

РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОЙ
ГОРЕЛКИ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

**С. М. Фролов, В. С. Аксёнов, К. А. Авдеев, А. А. Борисов,
В. С. Иванов, А. С. Коваль, С. Н. Медведев, В. А. Сметанюк,
Ф. С. Фролов, И. О. Шамшин**

ИХФ РАН, Центр ИДГ
г. Москва, Россия

В 2010 г. в Центре импульсно-детонационного горения ИХФ РАН впервые создан экспериментальный образец горелки импульсно-детонационной скоростной (ГИДС) 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 перехода горения в детонацию (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 при 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 ГИДС в [1] проведены экспериментальные исследования низкочастотного (0,03 Гц) циклического управляемого ПГД при подаче природного газа и воздуха с относительно низкой скоростью ($\sim 0,5$ – $1,0$ м/с).

В данной работе впервые реализован циклический импульсно-детонационный рабочий процесс в экспериментальном образце ГИДС в условиях отдельной подачи топливных компонентов — природного газа и воздуха — с существенно большими, чем в [1], скоростями (~ 10 м/с) и частотами (до 2 Гц). Результаты работы дают основу для дальнейшего значительного увеличения рабочей частоты и тепловой мощности перспективных ГИДС.

Экспериментальный образец ГИДС (рис. 1) состоит из двух сопряженных секций: смесительно-зажигającego устройства (СЗУ) с искровым источником зажигания (энергия зажигания ~ 1 Дж) и горелочного тракта — трубы диаметром 150 мм и длиной 5,5 м с препятствиями-турбулизаторами специальной формы и расстановки. Конструкция секций и детали их сопряжения, а также форма и расстановка препятствий — предметы патентования и здесь не обсуждаются. Конец горелочного тракта открыт в атмосферу.

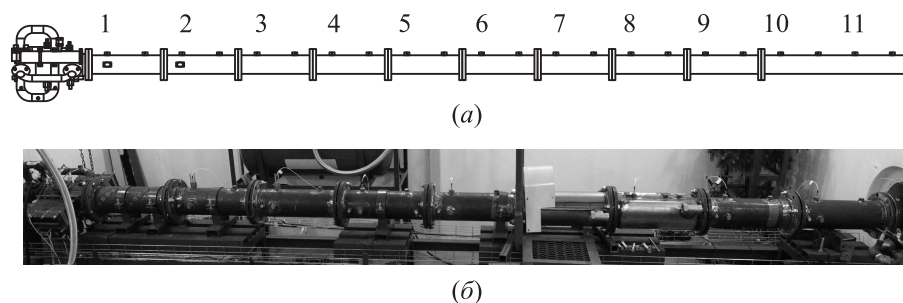


Рис. 1 Схема (а) и фотография (б) экспериментального образца ГИДС

Участок трубы длиной 2 м, примыкающий к открытому концу горелочного тракта, выполнен гладким, т. е. препятствия в нем отсутствуют.

Рабочий цикл ГИДС состоит из нескольких стадий, длительность которых управляется цифровым контроллером. На первой стадии ГИДС заполняется смесью природного газа и воздуха, причем оба компонента смеси подаются в СЗУ через отдельные магистрали, оборудованные обратными клапанами. Скорость заполнения ГИДС топливно-воздушной смесью составляет ~ 10 м/с. Природный газ, содержащий 98,9% метана, подается через СЗУ в горелочный тракт из ресивера объемом 200 л с избыточным давлением 0,3 атм. Атмосферный воздух подается в ГИДС с помощью вихревой воздухоподготовки SCL-K11TS, которая обеспечивает расход воздуха до 500 л/с. При заполнении ГИДС горючей смесью расход газов регулируется таким образом, чтобы обеспечить состав смеси, близкий к стехиометрическому. После настройки системы подачи состав смеси проверяется с помощью хроматографического анализа. Чтобы избежать утечки свежей смеси через открытый конец горелочного тракта, ГИДС заполняется смесью не полностью. Цифровой контроллер позволяет с хорошей точностью устанавливать время заполнения горелочного тракта Δt_f для обеспечения безопасной работы ГИДС в циклическом режиме даже в отсутствие ПГД: смесь полностью сгорает как в режиме детонации, так и в режиме дефлаграции.

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

На третьей стадии происходит выход УВ и истечение продуктов детонации через открытый конец горелочного тракта. Если считать, что средняя скорость истечения основной массы продуктов горения через открытый конец горелочного тракта 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. время, сопоставимое с полным временем сгорания смеси.

На четвертой стадии ГИДС с остаточными газами сначала продувается воздухом в течение времени $\Delta\tau_p = 50\text{--}100$ мс, а затем включается подача природного газа и воздуха, и цикл повторяется.

Максимальную частоту работы ГИДС f_{\max} в импульсно-детонационном режиме можно оценить, исходя из суммарного времени цикла: $\Delta\tau_c = \Delta\tau_f + \Delta\tau_{\text{DDT}} + \Delta\tau_e + \Delta\tau_p \approx 450\text{--}550$ мс. Поскольку время заполнения горелочного тракта $\Delta\tau_f$ значительно больше, чем полное время сгорания смеси $\Delta\tau_{\text{DDT}}$ и время опустошения трубы $\Delta\tau_e$, становится очевидным, что максимальная частота работы ГИДС 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 регистрируются следующие параметры процесса: давление в СЗУ (с помощью низкочастотных датчиков давления типа КАРАТ-ДИ60); давление в разных измерительных сечениях горелочного тракта (с

Таблица 1 Расстояния датчиков давления от начала горелочного тракта

Датчик	X , мм
1	124
2	624
3	1123
4	1623
5	2122
6	2623
7	3123
8	3622
9	4120
10	4640
11	5122

помощью высокочастотных пьезоэлектрических датчиков давления типа РСВ113А23); а также ток ионизации между электродами ионизационных зондов, установленных в одних измерительных сечениях с датчиками давления. Сигналы датчиков и зондов поступают через усилители и аналогово-цифровой преобразователь (частота опроса 1 МГц) на персональный компьютер.

В табл. 1 представлены расстояния X датчиков давления 1–11 от начала горелочного тракта. Датчики 8–11 расположены в гладкой секции тракта. Средняя скорость фронта волны давления или УВ D на каждой измерительной базе между соседними датчиками давления в горелочном тракте определяется по расстоянию между датчиками и интервалу времени между приходам

фронта УВ на соответствующий датчик по осциллограмме. Погрешность определения D не превышает 3%.

Детонацию в опытах идентифицировали по четырем признакам:

- (1) по величине скорости (1600 м/с и выше) квазистационарной УВ в гладкой секции горелочного тракта;
- (2) по уровню давления (30 атм и выше), регистрируемого датчиком;
- (3) по характерным следовым отпечаткам на закопченной фольге (шаг спина на 400–500 мм), вставляемой через открытый конец внутрь горелочного тракта;

- (4) по сравнению записей датчиков давления и ионизационных зондов, установленных в одном сечении: детонации соответствовали режимы с одновременным резким отклонением сигналов.

Важнейший новый результат работы — доказательство возможности «быстрого» циклического (с частотой циклов до 2 Гц) ПГД в условиях высокоскоростного течения (~ 10 м/с) при отдельной подаче топливных компонентов. Экспериментально доказано, что при использовании препятствий-турбулизаторов специальной формы и расстановки в горелочном тракте ГИДС можно обеспечить надежный циклический ПГД на расстоянии 3–4 м от источника зажигания за время $\Delta t_{\text{ПГД}} \leq 20$ мс с момента зажигания.

На рис. 2, а и 2, б представлены осциллограммы давления p и фотография сажевого отпечатка в одном из циклов опыта с «быстрым» циклическим ПГД, а на рис. 2, в сравниваются сигналы датчика давления 9 и ионизационного зонда, установленного в том же сечении горелочного тракта. Нумерация датчиков соответствует нумерации в табл. 1. Из рис. 2, а видно, что «взрыв во взрыве» (по терминологии [3]) происходит между датчиками 6 и 7 через $\sim 17,2$ мс после зажигания. Взрыв происходит между УВ-предвестником и пламенем и приводит к образованию пересжатой детонационной волны (ДВ), бегущей по направлению к открытому концу горелочного тракта, и ретонационной волны, бегущей по направлению к СЗУ. В окрестности датчика 8 пересжатая ДВ догоняет УВ-предвестник и формируется волна самоподдерживающейся детонации, которая распространяется ближе к концу гладкой секции тракта квазистационарно со средней скоростью 1670 м/с.

Режим детонации, наблюдаемый в конце гладкого участка горелочного тракта ГИДС, следует рассматривать как околопредельный (спиновый) режим самоподдерживающейся детонации. Во-первых, дефицит средней скорости 100–200 м/с по отношению к термодинамическому значению скорости детонации Чепмена–Жуге в стехиометрической метановоздушной смеси ($D_{\text{СЖ}} \approx 1800$ м/с) 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 сигналах датчиков давления 8–11 приблизительно равна 3,7 кГц. Эта частота хорошо согласуется с известным эмпирическим правилом $s/d \approx \approx 3$, где s — шаг спина, а d — диаметр трубы. Действительно, согласно этому правилу шаг спина в трубе диаметром 150 мм должен составить $s \approx \approx 450$ мм и при средней скорости спиновой детонации $D \approx 1600$ –700 м/с характерная частота пульсаций должна быть $D/s \approx 3,6$ –3,8 кГц. В-третьих, следовой отпечаток волны в гладкой секции горелочного тракта на рис. 2, б четко показывает, как пересжатая ДВ, образовавшаяся в результате ПГД (с несколькими головами во фронте), превращается в спиновую (наклонная размытая линия в верхней части фотографии отпечатка). Пики давления,

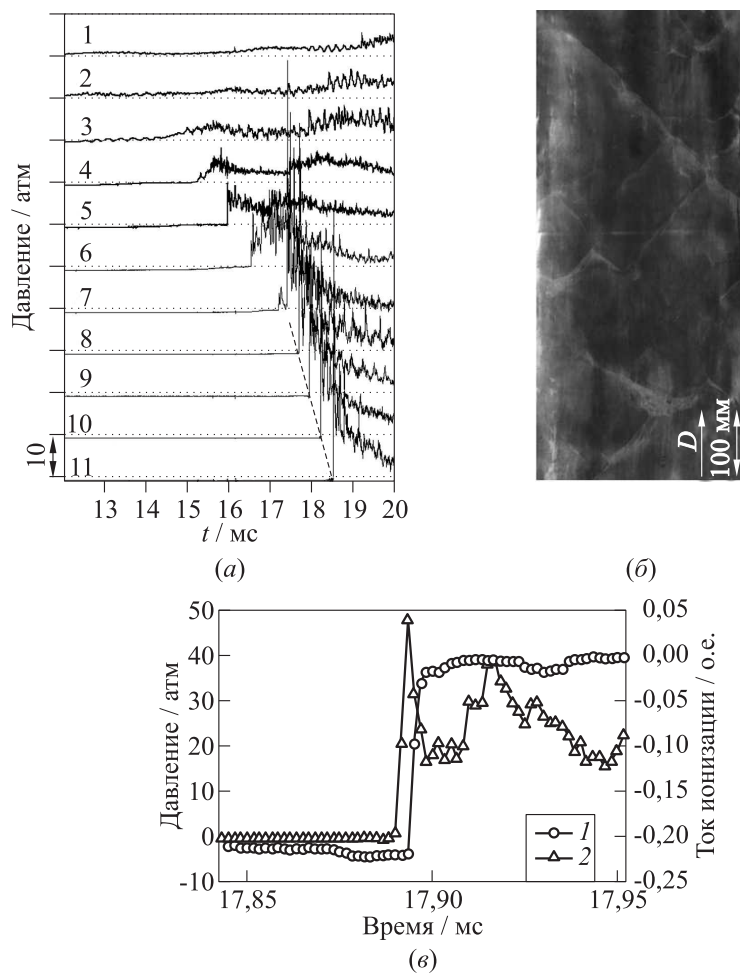


Рис. 2 (а) Осциллограммы давления на датчиках 1–11 в одном из циклов в опыте с быстрым циклическим ПГД (а) и фотография следового отпечатка ДВ (б). Штриховой линией показана траектория ДВ; (в) записи тока между электродами ионизационного зонда (кривая 1) и давления на датчике 9 (кривая 2) в одном сечении горелочного тракта ГИДС при распространении детонации

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 пересжатия и одноголовом в спиновом режиме). В обоих случаях благодаря наличию поперечных волн в зоне реакции за ведущим ударным

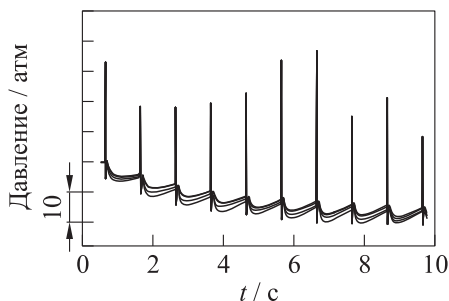


Рис. 3 Записи давления датчиками 8–11 в гладкой секции горелочного тракта в десяти последовательных циклах при работе ГИДС с частотой около 1 Гц в течение 10 с в опыте с заполнением трубы свежей смесью в течение 425 мс

фронтом регистрируемые пиковые давления существенно превышают давление Чепмена–Жуге. В-четвертых, из рис. 2, в отчетливо видно, что резкое отклонение сигналов давления и ионизационного тока от «нулевых» линий происходит одновременно — факт, идентифицирующий детонацию.

На рис. 3 показаны записи давления на четырех датчиках 8–11 в гладкой секции горелочного тракта в десяти последовательных циклах при работе ГИДС с частотой около 1 Гц в течение 10 с. В этом опыте время заполнения ГИДС свежей смесью составляло $\Delta\tau_f \approx 425$ 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 ДВ.

На рис. 4 черными кружками показаны полученные значения скорости ДВ D между датчиками 8 и 9, 9 и 10, 10 и 11 в десяти последовательных циклах, представленных на рис. 3. Сплошная линия соответствует среднему арифметическому значению скорости детонации \bar{D} на указанных измерительных базах в десяти циклах, а горизонтальная штрихпунктирная линия — скорости детонации Чепмена–Жуге D_{CJ} . Видно, что в рассматриваемом опыте на гладком участке горелочного тракта детонация сначала (между датчиками 8–10) распространяется (в среднем) в пересжатом режиме со степенью пересжатия 3%–4% ($\bar{D} = (1,03\text{--}1,04)D_{CJ}$), а на последней измерительной базе (между датчиками 10 и 11) — со средней скоростью, несколько меньшей D_{CJ} ($\bar{D} \approx 0,98D_{CJ}$). 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 ДВ, вызванное волной разрежения со стороны продуктов горения. Во-вторых, в связи с неполным заполнением горелочного тракта горючей смесью ее состав в конце гладко-

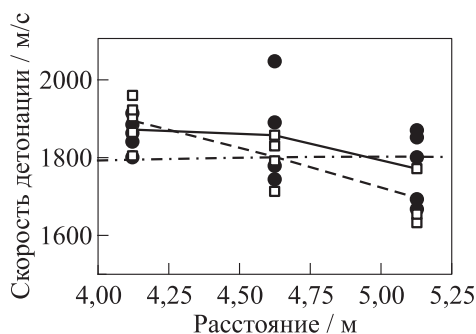


Рис. 4 Измеренные значения скорости ДВ между датчиками 8 и 9, 9 и 10, 10 и 11 в десяти последовательных циклах в двух опытах: в опыте рис. 3 (черные кружки, сплошная линия, $\Delta\tau_p \approx 425$ мс) и в опыте с $\Delta\tau_p \approx 375$ мс (белые квадраты, штриховая линия). Штрихпунктирная линия — скорость детонации Чепмена-Жуге

го участка отличается от состава смеси во всем горелочном тракте (смесь разбавлена продувочным воздухом), причем передняя «граница» смеси размывается вследствие турбулентного перемешивания с продувочным воздухом.

Для сравнения белыми квадратами на рис. 4 показаны значения скорости ДВ между датчиками 8 и 9, 9 и 10, 10 и 11 в другом опыте с десятью последовательными циклами, но с временем заполнения $\Delta\tau_f \approx 375$ мс. Уменьшение времени заполнения на ~ 50 мс привело к тому, что пересжатый режим детонации наблюдался лишь между датчиками 8 и 9, а в дальнейшем скорость ДВ снижалась до $\bar{D} \approx 1800$ м/с между датчиками 9 и 10 и далее до $\bar{D} \approx 1700$ м/с между датчиками 10 и 11.

Таким образом, впервые реализован циклический импульсно-детонационный рабочий процесс в экспериментальном образце ГИДС в условиях высокоскоростного течения (~ 10 м/с) смеси природного газа (98,9% метана) и воздуха. Показано, что в горелочном тракте ГИДС диаметром 150 мм при использовании препятствий-турбулизаторов специальной формы и расстановки можно обеспечить надежный циклический ПГД на расстоянии 3–4 м от источника зажигания за время $\Delta\tau_{\text{ДДТ}} \leq 20$ мс. Достигнутая в экспериментах максимальная частота циклов — 2 Гц. Результаты исследований будут использованы при разработке промышленного горелочного устройства нового типа — ГИДС для скоростного нагрева и фрагментации, совмещающей комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: тепловое и ударно-волновое (механическое).

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 16.526.12.6018 «Разработка высокоскоростной энергосберегающей им-

пульсно-детонационной газовой горелки для повышения эффективности тепловой работы промышленных печей и теплоэнергетических установок».

Литература

1. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С., Медведев С. Н., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Фролов Ф. С. Импульсно-детонационное горелочное устройство на природном газе // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 7. С. 77–80.
2. Фролов С. М. Быстрый переход горения в детонацию // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
3. Oppenheim, A. K. 1972. *Introduction to gasdynamics of explosions*. Wien–N.Y.: Springer.
4. Зельдович Я. Б., Компанеец А. С. Теория детонации. — М.: Гостехтеориздат, 1955.