

**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**

УДК 536.46:533.6:621.4

*М. С. АССАД, О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ***СПОСОБЫ УСКОРЕНИЯ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ  
В МАЛОГАБАРИТНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ РЕАКТИВНОГО ТИПА***Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси**(Поступила в редакцию 03.04.2015)*

**Введение.** Проблема повышения тяговой и топливной эффективности авиационных двигателей вызвала интерес к научным разработкам по созданию детонационного двигателя, способного заменить существующие силовые установки летательных аппаратов, о чем свидетельствуют многочисленные публикации (например, [1–14]). Идея использования управляемой детонации в технических устройствах не нова. Еще в 40-е годы прошлого столетия Я. Б. Зельдович и Г. Хоффман исследовали возможность сжигания топлива в детонационной волне для получения реактивной тяги. Существует множество фундаментальных и технических проблем, препятствующих использованию детонации в технических устройствах, некоторые аспекты которых освещены в [1–5, 8, 12, 14]. Одна из ключевых проблем – инициирование детонации в относительно коротких трубах (длиной до 1 м) при низкой энергии зажигания смеси (до нескольких джоулей). Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию гетерогенной детонации в малогабаритной камере сгорания импульсного типа – модели детонационного двигателя. В качестве топлива использован н-гептан, окислителями служили кислород и воздух.

В данной статье рассмотрены три физико-технических способа, ускоряющих переход горения в детонацию, реализованных в условиях, приемлемых для практического применения. Первый способ заключался в размещении в предкамере, где происходит впрыск топлива и смешение его с окислителем, пористой набивки из металлической (медной, стальной) стружки – ПНМС; набивка хаотично заполняла полость предкамеры. Вторым способом – термическая активация горючей смеси, состоящая в повышении начальной температуры смеси перед ее зажиганием путем нагрева корпуса предкамеры до необходимой температуры. Третий способ – совместное использование ПНМС и термической активации смеси.

**Постановка эксперимента.** Исследования проводились в импульсной камере сгорания (рис. 1), состоящей из узла подготовки и воспламенения горючей смеси, детонационной трубы и платформы, вдоль которой перемещается камера сгорания общей длиной 680 мм.

Импульсная камера сгорания работает в циклическом режиме. Окислитель (воздух, кислород) подается через кольцевое сопло специальной конфигурации, установленное в предкамере перпендикулярно продольной оси установки. Жидкое топливо впрыскивается с помощью форсунки, размещенной в радиальной плоскости кольцевого сопла перпендикулярно оси установки. Формирующаяся в предкамере горючая смесь воспламеняется посредством автомобильной свечи зажигания, расположенной посередине торца предкамеры.

Рабочий процесс импульсной камеры сгорания контролируется с помощью специально разработанных системы автоматизации и программы управления. Автоматизированная система управления позволяет в широких пределах регулировать условия эксперимента, регистрировать текущие параметры рабочего процесса, а также хранить и обрабатывать экспериментальные данные.



Рис. 1. Общий вид импульсной детонационной камеры сгорания на жидком топливе

На рис. 2 в качестве примера показана *регистраграмма* серии последовательных циклов при сгорании смеси гептана с кислородом и воздухом при значениях коэффициента избытка горючего  $\phi = 1,19$  и частоты циклов  $f = 10$  Гц.

Для ускорения перехода горения в детонацию в одной серии опытов использовалось препятствие в виде ПНМС, которая неупорядоченно размещалась в полости предкамеры. Пористость набивки определялась по методике [12] и равна 0,44. В другой серии опытов горючая смесь подвергалась термической активации путем нагревания узла подготовки и воспламенения при помощи электрического фена, обеспечивавшего температуру до 200 °С.

### Анализ результатов экспериментов

Условия экспериментов представлены в таблице. Здесь  $T_0$  – начальная температура смеси;  $D_{CJ}$  – скорость детонации в точке Чепмена–Жуге, рассчитанная с помощью программы CHEMKIN; ПГД – переход горения в детонацию; ТА – термическая активация смеси;  $\lambda$  – степень наполнения импульсной камеры сгорания смесью, представляющая собой отношение фактического объема горючей смеси, подаваемого за цикл, к геометрическому объему всей полости трубы.

Параметры детонационного сжигания смесей гептана с кислородом и воздухом ( $C_7H_{16} + O_2 + \text{воздух}$ ) в импульсной камере сгорания

№ смеси	Способ ускорения ПГД	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\phi$	$D_{CJ}, \text{м/с}$	Воздух / $O_2$	$\lambda$
1	ТА	37	1,95	2244	1,67	1,00
2	ПНМС	24	2,03	2270	1,42	1,00
3	ПНМС + ТА	65	1,93	2285	1,33	0,85
4	ПНМС + ТА	65	1,95	2293	1,27	0,62

**Термическая активация смеси.** Если не предпринимать никаких специальных мер, то в камере сгорания будет иметь место быстрое горение с небольшой скоростью волны, но детонации не возникает. Повышение начальной температуры смеси перед зажиганием – фактор, существенно ускоряющий переход горения в детонацию. Из рис. 3, а видно, что незначительный подогрев (до 40 °С) смеси № 1 приводит к возникновению пересжатой детонации на третьей измерительной базе с  $\psi_3 = 1,17$  ( $\psi_3$  – коэффициент интенсивности детонации, равный отношению фактической скорости волны к скорости детонации в точке Чепмена–Жуге для данной смеси; индекс указывает на номер измерительной базы) по сравнению со смесью, сжигаемой при комнатной температуре.

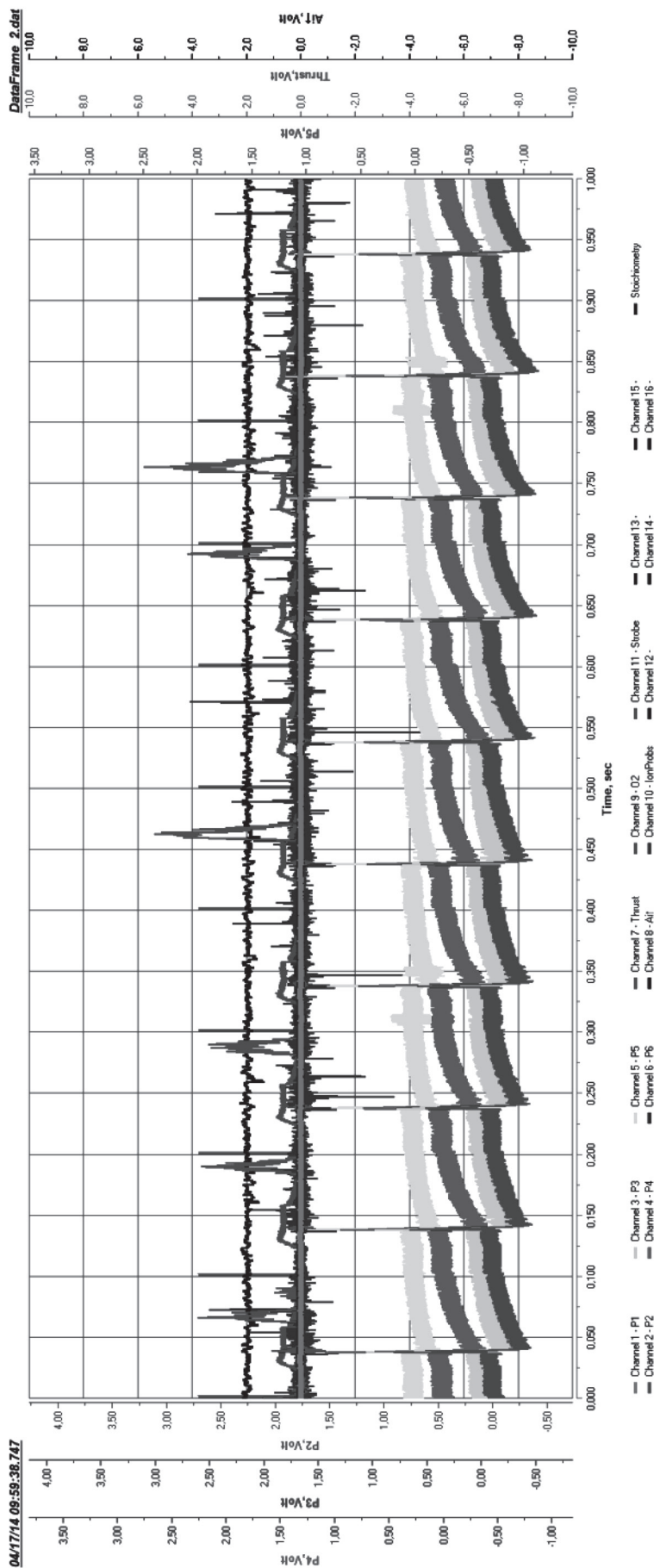


Рис. 2. Серия последовательных циклов смеси гептана с кислородом и воздухом при  $\phi = 1,19$  и  $f = 10$  Гц, кривые (снизу вверх): первая ... четвертая – сигнал четырех датчиков давления; пятая – расход кислорода; шестая – расход датчика тяги; седьмая – расход воздуха

**Пористое препятствие.** Внедрение в сферическую предкамеру ускорителя детонации в виде ПНМС привело к тому, что в смеси № 2 гептана с кислородом и воздухом при непрерывной подаче воздуха уже на первой измерительной базе возникала сильная детонационная волна с  $\psi_1 = 0,91$ , которая на второй базе становилась слегка пересжатой ( $\psi_2 = 1,03$ ) с некоторым замедлением на третьей базе до  $\psi_3 = 0,97$  (рис. 3, б).

Пористое препятствие как ускоритель перехода горения в детонацию имеет преимущество и перед термической активацией смеси, когда в камере без пористой набивки сжигается смесь, нагретая до определенной температуры. При нагреве до 40 °С перед воспламенением смеси № 1 в камере без набивки детонация инициировалась на третьей измерительной базе (рис. 3, а). Размещение в предкамере ПНМС способствовало тому, что в несколько более богатой ( $\phi = 2,03$ ) не нагретой смеси № 2 на всех трех базах распространялась сильная и устойчивая детонационная волна практически со скоростью детонации в точке Чепмена–Жуге (рис. 3, б).

**Камера с пористой набивкой при термической активации смеси.** В случае одновременного воздействия термической активации смеси и ПНМС на процессы в импульсной камере усиливается эффект, приводящий к сокращению преддетонационного расстояния (смеси № 3, № 4). Нагрев до 65 °С (смесь № 3) способствовал формированию по всей трубе с пористой набивкой сильной детонационной волны, которая «разгонялась» почти до скорости в точке Чепмена–Жуге на первой измерительной базе ( $\psi_1 = 0,99$ ) с последующим замедлением до  $\psi_2 = 0,85$  и  $\psi_3 = 0,86$  на второй и третьей базах (рис. 4, а). Даже при уменьшении наполнения трубы до  $\lambda = 0,62$  (смесь № 4) совместное воздействие термической активации и пористого препятствия привело к возникновению на первой базе сильной детонации с  $\psi_1 = 0,98$  (рис. 4, б).

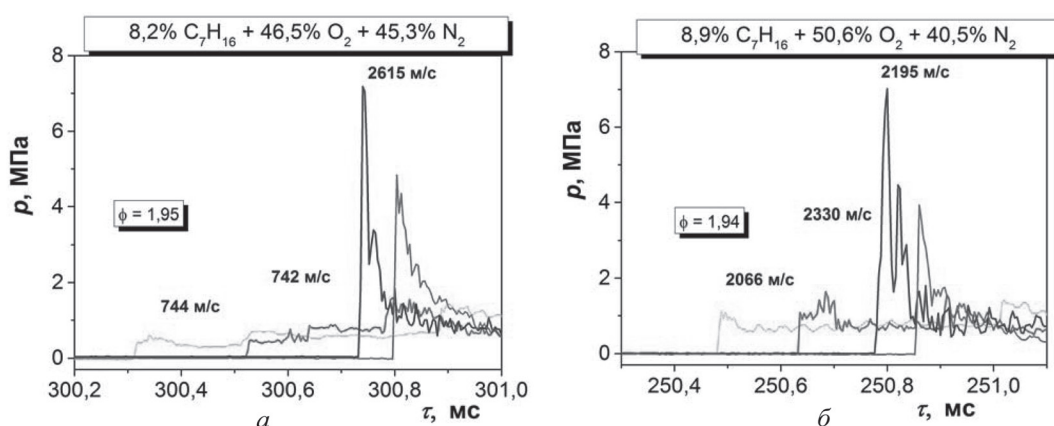


Рис. 3. Динамика распространения волны в импульсной камере сгорания без ПНМС: а – смесь № 1; б – смесь № 2; условия эксперимента и нумерация смесей соответствуют таблице

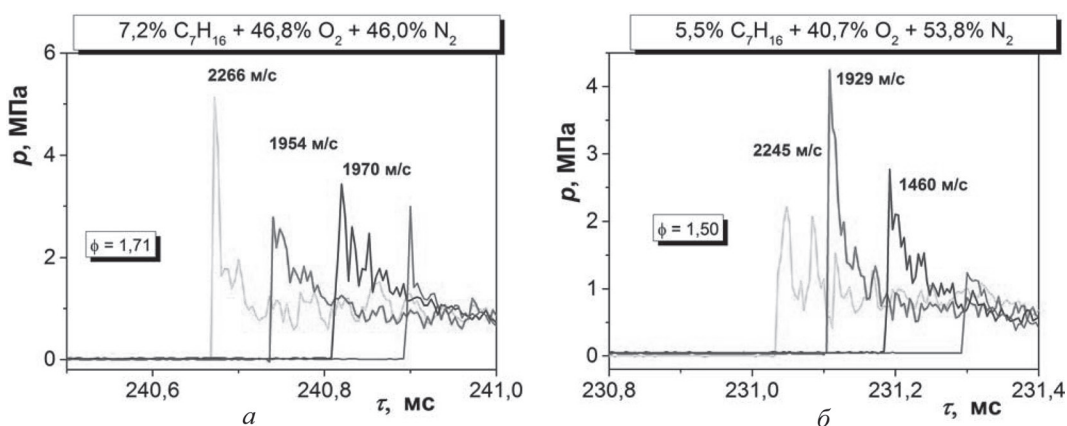


Рис. 4. Динамика распространения волны в импульсной камере сгорания с ПНМС и ТА: а – смесь № 3; б – смесь № 4; условия эксперимента и нумерация смесей соответствуют таблице

**Влияние степени наполнения трубы.** Существенное влияние на процессы в импульсной камере сгорания оказывает степень наполнения ее горючей смесью. Влияние  $\lambda$  проявляется и при термической активации смеси в камере с пористой набивкой. Сравнение смесей № 3 и № 4 показало, что при одинаковом нагреве (до  $T_0 = 65$  °С) в камере с ПНМС детонация возникала в обеих смесях на первой измерительной базе практически с одинаковой скоростью (рис. 4, а, б). Далее волна на второй и третьей измерительных базах ослабевала, причем в смеси № 3 ( $\lambda = 0,85$ ) ее скорость замедлялась до  $\psi_{cp} \approx 0,86$ , а в смеси № 4 ( $\lambda = 0,62$ ) интенсивность волны снижалась до  $\psi_2 = 0,84$  и  $\psi_3 = 0,64$ , что обусловлено меньшим наполнением трубы.

**Заключение.** Полученные результаты показывают возможность осуществления контролируемой детонации в частотном режиме и получения удовлетворительных для практики параметров. Впервые в малогабаритной полужакрытой камере (диаметром 20 мм и длиной менее 1 м) реализован пульсирующий режим гетерогенной детонации смеси гептана с кислородом и воздухом с частотой до 20 Гц. Для геометрии и схемы организации рабочего процесса данной камеры отмечено положительное влияние незначительной термической активации (до 65 °С) горючей смеси перед ее зажиганием и пористого препятствия в виде набивки на переход горения в детонацию. Его степень зависит от компонентного состава, соотношения реагентов в смеси и степени наполнения трубы смесью.

С возрастанием температуры смеси перед зажиганием интенсифицируется процесс горения и увеличивается способность к детонации, которая формируется на расстоянии 15–22 калибра трубы, в то время как в трубе без термической активации смеси детонации не наблюдается. Наличие пористого препятствия в области смещения компонентов и воспламенения смеси также способствует инициированию детонации, которая в отсутствие термической активации смеси возникает примерно на тех же расстояниях, что и при ее термической активации. Наибольший эффект достигается при совместном применении пористой набивки из металлической стружки и термической активации смеси.

Результаты экспериментов будут способствовать продолжению работ по созданию пульсирующего детонационного двигателя реактивного типа.

## Литература

1. Brophy C. M., Sinibaldi J. O., Wang F. et al. // AIAA, 2004. Pap. № 2004-0834.
2. Bozhenkov S. A., Starikovskaia S. M., Starikovskii A. Yu. // Advances in Confined Detonations / Eds. Roy G. D., Frolov S. M., Santoro R. J., Tsyganov S. A. M.: Torus Press, 2002. P. 259.
3. Higgins A. J., Pinard P., Yoshinaka A. C., Lee J. H. S. // High-Speed Deflagration and Detonation / Eds. Roy G. D., Frolov S. M., Netzer D., Borisov A. A. M.: Torus Press, 2001. P. 45.
4. Rocourt X., Gillard P., Socket I. et al. // Shockwaves. 2007. Vol. 16, N 3. P. 233.
5. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. // Progress in Energy and Combustion Sciences. 2004. Vol. 30, issue 6. P. 545–672.
6. Ma F., Choi J-Y, Wu Y., Yang V. In: Advances in Confined Detonations. Edited by G. Roy, S. Frolov, R. Santoro, S. Tsyganov. Moscow: Torus Press, 2002. P. 231–234.
7. Eidelman S. and Yang X. L. // AIAA. 1998. P. 137–146.
8. Бакланов Д. И., Гвоздева Л. Г. // ТВТ. 1996. Т. 34, № 2. С. 299–302.
9. Ремеев Н. Х., Власенко В. В., Хакимов З. А., Иванов В. В. // Химическая физика. 2003. Т. 22, № 8. С. 45–56.
10. Гвоздева Л. Г., Бакланова Д. И., Рыжкина И. Н., Тарусова Н. В. // Химическая физика. 2009. Т. 28, № 5. С. 40–44.
11. Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С. М. Фролова. М., 2006.
12. Альхусан Х., Ассад М. С., Пенязьков О. Г., Севрук К. Л. // ИФЖ. 2012. Т. 85, № 5. С. 968–973.
13. Assad M. S., Penyazkov O. G., Sevrouk K. L., Yaumenchysau M. L. // Proc. of 24<sup>th</sup> Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems. 2013, July 28–August 02. Taipei, Taiwan, 2013. P. 131.
14. Assad M. S., Penyazkov O. G. // Proc. of 2013 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics (2013 IASPEP). September 24–27. Chengdu, Sichuan Province, China, 2013. P. 284–286.

M. S. ASSAD, O. G. PENYAZKOV

## ACCELERATION MEANS OF A DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION IN A REACTIVE COMBUSTOR

### Summary

In a small-size tube (diameter 20 mm and length less 1 m) the cyclic detonative regime is implemented with combustion of heptane / air / oxygen mixtures. Conditions of the deflagration-to-detonation transition were established with regard to the influence of thermal activation and porous obstacle. Analysis showed that a slight increase in mixture temperature prior to its ignition causes under certain conditions the detonation initiation at various distances from initiator. The presence of a porous packing in the mixing zone is a factor that substantially accelerates a deflagration-to-detonation transition.