

**СОКРАЩЕНИЕ ПРЕДЕТОНАЦИОННОГО УЧАСТКА  
В КАПЕЛЬНОЙ ВЗРЫВЧАТОЙ СМЕСИ  
КОМБИНИРОВАННЫМИ СРЕДСТВАМИ**

© 2005 г. С. М. Фролов, В. С. Аксенов, В. Я. Басевич

Представлено академиком Ал.Ал. Берлиным

Поступило 11.11.2004 г.

В работе впервые экспериментально зарегистрирован переход горения в детонацию (ПГД) в капельных смесях углеводородного топлива с воздухом. Показано, что использование спирали Щелкина и нового элемента – витка трубы – позволяет значительно уменьшить энергию инициирования детонации и длину преддетонационного участка.

Известно несколько способов сокращения преддетонационного участка (ПУ) в газовых взрывчатых смесях. Лаффит [1, 2] экспериментально продемонстрировал, что с уменьшением диаметра трубы и повышением начального давления взрывчатой смеси длина ПУ сокращается. К.И. Щелкин [3] обнаружил ведущую роль аэродинамических условий в канале на переход медленного горения в детонацию. Он показал, что размещение в канале препятствий в виде проволочной спирали (“спираль Щелкина”) приводит к значительному сокращению расстояния до возникновения детонации. К.И. Щелкин и А.С. Соколик [4] обнаружили эффект сокращения ПУ после предварительной тепловой подготовки топлива. В [5] показано, что зажигание смеси наносекундным коронным разрядом в комбинации со спиралью Щелкина позволяет сократить ПУ по сравнению с аналогичными опытами с зажиганием смеси дуговым разрядом. В [6] экспериментально доказана возможность значительного сокращения ПУ путем ускорения слабой ударной волны бегущим импульсом принудительного зажигания – идеи, впервые выдвинутой Зельдовичем и А.С. Компанейцем [7].

В отличие от газовых смесей ПГД в капельных смесях жидкого топлива с воздухом (кислородом) практически не изучен. В известных экспериментальных исследованиях [8–10] гетерогенную (“капельную”) детонацию инициировали сильными источниками – ударной волной [8], газовой детонацией [9] или зарядом ВВ [10]. В [11, 12] детонацию распылов жидкого топлива в воздухе иници-

ировали либо одним, либо двумя электрическими разрядами. В капельных смесях жидкого топлива с газообразным кислородом ПГД наблюдали в [13], где сообщается о длине ПУ от 20 до 100 калибров трубы. Сведения об экспериментальных наблюдениях ПГД в капельных смесях углеводородных топлив с воздухом в литературе авторам не известны. В связи с возрастанием интереса к практическому использованию детонационного сгорания в двигателях летательных аппаратов и в энергетике [14], становятся актуальными исследования ПГД в капельных смесях жидкого топлива с воздухом.

В данной работе использованы комбинированные средства для достижения ПГД и сокращения ПУ в капельных углеводородо-воздушных смесях.

В [11, 12] исследовали инициирование детонации в потоке *n*-гексано-воздушной капельной смеси (коэффициент избытка горючего  $1.3 \pm 0.1$ ) при нормальных условиях в трубе диаметром 51 мм и длиной 1.5 м, оснащенной пневматической полнорасходной форсункой на одном конце трубы и огнепреградителем на другом. Зажигание производили высоковольтным электрическим разрядником, расположенным на расстоянии 60 мм от сопла форсунки, где средний размер капель в струе составлял 5–6 мкм. Начиная с энергии разряда  $E$ , приблизительно равной 3300 Дж, в смеси происходило прямое инициирование детонации, которая распространялась со скоростью 1700–1800 м/с. При энергии зажигания  $1100 < E < 3300$  Дж в опытах [11, 12] наблюдали затухающую ударную волну и замедляющееся пламя. При  $E < 1100$  Дж регистрировали некоторое ускорение пламени вдоль трубы, но волны давления распространялись со скоростями, не превышающими 400–450 м/с.

Чтобы снизить энергию инициирования детонации, провели аналогичные опыты с капельными *n*-гексано-воздушными и *n*-гептано-воздушными смесями в трубах меньшего, чем в [11, 12], диаметра: 36 и 28 мм. Кроме того, для увеличения интенсивности турбулентности в струе капельной смеси, поступающей из форсунки, в трубе устано-

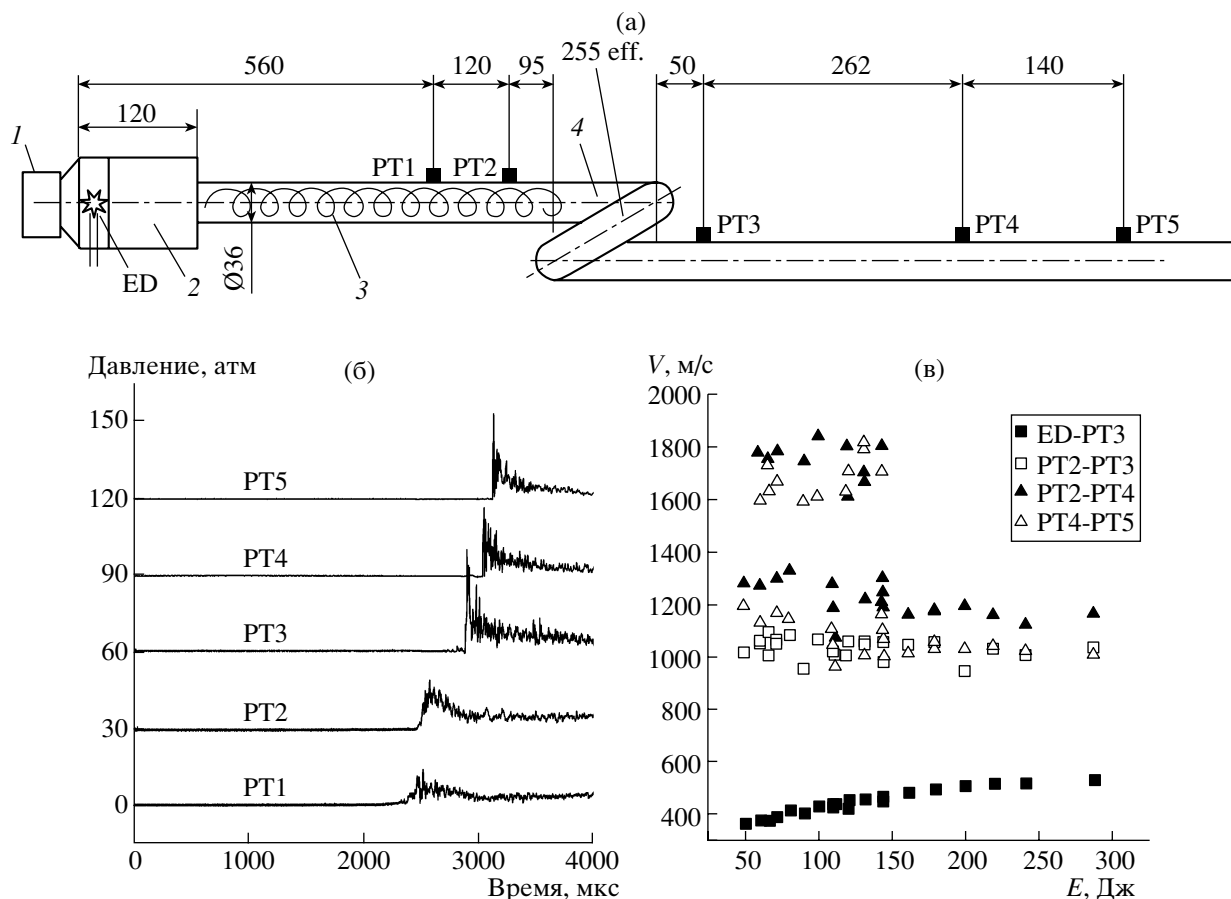


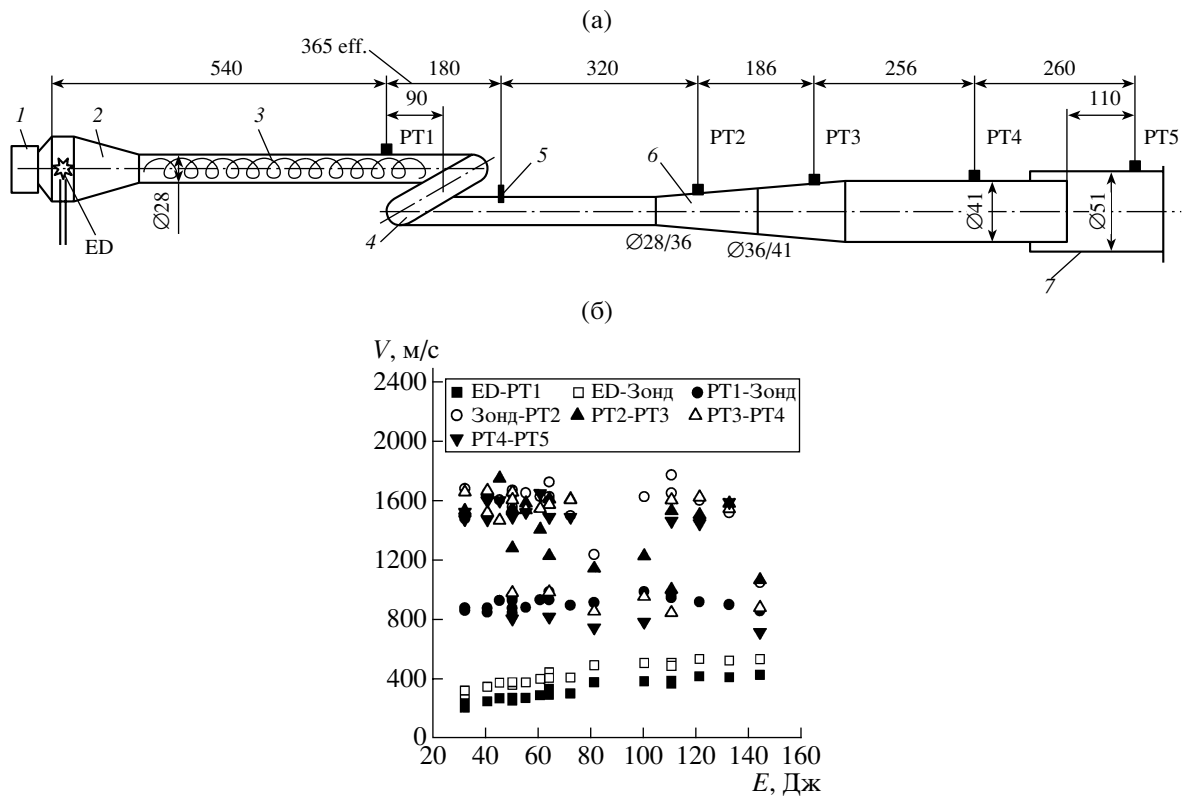
Рис. 1. а – схема взрывной трубы диаметром 36 мм с новым элементом – витком; б – давление, зарегистрированное датчиками PT1, PT2–PT5 в опыте с энергией зажигания 60 Дж; в – результаты измерений скорости ударной волны в капельной *n*-гексано-воздушной смеси на разных измерительных базах в зависимости от энергии зажигания.

вили спираль Щелкина длиной 600 мм, свитой из стальной проволоки диаметром 4 мм с шагом витков 18 мм. При низкой энергии зажигания от 130 до 240 Дж скорость ударной волны после выхода из спирали достигала 900–1000 м/с. Изменение диаметра проволоки спирали, а также шага и длины спирали не привело к каким-либо значительным изменениям характеристик получаемых ударных волн при таких энергиях зажигания.

Для дальнейшего усиления полученной ударной волны за секцией со спиралью Щелкина установили новый элемент – виток трубы. На рис. 1а показана схема взрывной трубы диаметром 36 мм с форсункой 1, разрядной камерой 2, электрическим разрядником ED, спиралью Щелкина 3 и витком трубы 4. Пьезоэлектрические датчики давления PT1–PT5 использовали для регистрации профилей волн давления в трубе и для определения скорости распространения этих волн. Ожидалось, что наличие криволинейных отражающих поверхностей в витке 4 может привести к газодинамической “фокусировке” ударной волны и возникновению детонации. Отметим, что фокусирующее дей-

ствие витков взрывных труб в реагирующих средах до сих пор не исследовано, хотя явление фокусировки ударных волн в прямых трубах при отражении от неплоской торцевой стенки известно давно [15].

На рис. 1б приведены записи давления, зарегистрированные датчиками PT1–PT5 в опыте с энергией зажигания  $E = 60$  Дж. В отличие от опытов в прямой трубе здесь на выходе из витка (датчик PT3) зарегистрирована детонационная волна. Детонация возникает внутри витка на расстоянии около 1 м от разрядника (около 28 калибров трубы). Детонационная волна распространяется до конца трубы со скоростью  $1750 \pm 20$  м/с. На рис. 1в приведены результаты измерений скорости волн давления  $V$  в этой серии опытов на четырех измерительных базах: между разрядником и датчиком PT3 (ED–PT3), между датчиками PT2 и PT3 (PT2–PT3), между датчиками PT3 и PT4 (PT3–PT4) и между датчиками PT4 и PT5 (PT4–PT5). Видно, что при энергии зажигания от 60 до 144 Дж в ряде опытов на выходе из витка зарегистрирована детонация. Возникновение детонации носило слу-



**Рис. 2.** а – схема взрывной трубы диаметром 28 мм с витком и переходным участком к трубе диаметром 51 мм; б – результаты измерений скорости ударной волны в капельной *n*-гексано-воздушной смеси на разных измерительных базах в зависимости от энергии зажигания.

чайный характер с повторяемостью около 50%. Интересно, что при более высоких энергиях зажигания (144–300 Дж) детонация никогда не возникала. По-видимому, это связано с тем, что при высоких энергиях зажигания кумулирующая волна давления (по терминологии Щелкина) образуется за пределами витка.

Для дальнейшего снижения энергии зажигания, достаточной для возбуждения детонационного взрыва внутри витка, перешли к трубе меньшего диаметра – 28 мм. На рис. 2а показана схема экспериментальной установки, в которой достигнута минимальная энергия инициирования детонации капельных *n*-гексано-воздушных смесей – 30 Дж. Установка состоит из форсунки 1, разрядной камеры 2, электрического разрядника ED, спирали Щелкина 3, витка трубы 4, ионизационного зонда 5, двух конусных переходников 6 и основной трубы 7 диаметром 51 мм. Полученные на этой установке записи давления свидетельствуют о возникновении детонации внутри витка, а также о переходе детонации в трубу диаметром 41 мм, а затем и в основную трубу. При энергиях зажигания от 30 до 50 Дж детонация в витке возникала с высокой повторяемостью и всегда переходила в основную трубу (рис. 2б). При энергиях зажигания от 50 до 130 Дж детонация не всегда перехо-

дила в основную трубу. При энергиях зажигания от 130 до 300 Дж детонацию не наблюдали. Аналогичные результаты получены для капельных *n*-гептано-воздушных смесей.

Конструктивные изменения в схеме рис. 2а (изменение формы разрядной камеры 2, длины спирали 3, формы витка 4, длины участка трубы от конца спирали до витка и даже длины участка трубы до конусного переходника) приводили к изменению наблюдаемой динамики взрыва. Высокая повторяемость опытов с возбуждением детонации в витке стала возможной благодаря тщательной доводке конструкции установки.

Таким образом, замена прямой взрывной трубы диаметром 51 мм [11, 12] на комбинированную трубу, изображенную на рис. 2а, позволила снизить энергию инициирования детонации капельных *n*-гексано-воздушных и *n*-гептано-воздушных смесей на два порядка: с 3300 до 30 Дж. В опытах с витком электрический разряд служил источником зажигания смеси, а не источником сильной иницирующей ударной волны. Следовательно, нами впервые зарегистрирован ПГД в капельных смесях углеводородного топлива с воздухом. Длина ПУ в трубе диаметром 28 мм оказалась близкой к 1 м, т.е. к 36 калибрам трубы, а полная длина ПУ до перехода в основную трубу диаметром

51 мм – 1.8 м. Для сравнения отметим, что ПГД в газовой пропано-воздушной смеси требует не менее 260 калибров в случае прямой гладкой трубы и более 60 калибров в случае прямой трубы с турбулизаторами в виде регулярных препятствий [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Laffitte P.* // Ann. Phys. 1925. V. 4. P. 587–695.
2. *Laffitte P., Dumanois P.* // C.R. Acad. sci. 1926. V. 184. P. 284–286.
3. *Щелкин К.И.* // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. С. 823–827.
4. *Щелкин К.И., Соколик А.С.* // ЖФХ. 1937. Т. 10. С. 479–483.
5. *Brophy S.M., Sinibaldi J.O., Wang F. et al.* // AIAA Pap. 2004. № 2004–0834.
6. *Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А.* // ДАН. 2004. Т. 394. № 2. С. 222–224.
7. *Зельдович Я.Б., Компанеец А.С.* Теория детонации. М.: Гостехтеориздат, 1955. 268 с.
8. *Dabora E.K.* In: Dynamics of Detonations and Explosions. N.Y.: AIAA, 1991. V. 133. P. 311–324.
9. *Dabora E.K., Ragland K.W., Nicholls J.A.* // Astron. acta. 1966. V. 12. № 1. P. 9–16.
10. *Benedick W.B., Tieszen S.R., Knystautas R., Lee J.H.S.* In: Dynamics of Detonations and Explosions. N.Y.: AIAA, 1991. V. 133. P. 297–310.
11. *Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А.* // ДАН. 2004. Т. 394. № 4. С. 503–505.
12. *Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksenov V.S., Polikhov S.A.* // J. Propulsion and Power. 2005. V. 21. № 1.
13. *Pierce T.N., Nicholls J.A.* // Astronaut. acta. 1972. V. 17. № 4–5. P. 703–707.
14. *Фролов С. М.* // Тяж. машиностроение. 2003. № 9. С. 19–22.
15. *Sturtervant B., Kulkarny V. A.* // J. Fluid Mech. 1976. V. 73. P. 651–671.