

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.222.2

ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

© 2011 г. С. М. Фролов*, В. С. Аксенов, В. С. Иванов, С. Н. Медведев,
В. А. Сметанюк, К. А. Авдеев, Ф. С. Фролов

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

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

Поступила в редакцию 18.03.2011

Впервые экспериментально доказана возможность управляемого циклического перехода горения в детонацию в трубе диаметром 94 мм с открытым концом на длине около 2.5–3 м при раздельной непрерывной подаче природного газа и воздуха. На основе экспериментальных исследований разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец импульсно-детонационного горелочного устройства – прообраз промышленных горелочных устройств нового поколения, совмещающих комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: ударно-волновое (механическое) и тепловое.

Ключевые слова: переход горения в детонацию, воздушная смесь природного газа, экспериментальный образец импульсно-детонационного горелочного устройства.

В существующих силовых установках и горелочных устройствах химическая энергия горючего преобразуется в тепло и механическую работу за счет медленного горения – дефлаграции. Кроме дефлаграции известен и другой режим горения – детонация. При детонации химическая реакция окисления горючего протекает в режиме самовоспламенения при высоком давлении за сильной ударной волной. Если при дефлаграции воздушных смесей углеводородных горючих мощность тепловыделения с единицы площади поверхности фронта реакции составляет ~ 1 МВт/м², то мощность тепловыделения в детонационном фронте приблизительно на 4 порядка выше: ~ 10000 МВт/м². Кроме того, в отличие от продуктов медленного горения продукты детонации обладают огромной кинетической энергией: скорость продуктов детонации в ~ 20 – 25 раз выше скорости продуктов медленного горения. Если, например, вместо существующих камер сгорания с непрерывным горением использовать импульсно-детонационные камеры сгорания с периодическим заполнением камеры горючей смесью и сгоранием смеси в бегущей волне детонации, то такие камеры сгорания могли бы дать большие выгоды при использовании в энергетике благодаря совмещению комбинированного ударно-волнового (механического) и теплового воздействий на объекты, обдуваемые продуктами детонации [1].

До сих пор импульсно-детонационное горение в энергетике не применяли. Основная причина – в проблеме циклического инициирования детонаци-

онной волны: для получения детонации в каждом цикле необходимо использовать либо очень мощный источник энергии, генерирующий сильную ударную волну (УВ), либо обеспечить переход горения в детонацию (ПГД), используя, например, очень длинные гладкие трубы или трубы с регулярными препятствиями. Ввиду повышенной опасности прямое инициирование детонации (первый способ) следует, по-видимому, сразу исключить из рассмотрения. Что же касается второго способа, то он перспективен лишь при успешном решении проблемы надежного и управляемого ПГД на кратчайших расстояниях при минимальной энергии зажигания. К сожалению, детонационная способность воздушных смесей практических топлив при нормальных условиях очень низка, и эта проблема до сих пор оставалась нерешенной.

Если следовать известным литературным данным, то размеры труб, требуемые для ПГД в воздушных смесях практических топлив, действительно, неприемлемо велики. Так, в [2, 3] сообщается о сериях опытов по ПГД в метановоздушных смесях разного состава в прямых закрытых трубах различного диаметра, оборудованных регулярными кольцевыми препятствиями с шагом установки, равным диаметру трубы, и степенью затенения сечения 0.3–0.6. При нормальных условиях ПГД наблюдался лишь в трубах диаметром 520 и 174 мм, причем минимальные расстояния L_{DDT} от источника зажигания до места возникновения детонации составляли 15–17 и 6–8 м соответственно [2]. Примечательно,

что в трубе диаметром 121 мм ПГД наблюдался лишь при повышенном начальном давлении (2 атм и выше) на расстоянии $L_{DDT} > 4-5$ м [3]. Однако результаты работы [3] противоречат данным из [4], где сообщается об экспериментальной регистрации ПГД в стехиометрической метановоздушной смеси в закрытой трубе диаметром 100 мм при нормальных условиях на очень коротком расстоянии $L_{DDT} = 2.5-3$ м при использовании препятствий специальной формы, защищенных патентом. Кроме того, результаты работы [3] противоречат тому известному факту, что предельный диаметр гладкой трубы, в которой смесь метана с воздухом может детонировать при нормальных условиях, близок к 100 мм. Например, недавно в [5] успешно инициировали детонацию в стехиометрической метановоздушной смеси при нормальных условиях в трубе диаметром 94 мм с помощью относительно слабой УВ с числом Маха $M = 3.3$ при ее дифракции на одиночном препятствии специальной формы в виде суживающе-расширяющегося сопла.

Результаты работ [4] и [5] наводят на мысль, что причина отмеченных противоречий кроется в разном влиянии препятствий на пламя и на УВ — две важнейших составляющих процесса ПГД. Каскад регулярных препятствий, который способствует быстрому ускорению пламени благодаря сильной турбулизации течения, может затруднять распространение УВ вследствие больших потерь импульса и тем самым затруднять или исключать саму возможность ПГД. Это означает, что решение отмеченной выше проблемы инициирования детонации через управляемый ПГД следует искать в тщательном подборе формы и расстановки препятствий, обеспечивающих оптимальное согласование темпов ускорения пламени и усиления УВ. Именно эта идея легла в основу концепции “быстрого” ПГД, которая прошла успешную экспериментальную проверку для разных газовых и капельно-струйных взрывчатых смесей [6].

В данной работе на основе концепции “быстрого” ПГД впервые создан экспериментальный образец импульсно-детонационного горелочного устройства (ИДГУ) на природном газе — прообраз промышленных горелочных устройств нового поколения. На образце ИДГУ проведены экспериментальные исследования циклического управляемого ПГД при отдельной непрерывной подаче природного газа и воздуха.

Образец ИДГУ состоял из трех сопряженных секций — форкамеры с источником зажигания (две стандартные автомобильные свечи) и устройства ускорения пламени общей длиной 1200 мм, а также детонационной трубы диаметром 94 мм и длиной 3600 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. Устье трубы длиной 900 мм, примыкающий к открытому концу, был гладким, т.е. препятствия в нем отсутствовали. Природный газ и атмосферный воздух непрерывно подавались в ИДГУ через отдельные магистрали из ресиверов под небольшим избыточным давлением. Расход газов был таким, чтобы обеспечить смесь стехиометрического состава. Используемый природный газ содержал 98.9% метана (“моторный” газ).

В эксперименте регистрировались следующие параметры процесса: давление в форкамере и в устройстве ускорения пламени (с помощью низкочастотных датчиков давления типа КАРАТ-ДИ60); давление в разных измерительных сечениях детонационной трубы (с помощью высокочастотных пьезоэлектрических датчиков давления типа ЛХ604 и РСВ113А23); свечение продуктов горения в разных измерительных сечениях детонационной трубы (с помощью фотодатчиков на базе фотодиодов типа ФД-256). Сигналы датчиков и фотодиодов регистрировались персональным компьютером с помощью усилителей и аналогово-цифровых преобразователей. Среднюю скорость УВ на каждой измерительной базе в детонационной трубе 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%. Среднюю видимую скорость пламени определяли по расстоянию между фотодатчиками и интервалу времени между приходом пламени на соответствующий фотодиод. Детонацию идентифицировали по двум признакам: 1) по величине скорости квазистационарной УВ в гладкой секции трубы и 2) по совпадению моментов прихода фронта УВ и фронта пламени в то или иное сечение трубы.

Важнейший новый результат работы — доказательство возможности циклического “быстрого” ПГД в трубе околопредельного диаметра с открытым концом при отдельной непрерывной подаче природного газа и воздуха. На рис. 1 представлены измеренные зависимости скорости УВ от пройденного расстояния в детонационной трубе в двух (из десяти) циклах при работе с частотой 0.03 Гц, что приблизительно соответствует двум циклам в минуту. Начало отсчета расстояния соответствует входному сечению детонационной трубы. Видно, что ПГД в трубе происходит на расстоянии около 1.5 м, а возникающая затем детонационная волна распространяется на длине ~1.5 м квазистационарно со

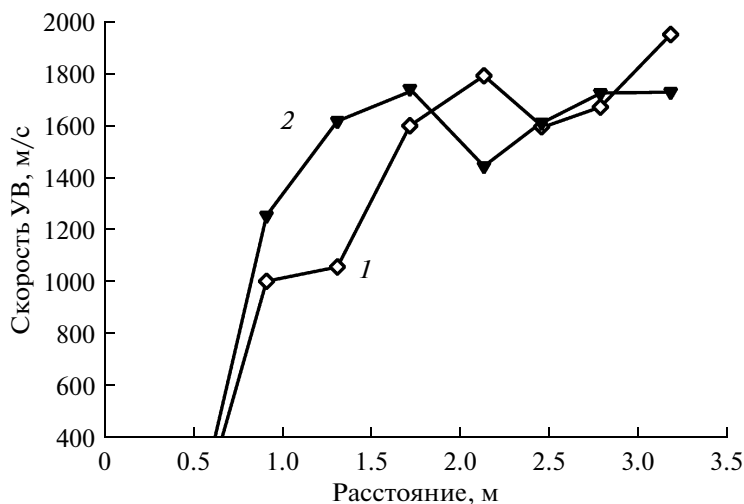


Рис. 1. Переход горения в детонацию в смеси природного газа с воздухом в двух (из десяти) циклах (1 и 2) при работе ИДГУ с частотой 0.03 Гц.

средней скоростью 1600–1700 м/с, включая гладкий участок.

Наблюдаемый режим детонации следует рассматривать как околопредельный. Во-первых, дефицит средней скорости 100–200 м/с по отношению к термодинамическому значению для стехиометрической метановоздушной смеси (≈ 1800 м/с) 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. Действительно, частота колебаний за фронтом волны приблизительно равна 6 кГц (6 колебаний за 1 мс). 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 94 мм должен составить $s \approx 280$ мм, и при средней скорости спиновой детонации $D \approx 1600$ –1700 м/с характерная частота пульсаций должна быть $D/s \approx 5.7$ –6.1 кГц.

Из осциллограммы рис. 2 видно, что полное время сгорания смеси в экспериментальном образце ИДГУ в одном рабочем цикле составило ~ 23 мс. При этом практически все это время потребовалось для ускорения пламени и ПГД, поскольку детонационное горение длилось очень короткое время – около 1 мс, что составляет $\sim 4\%$ всего времени горения. Если считать, что средняя скорость истечения основной массы продуктов горения через открытый конец трубы в атмосферу близка к скорости звука ~ 1000 м/с, то характерное время опустошения ИДГУ составило ~ 4 мс. Следовательно, процесс сгорания смеси в ИДГУ с последующим опустошением горе-

лочного тракта занимал около 30 мс. Это означает, что максимально возможная частота детонационных циклов в созданном образце ИДГУ – около 30 Гц. Такую частоту циклов можно получить при “мгновенном” заполнении трубы горючей смесью. При использовании высоконапорных компрессоров скорость заполнения может достигать ~ 100 м/с, и на образце ИДГУ можно получить достаточно высокую частоту импульсов: ~ 15 Гц.

Таким образом, в работе впервые экспериментально доказана возможность управляемого циклического ПГД в трубе диаметром 94 мм с открытым концом на длине около 2.5–3 м (с учетом размера форкамеры и устройства ускорения пламени) при отдельной непрерывной подаче природного газа и воздуха. На основе экспериментальных исследований разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец ИДГУ – прообраз промышленных горелочных устройств нового поколения, совмещающих комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: ударно-волновое (механическое) и тепловое.

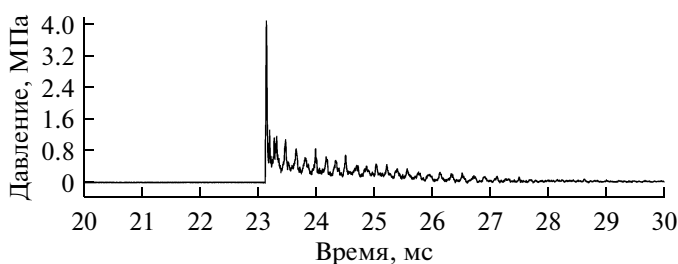


Рис. 2. Осциллограмма давления в спиновой детонационной волне.

Работа выполнена при поддержке Министерством образования и науки Российской Федерации (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 Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 11-08-01297) и Президиумом РАН (Программа фундаментальных исследований № 22).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фролов С.М.* // Рос. хим. журн. 2009. Т. 52. № 6. С. 129.
2. *Kuznetsov M., Ciccarelli G., Dorofeev S. et al.* // Shock Waves. 2002. V. 12. P. 215.
3. *Kuznetsov M., Alekseev V., Matsukov I., Kim T.H.* // Proc. 8th ISHPMIE, Jokohama, Japan, 2010. Paper № ISH-118.
4. *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.
5. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Скрипник А.А.* // Докл. АН, 2011. Т. 436. № 3. С. 346.
6. *Фролов С.М.* // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31.