

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.222.2

ЦИКЛИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ПРОТОЧНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА

© 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

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

Центр импульсно-детонационного горения, Москва

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

Поступила в редакцию 18.05.2012

Впервые экспериментально доказана возможность циклического (частота — до 2 Гц) перехода горения в детонацию (ПГД) в условиях высокоскоростного течения (~ 10 м/с) с отдельной подачей топливных компонентов — метана и воздуха — в трубе длиной 5.5 м и диаметром 150 мм с открытым концом при слабом источнике зажигания с энергией ~ 1 Дж. 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 $\Delta t_{\text{DDT}} \leq 20$ мс с момента зажигания. Результаты исследований будут использованы при разработке промышленного горелочного устройства нового типа — импульсно-детонационной горелки для скоростного нагрева и фрагментации, совмещающей комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: тепловое и ударно-волновое (механическое).

Ключевые слова: циклический переход горения в детонацию, смесь природного газа с воздухом, импульсно-детонационное горелочное устройство.

DOI: 10.7868/S0207401X13030023

ВВЕДЕНИЕ

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 высоких значениях давления и плотности за сильной ударной волной. До сих пор детонацию в энергетике не применяли в основном вследствие проблемы инициирования детонационной волны: для получения детонации необходимо обеспечить надежный и управляемый переход горения в детонацию (ПГД) на кратчайших расстояниях при минимальной энергии зажигания, тогда как детонационная способность воздушных смесей практических топлив при нормальных условиях очень низка.

В 2010 г. в Центре импульсно-детонационного горения ИХФ РАН впервые создан экспериментальный образец импульсно-детонационного горелочного устройства (ИДГУ) на природном газе — прообраз промышленных горелочных устройств

нового поколения, совмещающих комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: ударно-волновое (механическое) и тепловое [1]. Важнейший научный результат работы [1] — доказательство возможности быстрого циклического ПГД [2] на преддетонационном расстоянии 2.5–3 м в трубе околопредельного диаметра (94 мм) с открытым концом при отдельной подаче природного газа и воздуха и относительно низкой энергии зажигания (~ 1 Дж). Проблема инициирования детонации была решена в результате тщательного подбора формы и расстановки препятствий-турбулизаторов, обеспечивающих оптимальное согласование темпов ускорения пламени и усиления ударной волны (УВ). На образце ИДГУ в [1] проведены экспериментальные исследования низкочастотного (0.03 Гц) циклического управляемого ПГД при подаче природного газа и воздуха с относительно низкой скоростью (~ 0.5 – 1.0 м/с).

В данной работе впервые экспериментально доказана возможность циклического “быстрого” ПГД в условиях отдельной подачи топливных компонентов — природного газа и воздуха — с существенно большими, чем в [1], скоростями (~ 10 м/с).

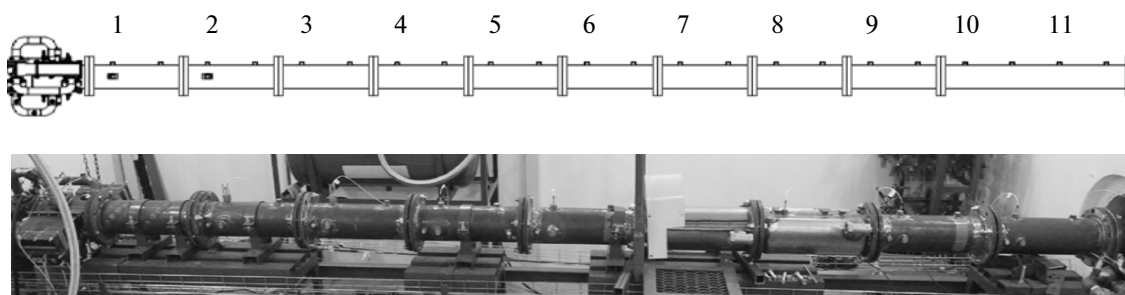


Рис. 1. Схема и фотография экспериментальной установки.

Результаты работы позволят в дальнейшем значительно увеличить рабочую частоту и тепловую мощность перспективных ИДГУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

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 5.5 м 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 2 м, примыкающий к открытому концу, был гладким, т.е. препятствия в нем отсутствовали.

Рабочий цикл установки состоял из нескольких стадий, длительность которых управлялась цифровым контроллером. На первой стадии установка заполнялась смесью природного газа и воздуха, причем оба компонента смеси подавались в СЗУ через отдельные магистрали, оборудованные обратными клапанами. Скорость заполнения установки топливно-воздушной смесью (ТВС) составляла ~ 10 м/с. Природный газ, содержащий 98.9% метана, подавался через СЗУ в детонационную трубу из ресивера объемом 200 л с избыточным давлением в 0.3 атм. Атмосферный воздух подавался в установку с помощью вихревой воздуходувки SCL-K11TS. Воздуходувка обеспечивала расход воздуха до 500 л/с. При заполнении установки горючей смесью расход газов регулировался таким образом, чтобы обеспечить стехиометрический состав смеси. Кроме того, состав смеси проверялся с помощью хроматографического анализа. Чтобы избежать утечки свежей смеси через открытый конец трубы, детонационную трубу заполняли смесью не полностью. Цифровой контроллер позволял с хорошей точностью устанавливать время заполнения установки, $\Delta\tau_f$, для обеспечения ее безопасной работы в циклическом режиме даже в отсутствие ПГД: смесь пол-

ностью сгорала как в режиме детонации, так и в режиме дефлации.

На второй стадии после отключения подачи природного газа (с помощью быстродействующего отсечного клапана) происходило многоточечное зажигание горючей смеси в СЗУ, за которым происходило перекрытие подачи воздуха и следовали процессы ускорения пламени и быстрого ПГД на расстоянии $L_{DDT} = 3-4$ м от источника зажигания за время $\Delta\tau_{DDT} \leq 20$ мс с момента зажигания.

На третьей стадии происходил выход УВ и истечение продуктов детонации через открытый конец трубы. 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 опустошения установки от продуктов горения и детонации, $\Delta\tau_e$, составит несколько десятков миллисекунд, т.е. оно сопоставимо с полным временем сгорания смеси.

На четвертой стадии вся установка с остаточными газами сначала продувалась воздухом в течение времени $\Delta\tau_p = 50-100$ мс, а затем включалась подача природного газа и воздуха, и цикл повторялся.

Максимальную частоту работы экспериментальной установки f_{\max} в импульсно-детонационном режиме оценивали, исходя из суммарного времени цикла: $\Delta\tau_c = \Delta\tau_f + \Delta\tau_{DDT} + \Delta\tau_e + \Delta\tau_p \approx 450-550$ мс. Поскольку время заполнения детонационной трубы $\Delta\tau_f$ значительно больше, чем полное время сгорания смеси $\Delta\tau_{DDT}$ и время опустошения трубы $\Delta\tau_e$, становится очевидным, что максимальная частота работы установки определяется скоростью ее заполнения горючей смесью и временем продувки воздухом $\Delta\tau_p$. Следовательно, максимальная частота импульсов в наших условиях $f_{\max} \approx 2$ Гц.

В эксперименте регистрировались следующие параметры процесса: давление в СЗУ (с помощью низкочастотных датчиков давления типа КАРАТ-ДИ), давление в разных измерительных сечениях детонационной трубы (с помощью высокочастотных пьезоэлектрических датчиков давления типа РСВ113А23), а также свечение продук-

тов горения в разных измерительных сечениях детонационной трубы (с помощью фотодатчиков на базе фотодиодов типа ФД-256). Сигналы датчиков и фотодиодов регистрировались на персональном

№	1	2	3	4	5
$X, \text{мм}$	124	624	1123	1623	2122

Датчики 8–11 располагались в гладкой секции трубы. Среднюю скорость фронта волны давления или УВ, D , 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 D не превышала 3%. Детонацию главным образом идентифицировали по трем признакам: 1) по величине скорости (1600 м/с и выше) квазистационарной УВ в гладкой секции трубы; 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 внутри 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важнейший новый результат работы – доказательство возможности “быстрого” циклического (с частотой циклов до 2 Гц) ПГД в условиях высокоскоростного течения (~ 10 м/с) при раздельной подаче топливных компонентов. Нами экспериментально показано, что в такой трубе при использовании препятствий-турбулизаторов специальной формы и расстановки можно обеспечить надежный циклический ПГД на расстоянии 3–4 м от источника зажигания за время $\Delta t_{\text{ДДТ}} \leq 20$ мс с момента зажигания.

На рис. 2 представлены осциллограммы давления p и фотография сажевого отпечатка в одном из циклов опыта с “быстрым” циклическим ПГД. Нумерация на рисунке соответствует нумерации датчиков (см. выше). Видно, что “взрыв во взрыве” (по терминологии из [3]) происходит между датчиками 6 и 7, расположенными на расстоянии соответственно 2623 и 3123 мм от источника зажигания, через ~ 17.2 мс после зажигания. Взрыв происходит между УВ-предвестником и пламенем и приводит к образованию пересжатой детонационной волны, бегущей по направлению к от-

компьютере с помощью усилителей и аналого-цифровых преобразователей.

Ниже представлены расстояния X датчиков давления 1–11 от начала детонационной трубы:

6	7	8	9	10	11
2623	3123	3622	4120	4620	5122

крытому концу трубы, и ретонационной волны, бегущей по направлению к источнику зажигания. В окрестности датчика 8 (на расстоянии около 3622 мм) пересжатая детонационная волна догоняет УВ-предвестник, и формируется волна самоподдерживающейся детонации, которая распространяется ближе к концу гладкой секции трубы квазистационарно со средней скоростью 1670 м/с.

На рис. 3 представлены осциллограммы давления на четырех датчиках (8–11) в гладкой секции трубы в десяти последовательных циклах при работе ИДГУ с частотой около 1 Гц в течение 10 с. В этом опыте время заполнения трубы свежей ТВС составляло $\Delta t_f \approx 425$ мс. Постепенный сдвиг “нулевой” линии вниз на всех датчиках вызван тепловым воздействием продуктов детонации на чувствительные элементы датчиков. Тем не менее рис. 3 демонстрирует хорошую повторяемость сигналов на всех датчиках, особенно пиков давления, соответствующих приходу детонационной волны.

На рис. 4 черными кружками показаны экспериментальные значения скорости детонационной волны D на измерительных базах между датчиками 8 и 9, 9 и 10, 10 и 11 в десяти последовательных циклах ($N = 10$), представленных на рис. 3. Сплошная линия соответствует среднему арифметическому значению скорости детонации \bar{D} на указанных измерительных базах в десяти циклах, а горизонтальная точечная линия – термодинамической скорости детонации Чепмена–Жуге в стехиометрической метановоздушной смеси ($D_{CJ} \approx 1800$ м/с). Видно, что в рассматриваемом опыте на гладком участке трубы детонация сначала (между датчиками 8–10) распространяется (в среднем) в пересжатом режиме со степенью пересжатия 3–4% ($\bar{D} = (1.03 \div 1.04) D_{CJ}$), а на последней измерительной базе (между датчиками 10 и 11) – со средней скоростью, несколько меньшей D_{CJ} ($\bar{D} \approx 0.98 D_{CJ}$). Пересжатый режим детонации, как известно [4], возникает в процессе ПГД. Снижение средней скорости ДВ \bar{D} на последней измерительной базе объясняется двумя факторами. Во-первых, происходит естественное ослабление пересжатой детонационной волны, вызванное волной разрежения со стороны продуктов горения. Во-вторых, в связи с неполным заполнением де-

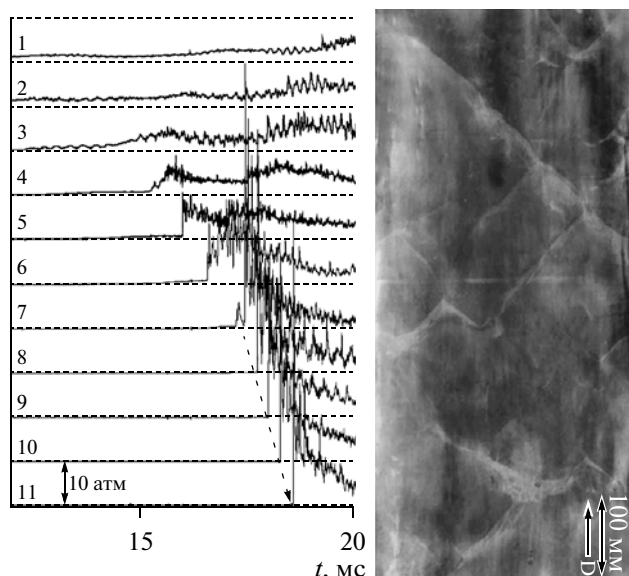


Рис. 2. Осциллограммы давления на датчиках 1–11 в одном из циклов в опыте с быстрым циклическим переходом горения в детонацию (слева) и фотография следового отпечатка детонационной волны (справа). Штриховой линией показана траектория детонационной волны.

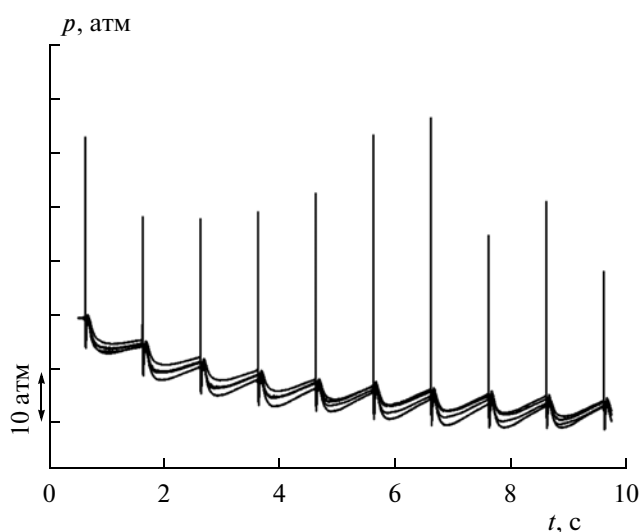


Рис. 3. Осциллограммы давления на датчиках 8–11 в гладкой секции трубы в десяти последовательных циклах при работе ИДГУ с частотой около 1 Гц в течение 10 с в опыте с временем заполнения трубы свежей ТВС, равным 425 мс.

тонационной трубы горючей смесью ее состав в конце гладкой секции отличался от состава смеси во всей трубе (смесь была разбавлена продувочным воздухом), причем передняя “граница” ТВС размывалась вследствие турбулентного перемешивания с продувочным воздухом.

Для сравнения квадратами на рис. 4 показаны экспериментальные значения скорости детона-

ционной волны D на измерительных базах между датчиками 8 и 9, 9 и 10, 10 и 11 в другом опыте с десятью последовательными циклами ($N = 10$), но с временем заполнения трубы свежей ТВС $\Delta\tau_f \approx 375$ мс. Уменьшение времени заполнения на ~ 50 мс по сравнению с опытом, представленным сплошной кривой на рис. 4, привело к тому, что пересжатый режим детонации наблюдался лишь между датчиками 8 и 9, а в дальнейшем скорость детонации снижалась до $\bar{D} \approx 1800$ м/с на измерительной базе между датчиками 9 и 10 и далее до $\bar{D} \approx 1700$ м/с на измерительной базе между датчиками 10 и 11.

В качестве количественного показателя повторяемости сигналов в N последовательных рабочих циклах мы использовали коэффициент цикловой нестабильности, определенный как

$$\eta = \max_N \left| \frac{D - \bar{D}}{\bar{D}} \right| \cdot 100\%.$$

По данным рис. 4 коэффициент цикловой нестабильности на трех измерительных базах в двух опытах, соответствующих сплошной и штриховой кривым, не превышает 10%, причем максимальное отклонение скорости детонации $D - \bar{D} \approx 180$ м/с наблюдалось лишь в одном цикле на измерительной базе между датчиками 9 и 10, а в остальных циклах $\eta < 5\%$. Такое низкое значение коэффициента цикловой нестабильности означает, что процесс ПГД хорошо повторяется от цикла к циклу и может стать основой функционирования промышленных импульсно-детонационных горелочных устройств.

Режим детонации, наблюдаемый в конце гладкой секции трубы в опытах с неполным заполнением трубы свежей ТВС, следует рассматривать как околопредельный (спиновый). Во-первых, дефицит средней скорости в 100–200 м/с по отношению к термодинамическому значению D_{CJ} хорошо согласуется с допустимым дефицитом скорости детонации на пределе распространения в гладкой трубе. Во-вторых, структура волны соответствует структуре спиновой детонации с характерными слабо затухающими колебаниями сигнала. Частота колебаний за фронтом волны на сигнале датчика давления 11 в таких опытах была приблизительно равна 3.7 кГц. Эта частота хорошо согласуется с известным эмпирическим 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 должна быть $D/s \approx 3.6$ –3.8 кГц. Кроме того, следовой отпечаток волны в гладкой секции трубы четко показывает, как слегка пересжатая детонационная волна, образовавшаяся в результате ПГД (с несколькими головами во

фронте), превращается в спиновую (наклонная размытая линия в верхней части фотографии отпечатка на рис. 2). Пики давления, сильно превышающие его величину, рассчитанную для плоской волны с параметрами Чепмена–Жуге, также свидетельствуют о том, что детонация распространяется в традиционном пульсирующем режиме (многоголовом в области пересечения и одноголовом в спиновом режиме). В обоих случаях благодаря наличию поперечных волн в зоне реакции за ведущим ударным фронтом регистрируемые пиковые давления существенно превышают давления Чепмена–Жуге.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе впервые экспериментально доказана возможность быстрого циклического 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 при использовании препятствий-турбулизаторов специальной формы и расстановки можно обеспечить надежный циклический ПГД на расстоянии 3–4 м от источника зажигания за время $\Delta\tau_{\text{DDT}} \leq 20$ мс с момента зажигания. Достигнутая на экспериментальной установке максимальная частота циклов – 2 Гц. Результаты исследований будут использованы при разработке промышленного горелочного устройства нового типа – импульсно-детонационной горелки для скоростного нагрева и фрагментации, совмещающей комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: тепловое и ударно-волновое (механическое).

Работа выполнена при поддержке Министерством образования и науки Российской Федера-

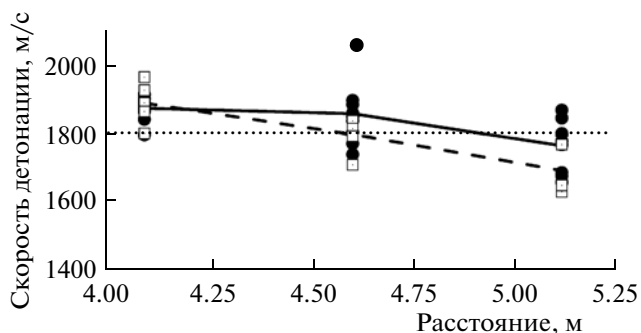


Рис. 4. Экспериментальные значения скорости D на измерительных базах между датчиками 8 и 9, 9 и 10, 10 и 11 в десяти последовательных циклах ($N = 10$) в двух опытах: в опыте, представленном на рис. 3 (черные кружки, $\Delta\tau_f \approx 425$ мс), и в опыте с $\Delta\tau_f \approx 375$ мс (белые квадраты). Сплошная и штриховая линии показывают средние арифметические значения скорости детонации \bar{D} в соответствующих опытах. Точечная линия – скорость детонации Чепмена–Жуге.

ции (государственный контракт № 16.526.12.6018 “Разработка высокоскоростной энергосберегающей импульсно-детонационной газовой горелки для повышения эффективности тепловой работы промышленных печей и теплоэнергетических установок”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С., Медведев С.Н., Сметанюк В.А., Авдеев К.А., Фролов Ф.С. // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 7. С. 77.
2. Фролов С.М. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31.
3. Oppenheim A.K. Introduction to Gasdynamics of Explosions. Wien–N.Y.: Springer, 1972.
4. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации. М.: Гостехтеориздат, 1955.