

УДК 534.222.2

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ПЕРЕКРЁСТНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СТРУЯХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

© 2017 г. С. М. Фролов^{1,2,3,*}, В. А. Сметанюк^{1,3}, В. С. Аксёнов^{1,2}, А. С. Коваль¹

Представлено академиком РАН А.А. Берлиным 17.03.2017 г.

Поступило 17.03.2017 г.

Впервые экспериментально доказано, что турбулентность, создаваемая перекрёстными сверхзвуковыми струями горючего (природный газ) и окислителя (кислород), истекающими под давлением от 25 до 150 атм в гладкую детонационную трубу диаметром 74 мм, позволяет обеспечить быстрый переход горения в детонацию на расстояниях до 300 мм (до 4 калибров трубы) за времена, составляющие десятые доли миллисекунды (~0,4 мс). Полученные результаты можно использовать для создания компактных преддетонаторов для детонационных камер сгорания перспективных энергопреобразующих устройств.

DOI: 10.7868/S0869565217250132

Все существующие концепции транспортного и энергетического машиностроения, использующие химическую энергию различных ископаемых или синтетических топлив, основаны либо на прямом, либо на непрямом преобразовании химической энергии управляемого горения топлива в полезную работу, причём речь всегда идёт о медленном горении – горении с существенно дозвуковой скоростью. Одно из альтернативных и энергетически привлекательных решений, которое сулит качественный скачок в энергосбережении, – переход к использованию управляемого детонационного горения [1] – горения с существенно сверхзвуковой скоростью.

До настоящего времени предложено множество схем организации управляемого детонационного горения, включая схемы с импульсно-детонационным (ИД) [2] и с непрерывно-детонационным (НД) рабочим процессом [3]. Важнейшая проблема, возникающая при реализации управляемого детонационного горения, – это проблема инициирования детонации в рабочем теле – в смеси того или иного штатного моторного топлива с окислителем – на кратчайших расстояниях при минимальной энергии зажигания. Один из известных способов инициирования детонации – перепуск

детонационной волны (ДВ) из донорной топливной смеси с высокой детонационной способностью в камеру сгорания (КС), заполняемую рабочим телом. В ИД-камерах процедура перепуска ДВ происходит в каждом рабочем цикле, а в НД-камерах – однократно с возможностью повторения инициирующих импульсов в случае срыва режима.

В “преддетонаторах” (так в литературе называют детонационные трубы (ДТ) с донорной топливной смесью), как правило, используются слабые источники зажигания (запальные свечи), препятствия-турбулизаторы, обеспечивающие быстрый переход горения в детонацию (ПГД) [4], а в качестве окислителя – кислород. Кроме требования надёжной работы в частотном режиме к преддетонаторам предъявляются требования высокой живучести и компактности – минимальных габаритных размеров, обеспечивающих генерацию инициирующей ДВ при минимальном запасе донорной топливной смеси. Однако продукты детонации кислородных смесей имеют очень высокую температуру (выше 3000 К) и неохлаждаемые препятствия-турбулизаторы быстро разрушаются, тогда как отказ от использования препятствий-турбулизаторов приводит к значительному (в десятки раз [5]) увеличению габаритных размеров преддетонаторов. Известные в литературе способы организации быстрого ПГД в гладких трубах (см., например, [6, 7]) требуют применения относительно сильных источников зажигания.

Цель данной работы – экспериментальное исследование возможности организации быстрого

¹Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской Академии наук, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва

³Научно-исследовательский институт системных исследований Российской Академии наук, Москва

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

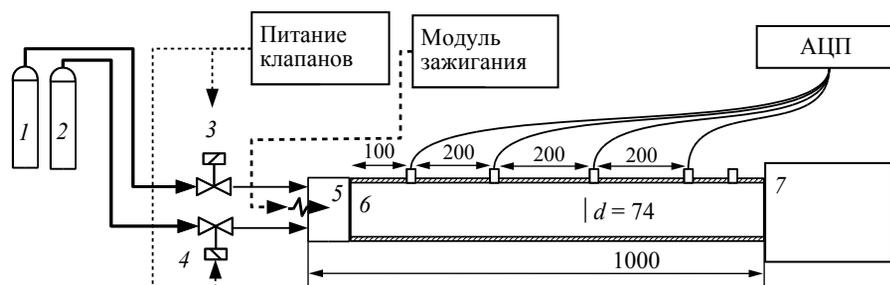


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 2 – баллоны с кислородом и ПГ; 3, 4 – управляемые клапаны; 5 – запальные свечи; 6 – детонационная труба; 7 – буферная ёмкость. Размеры даны в миллиметрах.

циклического ПГД на коротких расстояниях в гладкой трубе при отдельной подаче газообразных топливных компонентов без использования каких-либо препятствий-турбулизаторов. Идея, положенная в основу работы, заключается в создании условий для быстрого ускорения пламени в гладкой трубе с помощью перекрёстных сверхзвуковых газовых струй, обеспечивающих высокую турбулентность.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Установка состоит из стальной ДТ диаметром $d = 74$ мм и длиной 1 м с гладкими стенками толщиной 4,5 мм, системы подачи газообразных топливных компонентов (технического кислорода и природного газа (ПГ) с содержанием метана 98%), а также из систем зажигания, управления и диагностики. Один конец ДТ закрыт: в нём выполнены отверстия для сменных форсунок подачи топливных компонентов с проходным сечением от 0,5 до 10 мм² и для двух запальных свечей (штатные автомобильные свечи с энергией зажигания ~0,2 Дж). Другой конец ДТ присоединён к большой буферной ёмкости объёмом около 2 м³, сообщающейся с атмосферой через проницаемый огнепреградитель.

Газы подаются в форсунки по двум магистралям внутренним диаметром 8 мм из стандартных баллонов объёмом 40 л под давлением от 25 до 150 атм. В магистралях на расстоянии 100 мм от форсунок установлены управляемые электромагнитные клапаны. Объёмы участков магистралей подачи кислорода и ПГ от баллона до клапана ~300 и ~280 мл соответственно. Объём участков магистралей подачи кислорода и ПГ от клапана до форсунки ~5 мл.

Система зажигания основана на штатном автомобильном модуле зажигания, включённом в систему управления. Система управления основана на четырёхканальном реле времени ТЕМП-1м4, которое управляет двумя электромагнитными клапанами и модулем зажигания. Минимальное дискретное время изменения состояния каналов 10 мс. Погрешность времени переключения

каналов менее 5 мс. Система диагностики включает четыре ионизационных зонда (ИЗ), установленных вдоль ДТ, низкочастотный датчик давления, установленный в буферной ёмкости, и два низкочастотных датчика давления, установленных в магистралях подачи топливных компонентов, а также АЦП USB-3000 и персональный компьютер. Ионизационные зонды используются для регистрации перемещения фронта реакции вдоль трубы. Регистрация фронтов медленного горения и детонационных фронтов с помощью ИЗ успешно использовалась ранее и доказала свою надёжность и эффективность [8]. На основе записей ИЗ определяли скорость фронта реакции как частное от деления расстояния между зондами на интервал времени, требуемый для прохождения фронтом этого расстояния. Погрешность определения скорости фронта оценивается в 5%. Датчик давления, расположенный в буферной ёмкости, используется для определения времени истечения продуктов детонации по акустическим колебаниям. Наконец, датчики давления, установленные в магистралях подачи топливных компонентов, используются для мониторинга давления в магистралях. По темпу падения давления в магистралях определяли расходы топливных компонентов и средний состав смеси в ДТ. Погрешность определения среднего коэффициента избытка горючего в ДТ оценивается в 20%.

Процедура проведения эксперимента в режиме одиночного импульса или в частотном режиме состояла в следующем. Перед опытом участки магистралей подачи топливных компонентов между баллонами и клапанами заполнялись газами до некоторого заданного уровня давления, после чего вентили баллонов перекрывались. Далее система управления подавала сигнал на открытие клапанов и через заданное время задержки – на зажигание и на закрытие клапанов. Если опыт проходил в частотном режиме, то по истечении определённого интервала времени, зависящего от рабочей частоты, сигналы на открытие/закрытие клапанов и на зажигание повторялись. Опыт

продолжался до тех пор, пока давление в магистралях не снижалось до некоторого нижнего предельного значения. Таким образом, максимальное количество топливной смеси, участвующее в опыте, – это суммарная масса топливных компонентов, заключённая на участках магистралей между баллонами и клапанами.

Важнейший результат, полученный в работе, – экспериментальное доказательство возможности организации быстрого циклического ПГД на очень коротких расстояниях в гладкой трубе при отдельной подаче газообразных топливных компонентов без использования каких-либо препятствий-турбулизаторов. Такое доказательство получено как для режима одиночного импульса, так и для частотного режима. Режим одиночного импульса – это режим, в котором сигнал на зажигание поступал с частотой менее 0,1 Гц. Частотный режим – это режим с частотой зажигания от 1 до 10 Гц.

На рис. 2 и 3 представлены примеры записей ИЗ (рис. 2) и полученной по ним зависимости скорости фронта реакции от пройденного расстояния (рис. 3) для опыта, выполненного при начальных давлениях в магистралях подачи кислорода и ПГ 150 атм и с площадями проходных сечений форсунок 9 и 4 мм² соответственно. Оценочное среднее значение коэффициента избытка горючего в этом опыте $\Phi \approx 1,5$. По скорости нарастания сигналов ИЗ (на рис. 2 сигналы пишутся вниз) можно утверждать, что они регистрируют изменение ионизационного тока в ДВ (см. [8]). Скорость фронта реакции на первой измерительной базе (см. рис. 3) рассчитана по интервалу времени от начала зажигания до прихода фронта на первый зонд. Из рис. 3 видно, что скорость ДВ уже на расстоянии ~300 мм достигает 2300 м/с, а затем фронт ДВ распространяется квазистационарно со скоростью 2200 м/с. Другими словами, в этом опыте с одиночным импульсом зарегистрирован быстрый ПГД с преддетонационным расстоянием $L \approx 4d$ за время около 0,4 мс после зажигания. Хотя в целом зарегистрированные в опытах значения скорости ДВ согласуются с результатами опытов [9] в широком диапазоне значений коэффициента избытка горючего, в среднем они несколько (на проценты) выше, чем в [9]. Этот факт свидетельствует о том, что в силу короткого измерительного участка наблюдаемые в наших опытах ДВ распространяются в пересжатом, а не в самоподдерживаемом режиме.

Частотный режим работы установки с одновременным открытием и закрытием клапанов подачи топливных компонентов оказался наиболее устойчивым и обеспечивающим быстрый циклический ПГД вплоть до частоты 10 Гц. На рис. 4

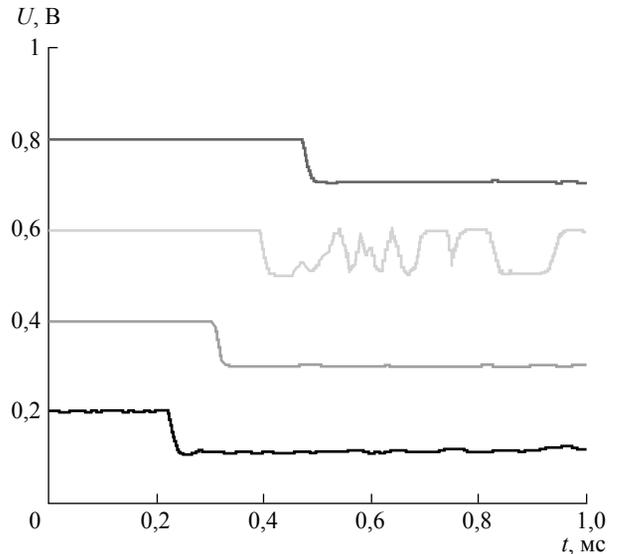


Рис. 2. Пример записей сигналов ИЗ в одиночном импульсе.

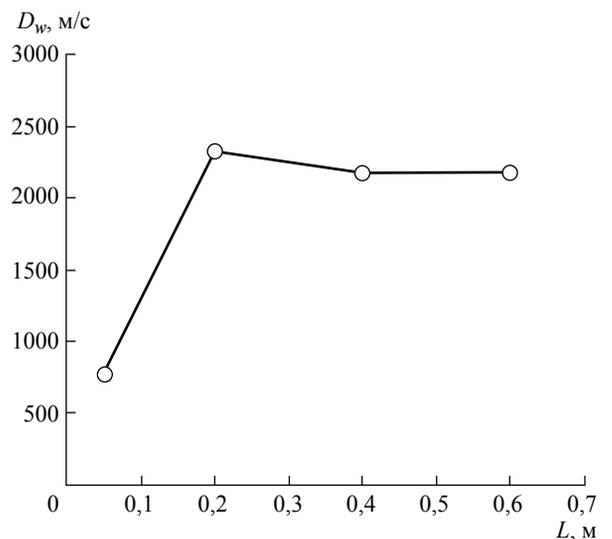


Рис. 3. Пример измеренной зависимости скорости распространения детонационной волны от пройденного расстояния в одиночном импульсе.

представлен пример измеренной зависимости скорости фронта реакции от пройденного расстояния для опыта, выполненного при начальных давлениях в магистралях подачи кислорода и ПГ 96 и 109 атм и с площадями проходных сечений форсунок 9 и 1 мм² соответственно в четырёх последовательных импульсах с частотой 10 Гц. Оценочное среднее значение коэффициента избытка горючего в этом опыте изменялось от $\Phi \approx 0,75$ в первом импульсе до $\Phi \approx 1,48$ в четвёртом импульсе. Как и ранее, скорость фронта реакции на первой измерительной базе рассчитана по интервалу времени от начала зажигания до прихода фронта на первый зонд. Как и в одиночных

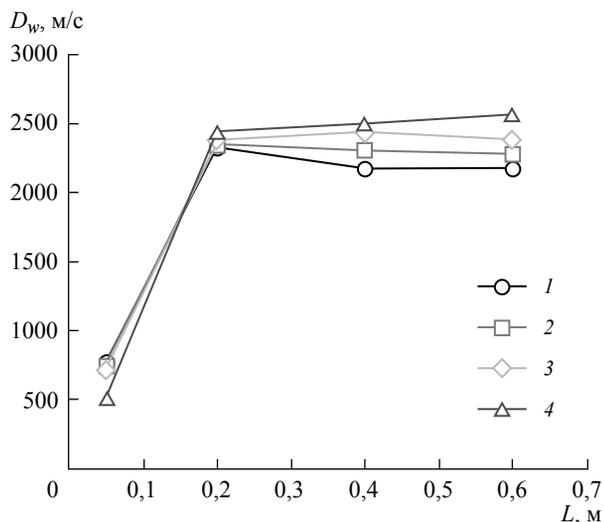


Рис. 4. Пример измеренных зависимостей скорости распространения детонационной волны от пройденного расстояния в четырёх последовательных импульсах при работе установки с частотой 10 Гц.

импульсах, в частотном режиме скорость ДВ уже на расстоянии ~ 300 мм достигает 2300–2400 м/с, а затем фронт ДВ распространяется квазистационарно со скоростью от 2200 до 2500 м/с в зависимости от среднего состава смеси. Другими словами, в этом опыте зарегистрирован быстрый циклический ПГД с частотой 10 Гц с преддетонационным расстоянием $L \approx 4d$ за время около 0,4 мс после зажигания.

Таким образом, нами впервые доказана возможность организации быстрого циклического ПГД на очень коротких расстояниях в гладкой трубе при отдельной подаче газообразных топливных компонентов (кислорода и ПГ) без использования каких-либо препятствий-турбулизаторов. Идея, положенная в основу работы, заключается в создании условий для быстрого ускорения пламени в гладкой трубе с помощью перекрёстных сверхзвуковых газовых струй, обеспечивающих высокую турбулентность. Полученные

результаты можно использовать для создания компактных преддетонаторов для НД- и ИД-камер сгорания перспективных энергопреобразующих устройств. Такие преддетонаторы, представляющие собой участок гладкой трубы длиной 4–5 калибров, могут обеспечить генерацию последовательных детонационных импульсов с частотой до ~ 10 Гц при очень слабом зажигании ($\sim 0,2$ Дж). Важные отличительные особенности такого преддетонатора – отсутствие препятствий-турбулизаторов, сильно усложняющих систему охлаждения, а также частотная генерация перешагивающих ДВ, обладающих более высокой инициирующей способностью, чем самоподдерживающиеся ДВ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 15–08–00782 и 16–29–01065 офи-м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.М. // Тяжелое машиностроение. 2003. № 9. С. 18–22.
2. Roy G. D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D. W. // Progress in Energy and Combust. Sci. 2004. V. 30. № 6. P. 545–672.
3. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
4. Фролов С.М. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
5. Щелкин К.И. // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. В. 7. С. 823–827.
6. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // ДАН. 2004. Т. 394. № 4. С. 503–505.
7. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // ДАН. 2004. Т. 394. № 2. С. 222–224.
8. Фролов С.М., Аксенов В.С., Дубровский А.В., Зангиев А.Э., Иванов В.С., Медведев С.Н., Шамшин И.О. // ДАН. 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67.
9. Laffite P., Bouchet R. Proc. 7th Intern. Symp. on Combustion. L., 1959. P. 504.