощью высокочастотных пьезоэлектрических датчиков давления типа РСВ113А23); а также свечение продуктов горения в разных измерительных сечениях детонационной трубы (с помощью фотодатчиков на базе фотодиодов типа ФД-256). Сигналы датчиков и фотодиодов регистрировали персональным компьютером с помощью усилителей и аналогово-цифровых преобразователей.

В табл. 1 представлены расстояния (X) датчиков давления 1–12 от начала детонационной трубы. Датчики 9–12 располагали в гладкой секции трубы. Среднюю скорость волны давления или ударной волны ($УВ$) на каждой измерительной базе между соседними датчиками давления в детонационной трубе определяли по расстоянию между датчиками и интервалу времени между приходом фронта $УВ$ на соответствующий датчик по осциллограмме. Погрешность определения средней скорости $УВ$ не превышала 3%. Детонацию главным образом идентифицировали по трем признакам: 1) по величине скорости (1600 м/с и выше)

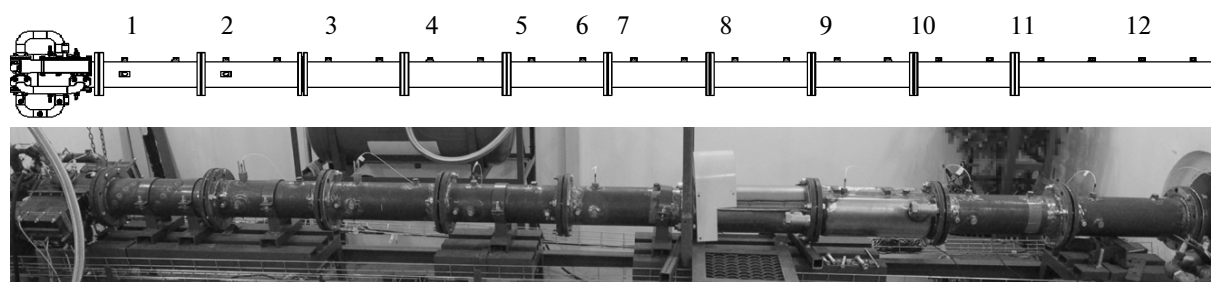


Рис. 1. Схема и фотография экспериментальной установки.
1–12 – датчики давления.

квазистационарной УВ в гладкой секции трубы на измерительной базе, 2) по уровню давления (30 атм и выше), регистрируемого датчиком, 3) по характерным следовым отпечаткам на закопченной фольге (шаг спина 400–500 мм), вставляемой через открытый конец внутрь детонационной трубы. В некоторых случаях для идентификации детонации использовали записи фотодатчиков, установленных в одном сечении с датчиками давления. В этих случаях детонации соответствовали режимы с одновременным резким отклонением сигналов фотодатчика и датчика давления.

Важнейший результат работы – доказательство возможности “быстрого” ПГД в условиях высокоскоростного течения (~ 10 м/с) при раздельной подаче топливных компонентов. Показано, что в такой трубе при использовании препятствий-турбулизаторов специальной формы и расстановки можно обеспечить надежный ПГД на расстоянии 3–4 м от источника зажигания за время 15–16 мс с момента зажигания.

На рис. 2 представлены осциллограммы давления (p) и фотография сажевого отпечатка в одном из опытов с “быстрым” ПГД. Нумерация датчиков соответствует нумерации в табл. 1. Видно, что “взрыв во взрыве” (по терминологии [3]) происходит между датчиками 6 и 7, расположенными на расстоянии 2372 и 2623 мм от источника зажигания, через ~ 14.5 мс после зажигания. Взрыв происходит между УВ-предвестником и пламенем, приводят к образованию пересжатой детонационной волны, бегущей по направлению к открытому концу трубы, и ретонационной волны, бегущей по направлению к источнику зажигания. В окрестности датчика 9 (на расстоянии ~ 3622 мм)

пересжатая детонационная волна догоняет УВ-предвестник, и формируется волна самоподдерживающейся детонации, которая распространяется в гладкой секции трубы (на длине ~ 1900 мм) квазистационарно со средней скоростью 1600–1700 м/с. На рис. 3 показана эволюция средней скорости УВ по длине детонационной трубы (X) в трех опытах при одинаковых начальных условиях. Точки на кривых соответствуют положению датчиков давления (2–12).

Наблюдаемый режим детонации следует рассматривать как околопредельный. Во-первых, дефицит средней скорости 100–200 м/с по отношению к термодинамическому значению для стехиометрической метано-воздушной смеси (≈ 1800 м/с, рис. 3) хорошо согласуется с допустимым дефицитом скорости детонации на пределе распространения в гладкой трубе. Во-вторых, структура волны на гладком участке трубы (рис. 2) соответствует структуре спиновой детонации с характерными слабозатухающими колебаниями сигнала. Так, частота колебаний за фронтом волны приблизительно равна 3.7 кГц. Эта частота хорошо согласуется с известным эвристическим правилом $s/d \approx 3$, где s – шаг спина, а d – диаметр трубы. Действительно, согласно этому правилу шаг спина в трубе диаметром 150 мм должен составить $s \approx 450$ мм, и при средней скорости спиновой детонации $D \approx 1600$ –1700 м/с характерная частота пульсаций $D/s \approx 3.6$ –3.8 кГц.

Возможную частоту работы экспериментальной установки в импульсно-детонационном режиме можно оценить, исходя из следующих соображений. Поскольку скорость заполнения детонационной трубы топливно-воздушной смесью

Таблица 1. Расстояния датчиков давления от начала детонационной трубы

Датчик	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X , мм	124	624	1123	1623	2122	2372	2623	3123	3622	4120	4462	5122

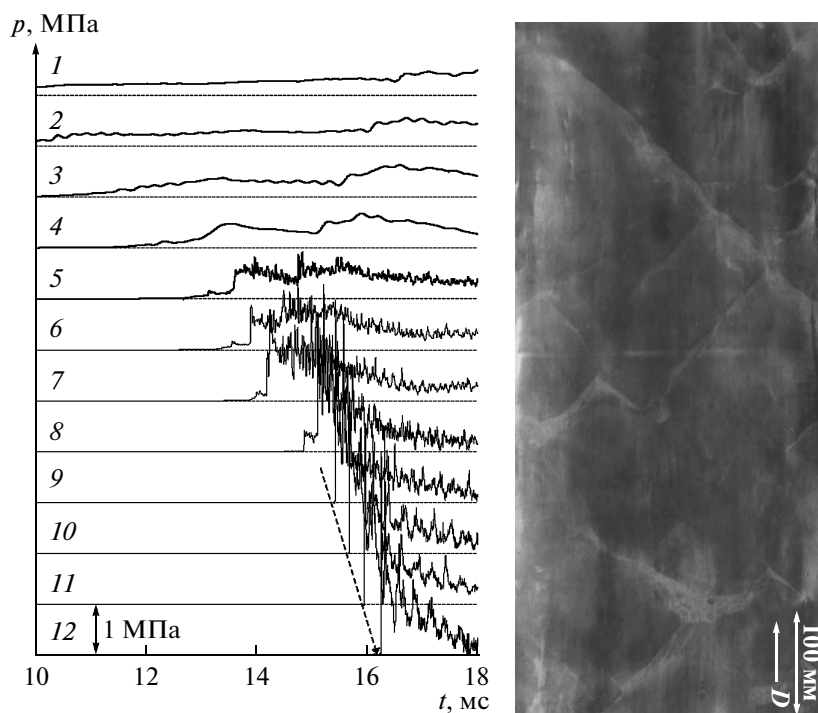


Рис. 2. Осциллограммы давления (p) на датчиках в опыте с быстрым переходом горения в детонацию (а) и фотография следового отпечатка детонационной волны (б).

Штриховой линией показана траектория детонационной волны.

~10 м/с, время заполнения трубы составит ~550 мс. Из осциллограммы рис. 2 видно, что полное время сгорания смеси в экспериментальной установке (до датчика 12) составляет ~16–17 мс. Если считать, что средняя скорость истечения основной массы продуктов горения через открытый конец трубы в атмосферу близка к характерной скорости звука в продуктах горения (~1000 м/с), то время удаления этих продуктов из установки и детонации составит несколько десятков миллисекунд, т.е. время, сопоставимое с полным временем сгорания смеси. Поскольку время заполнения детонационной трубы значительно больше, чем полное время сгорания смеси и время опустошения трубы, становится очевидным, что процесс заполнения определяет частоту работы установки в импульсном режиме. Следовательно, в наших условиях можно получить частоту импульсов ~1.5–2 Гц.

Таким образом, в работе впервые экспериментально доказана возможность быстрого ПГД в условиях высокоскоростного течения (~10 м/с) с раздельной подачей топливных компонентов – природного газа (98.9% метана) и воздуха – в трубе диаметром 150 мм с открытым концом при слабом источнике зажигания с энергией ~ 1 Дж. Показано, что в такой трубе с помощью препятствий-турбулизаторов специальной формы и расстановки

можно обеспечить надежный ПГД на расстоянии 3–4 м от источника зажигания за время 15–16 мс с момента зажигания. Результаты исследований будут использованы при разработке промышленного горелочного устройства нового типа – импульсно-

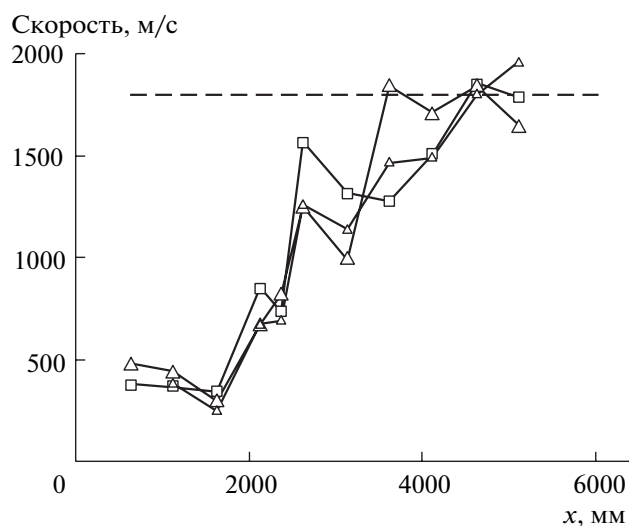


Рис. 3. Измеренная зависимость скорости лидирующей волны давления или УВ от пройденного расстояния (X), полученная по осциллограммам давления в трех опытах при одинаковых начальных условиях.

детонационной горелки для скоростного нагрева и фрагментации различных материалов, совмещающей комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения, – тепловое и ударно-волновое (механическое).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт 16.526.12.6018 “Разработка высокоскоростной энергосберегающей импульсно-детонационной газовой горелки для повышения эффективности

тепловой работы промышленных печей и тепло-энергетических установок”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С. и др.* // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 7. С. 77–80.
2. *Фролов С. М.* // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
3. *Oppenheim A.K.* Introduction to Gasdynamics of Explosions. Wien; N.Y.: Springer, 1972.