

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ  
В КЕРОСИНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

© 2007 г. С. М. Фролов, В. С. Аксенов

Представлено академиком Ал.Ал. Берлиным 12.04.2007 г.

Поступило 13.04.2007 г.

Впервые продемонстрирована возможность перехода горения в детонацию (ПГД) в трубе в непрерывном потоке воздушной смеси частично предиспаренного авиационного керосина ТС-1 при атмосферном давлении. Полученные результаты открывают возможности практической работы по созданию новых систем воздушно-реактивного движения с детонационным сжиганием топлива.

Низкая детонационная способность смесей авиационного керосина с воздухом – основное препятствие на пути создания воздушно-реактивного импульсного детонационного двигателя (ИДД) [1]. В настоящее время ведутся исследования, направленные на значительное снижение энергии инициирования детонации углеводородных топлив, а также на сокращение преддетонационного расстояния и времени [2]. С одной стороны, для этой цели предлагают использовать активные химические добавки к горючему, смесевые горючие, топливные эмульсии, барботаж горючего активным газом, предварительную термическую или радиационную обработку горючего, предварительное испарение горючего, а также предварительное смешение горючего с кислородом или воздухом. Несмотря на то, что некоторые из указанных решений считаются перспективными, их применение в ИДД для летательных аппаратов ограничено жесткими эксплуатационными требованиями по безопасности, весу и др. С другой стороны, ведутся исследования по физическим методам сокращения расстояния и времени ПГД в топливно-воздушных смесях. Для этой цели предлагают использовать форкамерное [3] или плазменное [4] зажигание, “бегущие” источники зажигания [5], регулярные препятствия [6, 7], трубы околопредельного диаметра [7], специально профилированные регулярные отражатели ударных волн [8], U-образные повороты труб [9] или витки труб

[10, 7], а также разные комбинации указанных средств [10, 11, 7].

В данном сообщении приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на получение детонации воздушной смеси авиационного керосина ТС-1 в трубах на кратчайших расстояниях при минимальных энергиях зажигания. Для этой цели использовали комбинацию методов и средств, включая повышение детонационной способности топлива, ускорение пламени с помощью регулярных препятствий и многократные отражения образованной ударной волны в специальном фокусирующем устройстве – змеевике.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки, состоящей из пневматической топливной форсунки непрерывного действия 1, обогреваемой детонационной трубы 2, источника зажигания 3, датчиков давления 4, огнепреградителя 5, воздушного баллона 6, топливного клапана 7, воздушного компрессора 8, топливного бака 9, топливного фильтра 10, цифрового управляющего устройства 11, блока питания 12, персонального компьютера 13 с 16-канальным аналого-цифровым преобразователем, реле 14, предиспарителя горючего 15, термостата 16, электрических нагревателей 17 и 18 и терморпар 19. Системы питания горючего и воздуха обеспечивали постоянное соотношение между массовыми расходами компонентов смеси – жидкого керосина ТС-1 и воздуха – в форсунке благодаря одинаковому давлению их подачи (от 6 до 4.8 атм). Смешение горючего с воздухом начиналось в форсунке и заканчивалось в детонационной трубе внутренним диаметром 52 мм и длиной 3 м. Пневматическая форсунка обеспечивала очень тонкое распыление керосина на капли диаметром от 5 до 10 мкм. Распределение капель по размерам измеряли методом сажевых отпечатков [12]. Воздух подавали из баллона 6, соединенного с воздушным компрессором 8. Двухфазную керосино-воздушную смесь подавали непрерывно в предиспаритель 15. Предиспаритель использовали для повышения детонационной способности капельной топливно-воздушной смеси, следуя выводам [13]. Прохо-

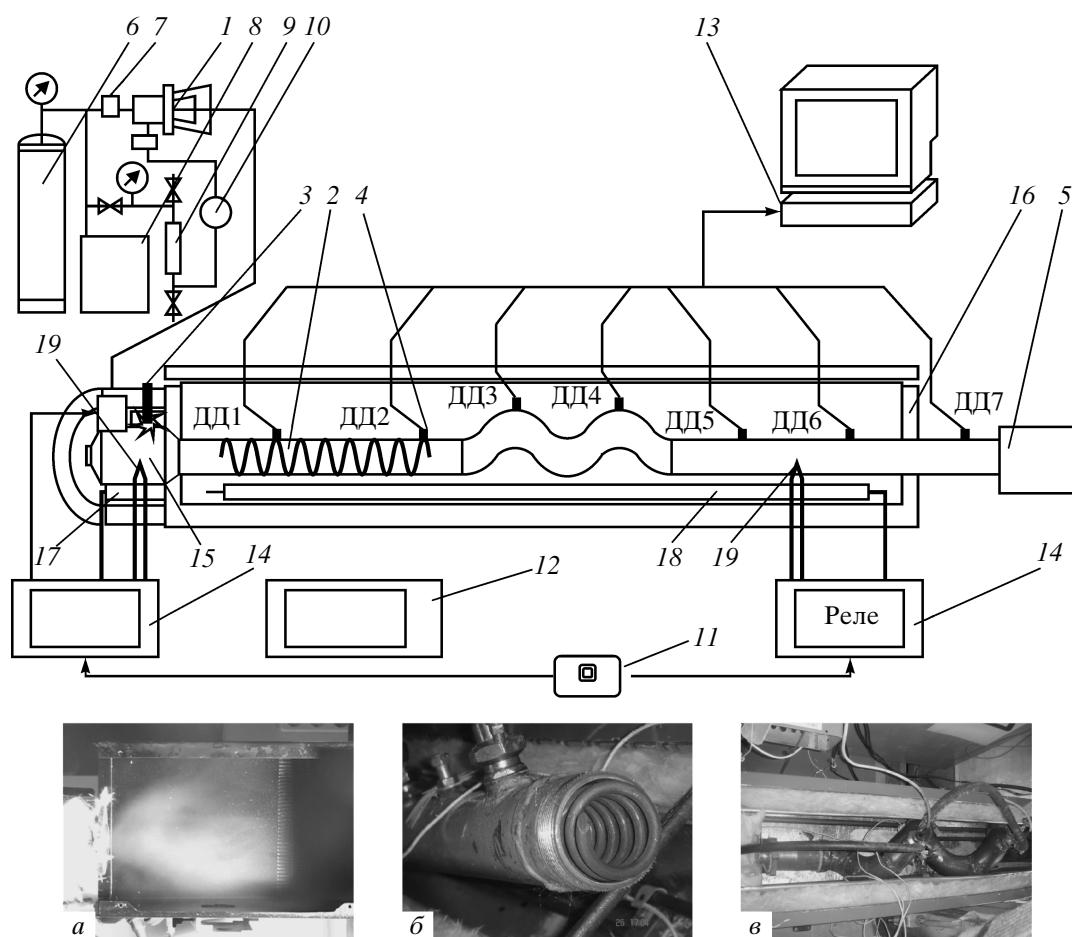


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с предиспарителем керосина (а), спиралью Щелкина (б) и змеевиком (в).

для через предиспаритель, керосин частично испарялся на горячих стенках. Таким образом, в предиспарителе образовывалась гетерогенная смесь воздуха, паров керосина, капель керосина от пневматической форсунки и тумана – конденсата испаренного керосина (см. рис. 1,а), которая поступала через выходное сопло в прямой участок детонационной трубы со спиралью Щелкина (рис. 1,б), а затем либо в прямой участок гладкой трубы, либо в трубу-змеевик с гладкой внутренней поверхностью (рис. 1,в). К концу детонационной трубы присоединяли огнепреградитель, сообщаемый с атмосферой, – участок трубы диаметром 80 мм, плотно упакованный гофрированной металлической лентой. Для диагностики взрывных процессов в детонационной трубе устанавливали охлаждаемые водой высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления ДД1– ДД7 типа ЛХ и ионизационные зонды.

Система обогрева трубы включала два термостата: термостат предиспарителя 15 и термостат детонационной трубы 16. В термостате предиспарителя устанавливали электронагреватель 17 мощностью 0.6 кВт, а в термостате детонацион-

ной трубы размещали трехсекционный электронагреватель 18 мощностью 2.5 кВт и термопары 19. Режимом термостатирования управляли с помощью реле 14. Типичная продолжительность одного опыта в предварительно нагретой трубе около 1 с.

Температура стенки предиспарителя в опытах составляла  $190 \pm 10^\circ\text{C}$ . Температура прямого участка трубы со спиралью Щелкина составляла  $120\text{--}130^\circ\text{C}$ , а температура примыкающего к нему участка трубы до датчика давления ДД6  $110\text{--}120^\circ\text{C}$ . Участок трубы между датчиком ДД6 и огнепреградителем не термостатировался и имел температуру  $20\text{--}30^\circ\text{C}$ .

Провели две серии опытов. В первой серии к участку со спиралью Щелкина присоединяли прямую гладкую детонационную трубу, а во второй – трубу-змеевик, показанную на рис. 1,в. В табл. 1 приведены положения датчиков давления в двух сериях опытов. Расстояние до датчиков отсчитывали от источника зажигания.

Спираль Щелкина использовали для ускорения пламени и получения ударной волны, распро-

**Таблица 1.** Местоположения датчиков давления в двух сериях опытов

Серия	ДД1	ДД2	ДД3	ДД4	ДД5	ДД6	ДД7
1. Прямая труба	622 мм, участок со спиралью Щелкина	872 мм, участок со спиралью Щелкина	1118 мм, прямая труба	1416 мм, прямая труба	1670 мм, прямая труба	1970 мм, прямая труба	2270 мм, прямая труба
2. Труба со змеевиком	622 мм, участок со спиралью Щелкина	872 мм, участок со спиралью Щелкина	1292 мм, змеевик	1662 мм, змеевик	1992 мм, прямая труба	2292 мм, прямая труба	2592 мм, прямая труба

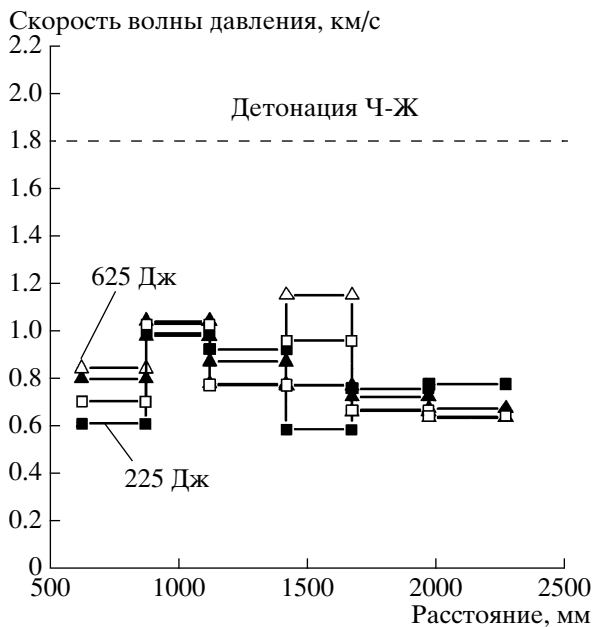
страняющейся со скоростью выше 800–900 м/с [7, 10, 11]. Спираль свили из стальной проволоки диаметром 7 мм с шагом 22 мм. Длина спирали в обеих сериях была равна 800 мм. Спираль размещали на расстоянии 70 мм от выходного сопла предиспарителя. Топливо-воздушную смесь зажигали в предиспарителе либо модернизированной автомобильной свечой с медным центральным электродом, либо трехэлектродным электрическим разрядником [14].

В первой серии опытов энергию зажигания изменяли в пределах от 5 до 700 Дж. Энергию зажигания рассчитывали по емкости разрядного конденсатора и напряжению. На рис. 2 приведены результаты измерений скорости волны давления вдоль детонационной трубы в четырех типичных опытах первой серии. Символы на кривых использованы для идентификации данных каждого опыта. Видно, что в прямой трубе даже при высокой энергии зажигания ПГД не происходил: ско-

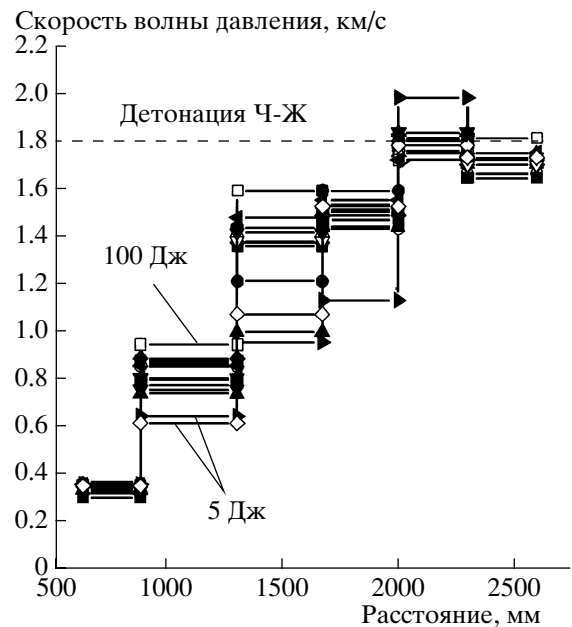
рость волны давления на выходе из участка со спиралью Щелкина не превышала 1200 м/с.

Во второй серии опытов за участком со спиралью Щелкина размещали трубу-змеевик. Идея использования комбинации спирали Щелкина со змеевиком основана на результатах экспериментов [10, 11], где впервые продемонстрировано эффективное действие витков труб на ПГД в потоке двухфазных смесей н-гексана и н-гептана с воздухом. Змеевик представлял собой два полных оборота трубы внешним диаметром 60 мм (внутренний диаметр 52 мм) с шагом 255 мм, навитой вокруг прямого стержня диаметром 28 мм. Энергию зажигания во второй серии опытов изменяли в пределах от 5 до 180 Дж.

В отличие от первой серии во второй серии опытов устойчиво регистрировали ПГД в потоке смеси керосина ТС-1 с воздухом. На рис. 3 приведены результаты измерений скорости волны давления вдоль детонационной трубы в 12 опытах



**Рис. 2.** Изменение скорости волны давления в потоке керосино-воздушной смеси в четырех опытах в прямой детонационной трубе при энергии зажигания от 225 до 625 Дж.



**Рис. 3.** Изменение скорости волны давления в потоке керосино-воздушной смеси в 12 опытах в детонационной трубе со спиралью Щелкина и змеевиком при энергии зажигания от 5 до 100 Дж.

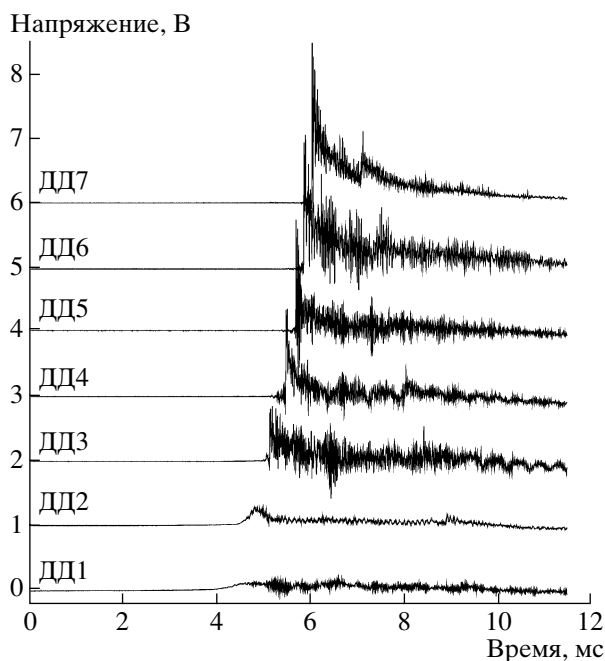


Рис. 4. Записи давления датчиками ДД1–ДД7 при ПГД в опыте с энергией зажигания 5 Дж.

второй серии с энергией зажигания от 5 до 100 Дж. Как и на рис. 2, символы на кривых использованы лишь для идентификации данных каждого опыта. Видно, что в трубе со змеевиком ПГД происходил даже при энергии зажигания в 5 Дж: скорость волны давления на выходе из змеевика (на расстоянии около 2 м от источника зажигания) составила 1600–1800 м/с, т.е. была на уровне скорости детонации Чепмена–Жуге (Ч–Ж) для углеводородно-воздушных смесей. Образованная в змеевике детонационная волна распространялась с постоянной скоростью на двух последних измерительных базах между датчиками ДД5 и ДД6, а также ДД6 и ДД7. Импульсы тока, зарегистрированные ионизационными зондами в сечениях, где расположены датчики ДД5, ДД6 и ДД7, совпадали с моментами прихода ударной волны в соответствующие сечения, что подтверждало существование детонации.

На рис. 4 в качестве примера приведены записи давления датчиками ДД1–ДД7 в опыте с энергией зажигания 5 Дж. В этом опыте детонация возникла на участке трубы между датчиками ДД5 и ДД6 приблизительно через 6 мс после зажигания. Очевидно, что ПГД во второй серии опытов полностью обусловлен использованием змееви-

ка, в котором происходили многократные отражения ударных волн и волн давления, генерируемых ускоряющимся пламенем [10, 11, 7].

Таким образом, нами впервые продемонстрирована возможность ПГД в непрерывном потоке воздушной смеси частично предиспаренного авиационного керосина ТС-1 при атмосферном давлении и температуре стенок трубы 110–130°C. Показано, что в термостатированной трубе диаметром 52 мм, состоящей из предиспарителя керосина, прямого участка со спиралью Щелкина и гладкого участка-змеевика, ПГД происходил на длине около 2 м за время 5–6 мс при низкой энергии зажигания на уровне 5 Дж. Полученные результаты открывают возможности практической работы по созданию новых систем реактивного движения на детонационном сжигании топлива – ИДД.

Работа выполнена при поддержке Международным научно-техническим центром (проект № 2740).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.М. Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус Пресс, 2006.
2. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. // Progress Energy and Combust. Sci. 2004. V. 30. P. 545–672.
3. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // ДАН. 2006. Т. 410. № 1. С. 70–74.
4. Wang F., Jiang C., Kuthi A. // AIAA Pap. 2004. № 2004–834.
5. Frolov S. M. // J. Loss Prevention. 2005. V. 19. № 2–3. P. 238–244.
6. Щелкин К.И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М.: Воениздат, 1949.
7. Frolov S. M. // J. Propulsion and Power. 2006. № 6. P. 1162–1169.
8. Semenov I.V., Frolov S.M., Markov V.V., Utkin P.S. // Pulsed and Continuous Detonations. Moscow: Torus Press, 2006. P. 159–169.
9. Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O. // Proc. Combust. Inst. 2007. V. 31. P. 2421–2428.
10. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 285–292.
11. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // ДАН. 2005. Т. 401. № 2. С. 201–204.
12. Elkoth M. M. // Progress Energy and Combust. Sci. 1982. V. 8. № 1. P. 61–91.
13. Басевич В.Я., Фролов С.М., Посвянский В.С. // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 7. С. 58–68.
14. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S. // J. Shock Waves. 1999. V. 14. № 3. P. 175–186.