

## КОМПАКТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕДЕТОНАТОР ДЛЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ДЕТОНАЦИОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ\*

В. А. Сметанюк<sup>1</sup>, В. С. Аксёнов<sup>2</sup>, А. С. Коваль<sup>3</sup>, С. М. Фролов<sup>4</sup>

**Аннотация:** Представлены результаты экспериментального исследования возможности организации быстрого циклического перехода горения в детонацию (ПГД) на коротких расстояниях в гладкой трубе при раздельной подаче газообразных топливных компонентов — природного газа (ПГ) и кислорода — без использования каких-либо препятствий-турбулизаторов. Идея, положенная в основу работы, заключается в создании условий для быстрого ускорения пламени в гладкой трубе с помощью перекрестных высокоскоростных газовых струй, обеспечивающих высокую турбулентность. Экспериментами, проведенными в режиме одиночного импульса и в частотном режиме (частота до 10 Гц) доказано, что турбулентность, создаваемая сверхзвуковыми перекрестными струями горючего и окислителя, истекающими под давлением от 25 до 150 атм в гладкую детонационную трубу (ДТ) диаметром 74 мм, позволяет обеспечить быстрый ПГД на расстояниях до 300 мм за времена, составляющие доли миллисекунды (~ 0,4 мс). Полученные результаты можно использовать для создания компактных преддетонаторов для детонационных камер сгорания (КС) перспективных энергопреобразующих устройств.

**Ключевые слова:** быстрый ПГД; природный газ; кислород; турбулентность; гладкий канал

### Введение

Все существующие концепции транспортно-го 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, причем речь всегда идет о медленном горении — горении с существенно дозвуковой скоростью. К настоящему времени уже сложилось понимание того, что дальнейшее совершенствование этих концепций может привести лишь к незначительному повышению энергоэффективности практических устройств даже при очень больших капиталовложениях. 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-детонаци-

онным (ИД) [2] и с непрерывно-детонационным (НД) рабочим процессом [3]. Импульсно-детонационный рабочий процесс основан на циклическом заполнении КС горючей смесью с последующим зажиганием и распространением детонации вдоль КС. Непрерывно-детонационный рабочий процесс основан на непрерывной подаче горючей смеси в КС и ее непрерывном сгорании в одной или нескольких детонационных волнах (ДВ), циркулирующих в тангенциальном направлении поперек потока.

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 ДВ из донорной топливной смеси с высокой детонационной способностью в 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

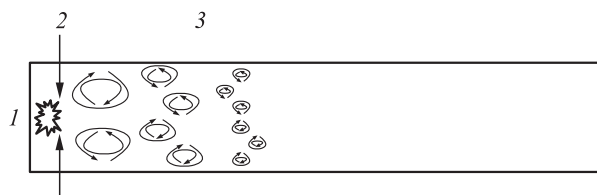
\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 15-08-00782 и 16-29-01065 офи-м).

<sup>1</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smetanuk@chph.ras.ru

<sup>2</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

<sup>3</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН, ASKoval@mephi.ru

<sup>4</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; smfrol@chph.ras.ru



**Рис. 1** Схема течения в гладкой трубе с перекрестными высокоскоростными газовыми струями, обеспечивающими высокую турбулентность для быстрого ПГД: 1 — запальная свеча; 2 — струи топливных компонентов; 3 — турбулентные вихри в свежей смеси

в случае срыва режима. В «предетонаторах» (так в литературе называют ДТ с донорной топливной смесью), как правило, используются слабые источники зажигания (запальные свечи), препятствия-турбулизаторы, обеспечивающие быстрый ПГД [4], а в качестве окислителя — кислород. Кроме требования надежной работы в частотном режиме к предетонаторам предъявляют 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 предетонаторов.

Известные в литературе способы организации быстрого ПГД в гладких трубах (см., например, [6, 7]) требуют применения относительно сильных источников зажигания.

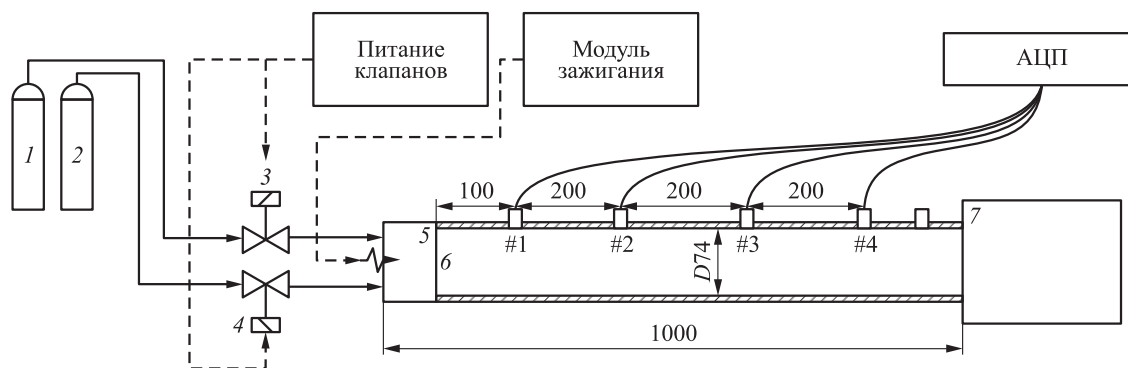
Цель данной работы — экспериментальное исследование возможности организации быстрого

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 перекрестных высокоскоростных газовых струй, обеспечивающих высокую турбулентность (рис. 1).

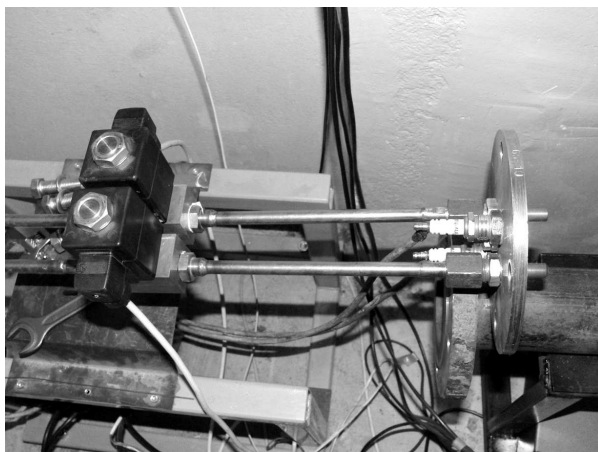
## Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

На рис. 2 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 ПГ с содержанием метана 98%), а также из систем зажигания, управления и диагностики. Один конец ДТ закрыт (рис. 3): в нем выполнены отверстия для сменных форсунок подачи топливных компонентов с проходным сечением от 0,5 до 10 мм<sup>2</sup> и для двух запальных свечей (штатные автомобильные свечи с энергией зажигания  $\sim 0,2$  Дж). Другой конец ДТ присоединен к большой буферной емкости объемом около 2 м<sup>3</sup>, сообщающейся с атмосферой через проникаемый огнепреградитель.

Газы подаются в форсунки по двум магистралям внутренним диаметром 8 мм с управляемыми электромагнитными клапанами Burkret 2400 из стандартных баллонов объемом 40 л под давлением от 25 до 150 атм. Клапаны установлены в магистралях на расстоянии 100 мм от форсунок. Объемы участков магистралей подачи кислорода и ПГ от



**Рис. 2** Схема экспериментальной установки: 1 и 2 — баллоны с кислородом и ПГ; 3 и 4 — управляемые клапаны; 5 — запальные свечи; 6 — ДТ; 7 — буферная емкость. Размеры указаны в миллиметрах; #1...#4 — ионизационные зонды



**Рис. 3** Фотография узла ввода топливных компонентов с электромагнитными клапанами

баллона до клапана  $\sim 300$  и  $\sim 280$  мл соответственно. Объем участков магистралей подачи кислорода и ПГ от клапана до форсунки  $\sim 5$  мл.

Система зажигания основана на штатном автомобильном модуле зажигания, включенном в систему управления.

Система управления основана на четырехканальном реле времени ТЕМП-1м4, которое управляет двумя электромагнитными клапанами и модулем зажигания. Минимальное дискретное время изменения состояния каналов составляет 10 мс. Погрешность времени переключения каналов — менее 5 мс.

Система диагностики включает четыре ионизационных зонда, установленные вдоль ДТ (см. рис. 2), низкочастотный датчик давления (КУРАНТ ДИ), установленный в буферной емкости, и 2 низкочастотных датчика давления (КУРАНТ ДИ), установленных в магистралах подачи топливных компонентов, а также аналого-цифровой преобразователь (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 ионизационных зондов успешно использовалась авторами ранее и доказала свою надежность и эффективность [8].

На основе записей ионизационных зондов 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 емкости, используется для определения времени истечения продуктов детона-

ции по акустическим колебаниям. Наконец, датчики давления, установленные в магистралах подачи топливных компонентов, используются для мониторинга давления в магистралах. По темпу падения давления в магистралах определяли расходы топливных компонентов и средний состав смеси в ДТ. Погрешность определения среднего коэффициента избытка горючего в ДТ оценивается в 20%.

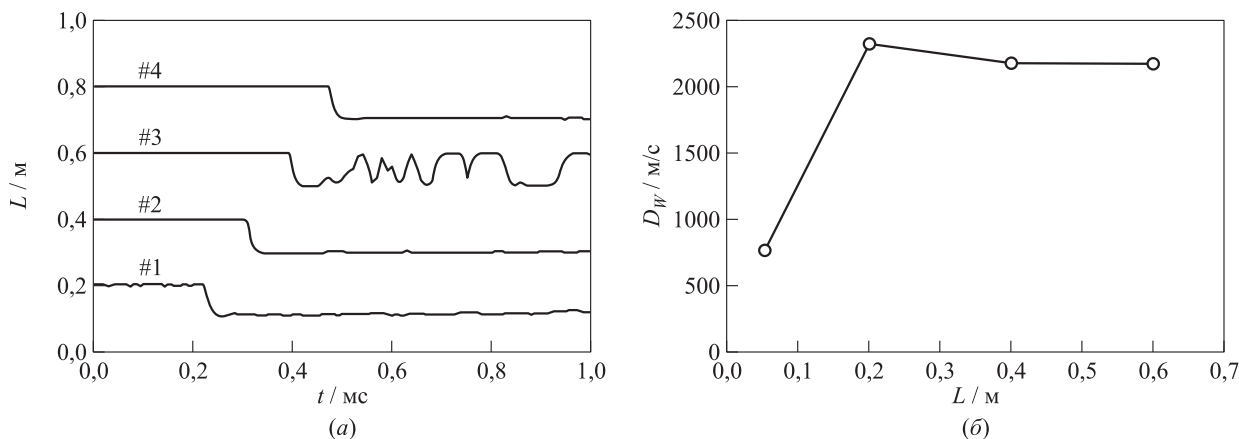
Процедура проведения эксперимента в режиме одиночного импульса или в частотном режиме состояла в следующем. Перед опытом участки магистралей подачи топливных компонентов между баллонами и клапанами заполнялись газами до некоторого заданного уровня давления, после чего вентили баллонов перекрывались. 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 определенного интервала времени, зависящего от рабочей частоты, сигналы на открытие/закрытие клапанов и на зажигание повторялись. Опыт продолжался до тех пор, пока давление в магистралах не снижалось до некоторого нижнего предельного значения. Таким образом, максимальное количество топливной смеси, участвующее в опыте — это суммарная масса топливных компонентов, заключенная на участках магистралей между баллонами и клапанами.

## Результаты экспериментов

Основной 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.

### Одиночные импульсы

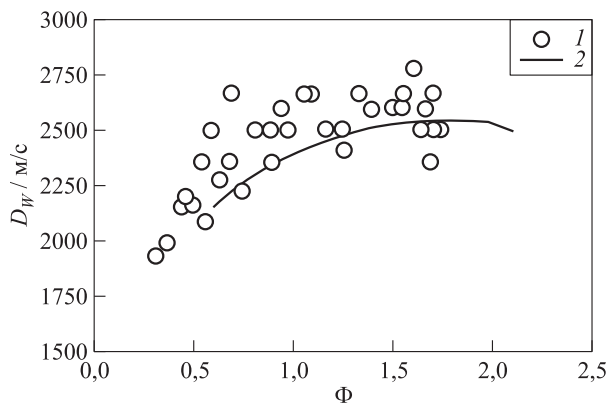
На рис. 4 представлены примеры записей ионизационных зондов (рис. 4, а) и полученной по ним зависимости скорости фронта реакции от пройденного расстояния (рис. 4, б) для опыта, выполненного при начальных давлениях в магистралах подачи кислорода и ПГ 150 атм и с площадями проходных



**Рис. 4** Примеры разверток сигналов ионизационных зондов #1...#4 (а) и измеренной зависимости скорости распространения ДВ от пройденного расстояния в одиночном импульсе

сечений форсунок 9 и 4 мм<sup>2</sup> соответственно. Оценочное среднее значение коэффициента избытка горючего в этом опыте  $\Phi \approx 1,5$ . По скорости нарастания сигналов ионизационных зондов (на рис. 4, а сигналы пишутся вниз) можно утверждать, что они регистрируют изменение ионизационного тока в ДВ (см. [8]). Скорость фронта реакции на первой измерительной базе (см. рис. 4, б) рассчитана по интервалу времени от начала зажигания до прихода фронта на первый зонд. Из рис. 4, б видно, что скорость ДВ уже на расстоянии  $\sim 300$  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.

На рис. 5 значками представлена зависимость квазистационарной скорости ДВ, измерен-



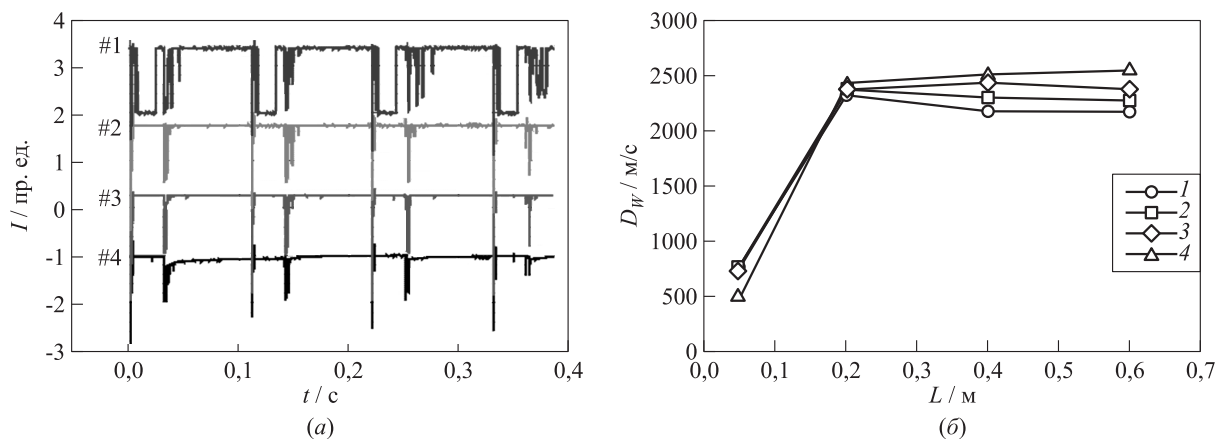
**Рис. 5** Зависимость квазистационарной скорости распространения ДВ от коэффициента избытка горючего: 1 — эксперименты данной работы; 2 — эксперименты [9]

ной в экспериментах с одиночными импульсами, от среднего значения коэффициента избытка горючего. Средний коэффициент избытка горючего изменялся только за счет изменения давлений в топливных магистралях (проходные сечения форсунок подачи кислорода и ПГ не изменялись и составляли 9 и 4 мм<sup>2</sup> соответственно). Для сравнения представлена кривая, полученная в экспериментах [9]: видно удовлетворительное согласие результатов. Тот факт, что экспериментальные точки в целом лежат выше кривой, свидетельствует о том, что в силу короткого измерительного участка наблюдаемые в наших опытах ДВ распространяются в пересжатом, а не в самоподдерживающемся режиме.

### Частотный режим

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. 6 представлены примеры записей ионизационных зондов (рис. 6, а) и полученной по ним зависимости скорости фронта реакции от пройденного расстояния (рис. 6, б) 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 мм<sup>2</sup> соответственно в четырех 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 четвертом импульсе. Как и ранее, скорость фронта реакции на первой измерительной базе (см. рис. 6, б) рассчитана по интервалу времени от начала зажигания до



**Рис. 6** Примеры записей сигналов ионизационных зондов #1...#4 (а) и измеренных зависимостей скорости распространения ДВ от пройденного расстояния в четырех последовательных импульсах при работе установки с частотой 10 Гц

прихода фронта на первый зонд. Как и в одиночных импульсах, в частотном режиме скорость ДВ уже на расстоянии  $\sim 300$  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.

## Заключение

Проведено экспериментальное исследование возможности организации быстрого циклического ПГД на коротких расстояниях в гладкой трубе при раздельной 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 перекрестных высокоскоростных газовых струй, обеспечивающих высокую турбулентность.

Экспериментами, проведенными в режиме одиночного импульса и в частотном режиме (частота до 10 Гц), доказано, что турбулентность, создаваемая сверхзвуковыми перекрестными струями окислителя и горючего, истекающими под давлением от 25 до 150 атм в гладкую ДТ диаметром 74 мм, позволяет обеспечить быстрый ПГД на расстояниях до 300 мм ( $\sim 4$  диаметра ДТ) за времена, составляющие десятые доли миллисекунды ( $\sim 0,4$  мс).

Полученные результаты можно использовать для создания компактных преддетонаторов для НД- и ИД-камер сгорания перспективных энергопре-

образующих устройств. Такие преддетонаторы, представляющие собой участок гладкой трубы длиной 4–5 калибров, могут обеспечить генерацию последовательных детонационных импульсов с частотой до  $\sim 10$  Гц при очень слабом зажигании ( $\sim 0,2$  Дж). Перепуск детонационных импульсов в НД- или ИД-камеру может быть осуществлен одним из известных способов. Важные отличительные особенности такого преддетонатора — отсутствие препятствий-турбулизаторов, сильно осложняющих систему охлаждения, а также частотная генерация пересжатых ДВ, обладающих более высокой инициирующей способностью, чем самоподдерживающиеся ДВ.

## Литература

1. Фролов С. М. Перспективы использования детонационного сжигания топлива в энергетике и на транспорте // Ж. тяжелое машиностроение, 2003. № 9. С. 18–22.
2. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust. Sci., 2004. Vol. 30. Iss. 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. Быстрый переход горения в детонацию // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
5. Щелкин К. И. Влияние шероховатости трубы на возникновение и распространение детонации в газах // ЖЭТФ, 1940. Т. 10. Вып. 7. С. 823–827.
6. Фролов С. М., Басевич В. Я., Аксенов В. С., Полихов С. А. Иницирование газовой детонации бегущим импульсом принудительного зажигания // Докл. РАН, 2004. Т. 394. № 2. С. 222–224.

7. Фролов С. М., Басевич В. Я., Аксенов В. С., Полихов С. А. Иницирование детонации в распылах жидкого топлива последовательными электрическими разрядами // Докл. РАН, 2004. Т. 394. № 4. С. 503–505.
8. Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Зангев А. Э., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Хемионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания // Докл. РАН, 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67.
9. Laffite P., Bouchet R. Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders // 7th Symposium (International) on Combustion, 1959. P. 504.

Поступила в редакцию 28.02.17

## COMPACT PULSE PREDETONATOR TO INITIATE THE WORKING PROCESS IN DETONATION CHAMBERS

V. A. Smetanuk, V. S. Aksenov, A. S. Koval', and S. M. Frolov

<sup>1</sup>N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

**Abstract:** Presented are the results of experimental study of the possibility of organizing a fast cyclic deflagration-to-detonation transition (DDT) at short distances in a smooth tube with separate supply of gaseous fuel components — natural gas and oxygen — without the use of turbulizing obstacles. The idea underlying the work is to create the conditions for fast flame acceleration in a smooth tube by means of cross-flow high-speed gas jets providing high turbulence. The experiments carried out in a single pulse mode and in a frequency mode (frequency up to 10 Hz) have shown that the turbulence created by supersonic fuel and oxidizer jets which are injected under a pressure ranging from 25 to 150 atm in a smooth detonation tube 74 mm in diameter allows obtaining the fast DDT at distances less than 300 mm for the time interval shorter than 0.4 ms. The obtained results can be used to create compact predetonators for detonation combustion chambers of a perspective energy conversion devices.

**Keywords:** fast DDT; natural gas; oxygen; turbulence; smooth channel

## Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants 15-08-00782 and 16-29-01065 ofi-m).

## References

1. Frolov, S. M. 2003. Perspektivy ispol'zovaniya detonatsionnogo szhiganiya topliva v energetike i na transporte [Perspectives of application of detonative fuel combustion in power engineering and transportation]. *Zh. tyazheloe mashinostroenie* [J. Heavy Machinery] 9:18–22.
2. Roy, G. D., S. M. Frolov, A. A. Borisov, and D. W. Netzer. 2004. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective. *Prog. Energ. Combust. Sci.* 30(6):545–672.
3. Bykovskii, F. A., and S. A. Zhdan. 2013. *Nepreryvnaya spinovaya detonatsiya* [Continuous spin detonation]. Novosibirsk: SB RAS Publ. 423 p.
4. Frolov, S. M. 2008. Fast deflagration-to-detonation transition. *Russ. J. Phys. Chem. B* 2(3):442–455.
5. Shchelkin, K. I. 1940. Vliyanie sherokhovatosti trubyy na vozniknovenie i rasprostranenie detonatsii v gazakh [Effect of tube surface roughness on origin and propagation of detonation in gas]. *Sov. Phys. JETP* 10:823–827.
6. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, V. S. Aksenov, and S. A. Polikhov. 2004. Initiation of gaseous detonation by a traveling forced ignition pulse. *Dokl. Phys. Chem.* 394(1):16–18.
7. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, V. S. Aksenov, and S. A. Polikhov. 2004. Detonation initiation in liquid fuel sprays by successive electric discharges. *Dokl. Phys. Chem.* 394(2):39–41.
8. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, A. V. Dubrovskii, A. E. Zangiev, V. S. Ivanov, S. N. Medvedev, and I. O. Shamshin. 2015. Chemiionization and acoustic diagnostics of the process in continuous- and pulse-detonation combustors. *Dokl. Phys. Chem.* 465(1):273–278.
9. Laffite, P., and R. Bouchet. 1959. Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders. *7th Symposium (International) on Combustion*. 504.

Received February 28, 2017

## Contributors

**Smetanuk Victor A.** (b. 1978) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; smetanuk@chph.ras.ru

**Aksenov Victor S.** (b. 1952) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; v.aksenov@mail.ru

**Koval' Alexey S.** (b. 1985) — research engineer, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; senior lecturer, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; ASKoval@mephi.ru

**Frolov Sergey M.** (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru