

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСИ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ВОЗДУХОМ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

**С. М. Фролов, В. С. Аксенов, А. А. Скрипник**

ИХФ РАН  
г. Москва, Россия

В настоящее время в энергетике активно разрабатывается ряд новых энергосберегающих технологий. Одна из таких технологий, относящаяся к мощным промышленным горелкам, основана на использовании импульсно-детонационного (ИД) горения углеводородного горючего [1]. В ИД-горелках рабочий процесс будет проходить в режиме самовоспламенения при высоких давлениях и температурах в бегущей детонационной волне, что обеспечит значительное повышение мощности энерговыделения (в сотни раз), температуры горения (на 30%–50%) и максимальной скорости продуктов горения (в 5–20 раз). Кроме того, ожидается, что вследствие очень короткого ( $\sim 1$  мс) периода сгорания горючего в циклическом рабочем процессе в таких горелках будут достигаться более низкие эмиссионные показатели оксидов азота, чем в существующих мощных горелках-аналогах [2].

Основная трудность на пути создания технологий ИД горения — инициирование детонации в воздушных смесях практических горючих (природный газ, попутный нефтяной газ и др.) в коротких трубах с помощью слабых источников зажигания (с энергией  $\sim 0,1$  Дж). Дело в том, что детонационная способность таких смесей чрезвычайно низка. Например, критический диаметр трубы, в которой смесь метана с воздухом может детонировать при нормальных условиях, близок к 100 мм. Энергия прямого инициирования детонации метановоздушной смеси в таких трубах достигает  $10$  МДж/м<sup>2</sup>, а расстояния, требуемые для перехода горения в детонацию (ПГД) при слабом источнике зажигания, достигают десяти и более метров даже в широких трубах с турбулизирующими препятствиями [3]. Очевидно, что для технологических приложений в

энергетике прямое инициирование детонации неприменимо, а преддетонационные расстояния для ПГД в каналах с турбулизирующими препятствиями 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 ударной волны (УВ) с ее последующей газодинамической фокусировкой [4]. В [5] концепция [4] была успешно применена для организации быстрого перехода УВ в детонацию в прямой трубе, заполненной стехиометрической пропановоздушной смесью. При этом в качестве фокусирующего устройства использовалось осесимметричное суживающе-расширяющееся сопло специальной формы. В [5] экспериментально показано, что установка в трубе фокусирующего сопла обеспечивает переход УВ в детонацию при скорости УВ на входе в сопло выше  $680 \pm 20$  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 трубе с фокусирующим соплом.

Эксперименты проводили в прямой круглой трубе длиной 4500 мм диаметром 94 мм, выполненной из нержавеющей стали. Труба состояла из двух секций, разделенных мембранным узлом: секции низкого давления (СНД) длиной 3500 мм и секции высокого давления (СВД) длиной 1000 мм. Один конец СНД был закрыт разрывной металлической мембраной, а другой открыт в атмосферу. Используемый природный газ — газ, применяемый в качестве моторного топлива, — содержал 98,9% метана.

Избыточное давление разрыва мембраны в СВД достигалось сжиганием стехиометрической взрывчатой смеси «природный газ — воздух» при начальной температуре  $293 \pm 2$  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 входными патрубками для подачи компонентов смеси и шестью автомобильными свечами зажигания, равномерно распределенными по ее длине.

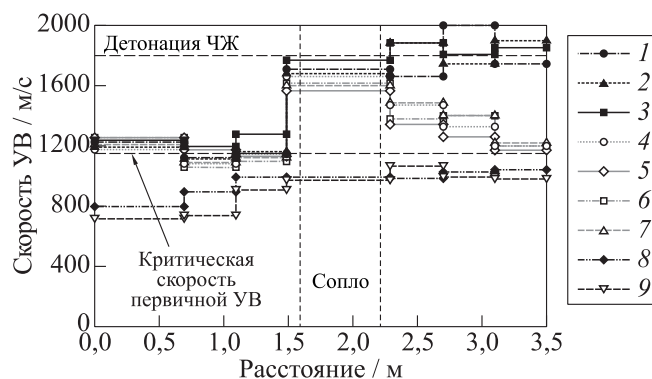
В СНД на расстоянии 1600 мм от мембраны устанавливали профилированное препятствие — сопло, состоящее из суживающейся конической секции длиной 40 мм, цилиндрической муфты длиной 100 мм и расширяющейся конической секции длиной 430 мм. Диаметр минимального сечения сопла — 47 мм. Профиль суживающейся конической секции, предназначенной для газодинамической фокусировки УВ, соответствовал параболическому профилю, используемому в экспериментах [5] с соответствующим масштабированием на другой диаметр трубы.

Для регистрации профилей давления и определения скорости УВ использовали 8 высокочастотных пьезоэлектрических датчиков давления типа ЛХ604. Сигналы датчиков регистрировались персональным компьютером с помощью усилителей и аналогово-цифрового преобразователя USB 3000. Среднюю скорость УВ на каждой измерительной базе определяли по расстоянию между датчиками давления и интервалу времени между приходом фронта УВ на соответствующий датчик давления по осциллограмме. Погрешность определения средней скорости УВ не превышала 3%.

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  $P_n = 6,5\text{--}8,3$  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. Смесью подготавливали методом парциальных давлений в специальном смесителе. Эти опыты проводились без фокусирующего сопла. Выяснилось, что получаемые УВ не способны инициировать детонацию исследуемой смеси, по крайней мере, в СНД выбранной длины.

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



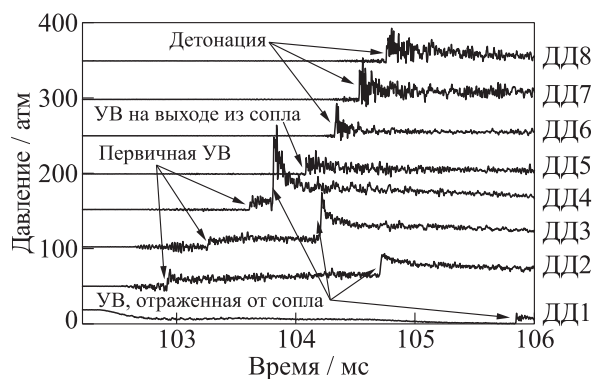
**Рис. 1** Зависимость средней скорости лидирующего ударного фронта от пройденного расстояния на разных измерительных базах в 9 представительных опытах

На рис. 1 представлены результаты 9 опытов последней серии. Вертикальные штриховые линии показывают расположение сопла. Верхняя штриховая горизонтальная линия соответствует скорости детонации Чепмена–Жуге (ЧЖ),  $\approx 1800$  м/с. Видно, что существует некоторое минимальное (критическое) значение средней скорости УВ на входе в сопло (нижняя штриховая горизонтальная линия), при котором в трубе происходит инициирование детонации, т. е. явление перехода УВ в детонацию носит пороговый характер. Полученное значение критической скорости для СНД длиной 3500 мм и диаметром 94 мм равно  $1150 \pm 30$  м/с. Для стехиометрической метановоздушной 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 этом случае при дифракции УВ в сопле не было никаких признаков 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 опытах со средней скоростью УВ на входе в сопло, немного меньшей критического значения, в сопле происходили вторичные



**Рис. 2** Записи давления на датчиках ДД1–ДД8 в опыте 1 (см. рис. 1) с расшифровкой волновых явлений

взрывные явления, не приводящие к детонации (опыты 4–7). 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. Отметим, что при таких условиях наблюдались и режимы с запаздывающим вторичным взрывом, в которых средняя скорость лидирующей УВ скачкообразно возрастала лишь после выхода УВ из сопла. Скачок средней скорости лидирующей УВ в этом случае был вызван слиянием с вторичной взрывной волной, возникшей внутри сопла.

На рис. 2 показаны записи давления датчиками ДД1–ДД8 в опыте 1 с расшифровкой волновых явлений. Погрешность измерения давления оценивали как 30%. Из записи датчиков ДД1–ДД3 видно, что избыточное давление в инициирующей УВ приблизительно постоянно и длительность фазы сжатия в ней составляет по крайней мере 1,7 мс (в сечении датчика ДД2). Средняя скорость УВ на входе в сопло в опыте 1 составила  $1150 \pm 30$  м/с. В момент времени  $\sim 103,8$  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 детонацион-

ную волну. Средняя скорость волны внутри сопла несколько ниже скорости детонации ЧЖ ( $1709 \pm 50$  м/с). На измерительных базах ДД5–ДД6, ДД6–ДД7 и ДД7–ДД8 также регистрируется детонация, распространяющаяся квазистационарно со средней скоростью  $1660 \pm 50$ ,  $2000 \pm 60$  и  $1740 \pm 50$  м/с соответственно. Наблюдаемые колебания средней скорости детонации объясняются близостью диаметра трубы к предельному диаметру, при котором детонационная волна распространяется в спиновом режиме.

Таким образом, в работе впервые экспериментально показано, что для инициирования детонации ударной волной в стехиометрической смеси природного газа с воздухом в трубе с фокусирующим соплом скорость УВ должна превышать  $1150 \pm 30$  м/с. Такую УВ можно получить, например, заменив СВД в используемой экспериментальной установке и участок трубы перед соплом на секцию трубы с турбулизирующими препятствиями [6]. Полученный результат важен для разработки горелочных устройств нового поколения, работающих на ИД сжигании природного газа.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственные контракты № 02.516.12.6026 «Разработка процесса импульсного детонационного горения природного газа для повышения эффективности работы энергетических установок» и 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 Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-08-00068) и Президиума РАН (Программа фундаментальных исследований № 22).

## Литература

1. Фролов С. М. Наука о горении и проблемы современной энергетики // Российский химический журнал, 2009. Т. 52. № 6. С. 129–133.
2. Фролов С. М., Басевич В. Я., Аксенов В. С., Гусев П. А., Иванов В. С., Скрипник А. А., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Фролов Ф. С. Образование окислов азота в детонационной волне // Горение и взрыв. Вып. 4 / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. С. 108–113.

3. Kuznetsov, M., G. Ciccarelli, S. Dorofeev, V. Alekseev, Yu. Yankin, and T. H. Kim. 2002. DDT in methane–air mixtures. *Shock Waves* 12:215–20.
4. Фролов С. М. Быстрый переход горения в детонацию // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
5. Фролов С. М., Аксенов В. С. Иницирование газовой детонации в трубе с профилированным пересжатием сечения // Горение и взрыв. Вып. 2 / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. С. 26–30.
6. Фролов С. М., Аксенов В. С., Берлин А. А. Способ иницирования детонации в трубе с горючей смесью и устройство для его осуществления. Заявка на патент РФ № 2010107750 от 04.03.2010.