

**ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ  
БЕГУЩИМ ИМПУЛЬСОМ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЗАЖИГАНИЯ**

© 2004 г. С. М. Фролов, В. Я. Басевич, В. С. Аксенов, С. А. Полихов

Представлено академиком Ал.Ал. Берлиным 07.10.2003 г.

Поступило 07.10.2003 г.

По оценкам Я.Б. Зельдовича [1], реактивные двигатели, использующие детонационное сгорание топлива, должны быть термодинамически более эффективными, чем двигатели, работающие на медленном (дефлаграционном) сжигании топлива. В настоящее время активно изучается возможность сжигания топлива в периодически генерируемых детонационных волнах (ДВ) для создания реактивной тяги [2]. Одна из наиболее сложных проблем на пути создания импульсных детонационных двигателей – обеспечение условий для надежного инициирования ДВ в топливно-воздушных смесях на коротких расстояниях порядка 1 м.

В 1955 г. Я.Б. Зельдович и А.С. Компанец [3] рассмотрели задачу об инициировании газовой детонации с помощью принудительного зажигания распределенными внешними источниками, установленными вдоль канала с горючим газом. Если видимая скорость перемещения поджигающего импульса постоянна и равна скорости детонации в газе, в конечном итоге должна образоваться ДВ. В [4–6] путем численных расчетов показано, что ДВ действительно возникает, если подвод энергии осуществлять синхронно с распространяющейся ударной волной (УВ). При этом безразлично, подается ли энергия с помощью внешних источников или в газе созданы условия для самовоспламенения. В данной работе впервые получено экспериментальное доказательство идеи [3].

В экспериментах использовали закрытую гладкую трубу диаметром 51 мм и длиной 1.5 м. Труба состояла из разгонной секции длиной 1 м и измерительной секции длиной 0.5 м. В торец разгонной секции помещали электрический разрядник. Начиная с сечения 1, отстоящего от торца на 26 мм, вдоль разгонной секции с шагом 100 мм (в сечениях 2, 3 и т.д.) устанавливали дополнительные электрические разрядники. Электропитание каждого разрядника включало высоковольтный конденсатор. Сигнал запуска разряда поступал на

разрядник от многоканального управляющего блока. Управляющий блок позволял заранее устанавливать время задержки запуска разряда для каждого разрядника. Продолжительность разрядного тока 100 мкс. Трубу наполняли стехиометрической пропано-воздушной смесью до давления 1 атм. Для измерения динамики волновых процессов использовали пьезоэлектрические датчики давления и ионизационные зонды. Для датчиков и зондов вдоль всей трубы с шагом 100 мм были предусмотрены гнезда, причем в разгонной секции эти гнезда были размещены в одном сечении с разрядниками. Система диагностики включала осциллографы, частотомеры и персональный компьютер. Цель экспериментов – подобрать времена запуска последовательных разрядов таким образом, чтобы обеспечить максимальное ускорение слабой первичной УВ по мере ее продвижения вдоль трубы и инициировать ДВ. Первичная УВ формировалась при запуске торцевого разрядника и разрядника в сечении 1.

На рис. 1 показана пространственно-временная диаграмма с результатами опытов. Напряжение на батареях конденсаторов 2500 В. Емкость конденсатора торцевого разрядника 200 мкФ, разрядника в сечении 1400 мкФ и каждого последующего разрядника 100 мкФ. Штриховые линии 342 м/с и 1800 м/с соответствуют характерным значениям скорости звука и скорости детонации Чепмена–Жуге в горючем газе. Черные кружки соответствуют найденным оптимальным значениям времен запуска разрядников, а светлые кружки – измеренному времени прихода УВ в соответствующее сечение. При срабатывании в одном опыте двух, трех и т.д. до семи разрядников детонация в трубе не возникала. Только при последовательном запуске восьми разрядников в одном опыте скорость первичной УВ постепенно возрастала от  $850 \pm 12$  до  $1770 \pm 25$  м/с. т. е., начиная с сечения 7 или 8 (на расстоянии 0.6–0.7 м от сечения 1), в разгонной секции возникла ДВ. В измерительной секции ДВ распространялась с постоянной скоростью 1700–1800 м/с без дальнейшего воздействия разрядами, о чем свидетельствуют записи датчиков давления и ионизацион-

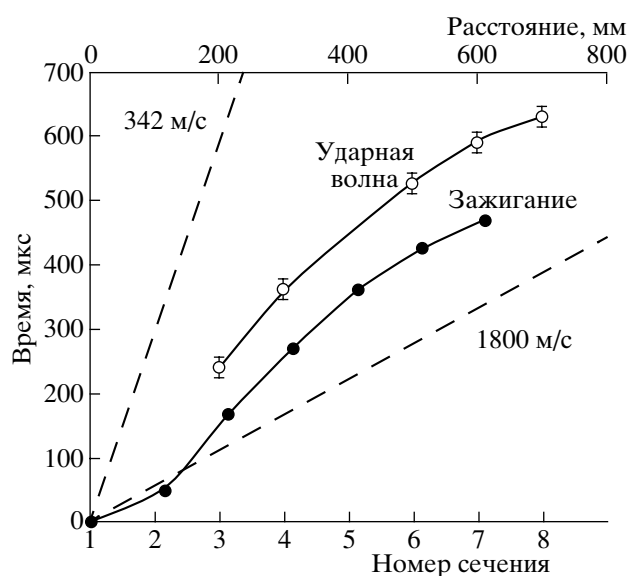


Рис. 1. Экспериментальная  $x-t$  диаграмма ускорения УВ в стехиометрической пропано-воздушной смеси. Детонация возникает в сечении 7.

ных зондов. На рис. 2 показан пример записей давления в сечениях 11 и 13 (на расстоянии 1.0–1.2 м от сечения 1). Средняя скорость ДВ на этой измерительной базе (200 мм) равна  $1745 \pm 25$  м/с. Для получения ДВ разрядники необходимо было запускать с опережением по отношению к времени прихода УВ в соответствующее сечение трубы. Требуемое опережение зажигания составило 80–100 мкс, что коррелирует с продолжительностью разрядного тока.

Дополнительно исследовали чувствительность процесса к малым отклонениям времени задержки запуска разрядников. Запуск разрядника в сечении 4 с задержкой 320 мкс вместо оптимального значения 270 мкс (см. рис. 1) приводил к срыву инициирования ДВ при прочих равных условиях. Такой же результат получен при отклонении времени запуска разрядников в сечениях 5, 6 и 7 на 50 мкс от соответствующего оптимального значения. Эти факты свидетельствуют о резонансном характере процесса.

Таким образом, экспериментально доказано, что детонацию в горючем газе можно инициировать с помощью бегущего импульса принудительного зажигания, который формируется путем последовательного запуска нескольких разрядников с тщательно подобранными временами задержки. Такой способ инициирования детонации существенно отличается от традиционных способов — прямого инициирования или перехода горения в детонацию. При прямом инициировании одним источником детонация возникает после стадии ослабления очень сильной первичной УВ, поэтому большая доля энергии инициатора и горючего

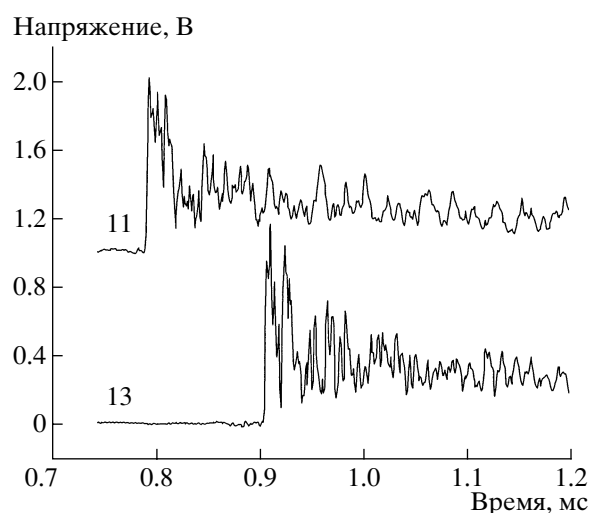


Рис. 2. Записи давления в сечениях 11 и 13.

газа расходуется нецелевым образом — на сжатие, нагрев и термическое разложение продуктов реакции за УВ. Расстояние, необходимое для возникновения самоподдерживающегося плоского фронта детонации пропано-воздушной смеси, составляет 1.0–1.5 м [7]. При переходе горения в детонацию необходимо, чтобы пламя ускорилось до видимой скорости порядка 1000 м/с. В случае пропано-воздушной смеси для этого надо иметь гладкую трубу длиной более 260 диаметров [8] или трубу с турбулизаторами в виде регулярных препятствий длиной более 60 диаметров [9]. Часть энергии при таком инициировании детонации также расходуется нецелевым образом — идет на сжатие и нагрев большого объема продуктов сгорания.

При использовании бегущего импульса зажигания обеспечивается целевая подача энергии горючего газа во фронт УВ, которая быстро усиливается и достигает интенсивностей, достаточных для возбуждения детонации. Для получения детонации на кратчайших расстояниях поджигающий импульс должен перемещаться с ускорением. В проведенных экспериментах ДВ возникала на длинах 0.6–0.7 м, равных 12–14 диаметрам трубы. Первичная УВ была относительно слабой — имела скорость (между сечениями 2 и 4)  $M \cong 2.0-2.5$ . Суммарная номинальная энергия электрических разрядов для условий рис. 1 равна  $1.68$  МДж/м<sup>2</sup>, что меньше значения  $3$  МДж/м<sup>2</sup>, приведенного в [7] для критической энергии инициирования детонации плоским зарядом ВВ. С учетом того, что эффективность преобразования электрической энергии разряда в энергию УВ мала по сравнению с эффективностью ВВ и обычно составляет около 10% [10], реальное значение суммарной критической энергии инициирования детонации оказывается значительно меньшим.

На основе результатов опытов можно сделать три вывода, позволяющих рассматривать описанный способ инициирования ДВ перспективным для применения в импульсных детонационных двигателях. Во-первых, он обеспечивает приемлемые расстояния до появления ДВ в гладкой трубе. Во-вторых, энергия каждого отдельного источника зажигания много меньше критической энергии, требуемой для прямого инициирования детонации одним источником. В-третьих, получаемая суммарная энергия источников зажигания оказывается значительно меньше критической энергии прямого инициирования детонации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б. // ЖТФ. 1940. т. 10. № 17. С. 1453–1461.
2. Фролов С.М. // Тяжелое машиностроение. 2003. № 9. С. 19–22.
3. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации. М.: Гостехтеориздат, 1955. 268 с.
4. Зельдович Я.Б., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М., Сиваишинский Г.И. // ПМТФ. 1970. № 2. С. 76–84.
5. Zel'dovich Ya.B., Gelfand B.E., Tsyganov S.A. et al. // Progress Astronaut. and Aeronaut. 1988. V. 114. P. 99–123.
6. Lee J.H.S., Moen I.O. // Progress Energy and Combust. Sci. 1980. V. 6. № 4. P. 359–389.
7. Borisov A. A. In: Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Applications, M.: ENAS Publ., 1999. P. 3–24.
8. Veysiere B., Kerampran S., Proust C., Gilles S. Proc. XIX ICDERS. Hakone, 2003. Paper № 154. ISBN 4-9901744-1-0.
9. Santoro R. J., Lee S.-Y., Conrad C., et al. In: Advances in Confined Detonations. M.: Torus Press, 2002. P. 243–254.
10. Nettleton M. A. Gaseous Detonations. L.; N.Y.: Chapman and Hall, 1987. 255 p.