

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ
ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕЛОЧНОГО
УСТРОЙСТВА НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

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

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

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: $\sim 10\,000$ 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 детонационной волны: для получения детонации в каж-

дом 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 [3] противоречат данным [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 [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, в [5, 6] успешно инициировали детонацию в стехиометрической метановоздушной смеси при нормальных условиях в трубе диаметром 94 мм с помощью относительно слабой УВ с числом Маха 3,3 при ее дифракции на одиночном препятствии специальной формы в виде суживающе-расширяющегося сопла.

Результаты [4–6] 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 [7].

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 (рис. 1) 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. Участок 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

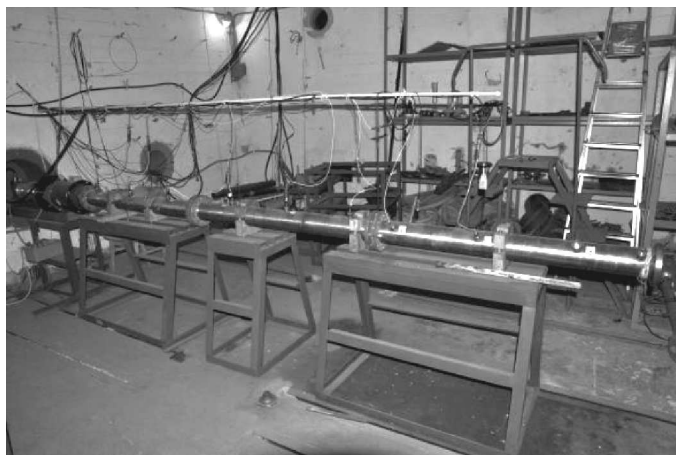


Рис. 1 Экспериментальный образец ИДГУ на природном газе

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) величине скорости квазистационарной УВ в гладкой секции трубы;
- (2) совпадению моментов прихода фронта УВ и фронта пламени в то или иное сечение трубы.

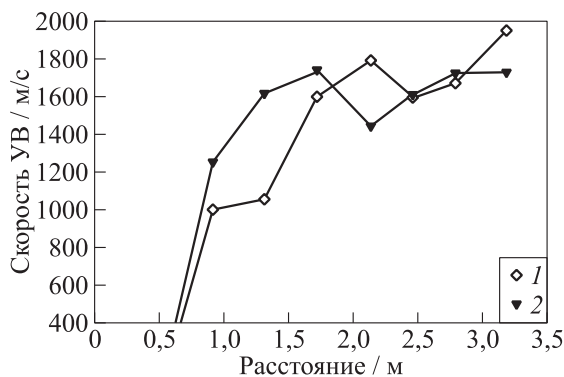


Рис. 2 Переход горения в детонацию в смеси природного газа с воздухом в двух (из десяти) циклах 1 и 2 при работе ИДГУ с частотой 0,03 Гц

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. 2 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 $\sim 1,5$ м квазистационарно со 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. 3) соответствует структуре спиновой детонации с характерными колебаниями сигнала.

Из осциллограммы рис. 3 видно, что полное время сгорания смеси в экспериментальном образце ИДГУ в одном рабочем цикле

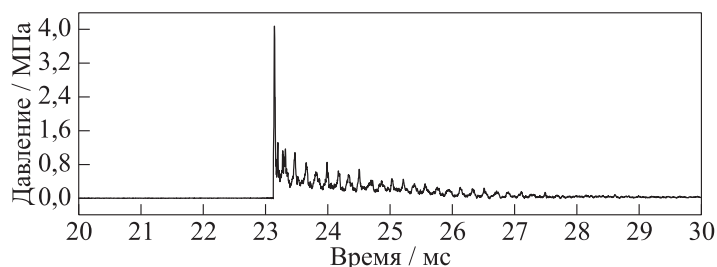


Рис. 3 Оциллограмма давления в спиновой детонационной волне

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, т.е. $\sim 4\%$ 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 горелочного 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.

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 полуграниченных 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. 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.
3. Kuznetsov, M., V. Alekseev, I. Matsukov, and T. H. Kim. 2010. Ignition, flame acceleration and detonations of methane–air mixtures at different pressures and temperatures. *8th ISHPMIE Proceedings*. Jokohama, Japan. Paper No. ISH-118.
4. Vasil'ev, A. A. 2003. Optimization of accelerators of deflagration-to-detonation transition. In: *Confined detonations and pulse detonation engines*. Eds. G. Roy, S. Frolov, R. Santoro, and S. Tsyganov. M.: TORUS PRESS. 41–48.
5. Фролов С. М., Аксенов В. С., Скрипник А. А. Иницирование детонации в смеси природного газа с воздухом в трубе с фокусирующим соплом // Докл. РАН, 2011. Т. 436. № 3. С. 346–350.
6. Фролов С. М., Аксенов В. С., Скрипник А. А. Иницирование детонации в смеси природного газа с воздухом ударной волной // Горение и взрыв. Вып. 4 / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. С. 87–93.
7. Фролов С. М. Быстрый переход горения в детонацию // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.