

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В РАСПЫЛАХ
ЖИДКОГО ТОПЛИВА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РАЗРЯДАМИ© 2004 г. С. М. Фролов, В. Я. Басевич, В. С. Аксенов, С. А. Полихов С. М. Фролов,
В. Я. Басевич, В. С. Аксенов, С. А. Полихов

Представлено академиком Берлиным Ал.Ал. 10.10.2003 г.

Поступило 10.10.2003 г.

В перспективных воздушно-реактивных двигателях летательных аппаратов для создания тяги предлагают сжигать углеводородное топливо в периодически генерируемой бегущей детонационной волне (ДВ) [1]. В таких двигателях целесообразно использовать штатное жидкое топливо типа авиационного керосина без активных добавок, с непосредственной подачей в камеру сгорания и без предварительного смешения с воздухом. В связи с низкой детонационной способностью топливных распылов и большими энергетическими затратами на инициирование детонации [2] возникает ряд фундаментальных проблем. Возможность решения этих проблем связывают в основном с применением “предетонатора” [3] – промежуточного устройства, в котором ДВ относительно легко инициируется в топливно-кислородной смеси. Полученную ДВ затем перепускают в камеру сгорания с топливно-воздушной смесью. В данной работе предложен и исследован новый способ инициирования детонации в распылах жидкого топлива, открывающий путь к созданию “предетонатора” на топливно-воздушной смеси без использования кислорода. Способ основан на идее Я.Б. Зельдовича и А.С. Компанейца [4] о возможности инициирования газовой детонации с помощью принудительного зажигания распределенными внешними источниками, установленными вдоль канала с горючим газом. Для газовых пропано-воздушных смесей экспериментальное доказательство идеи [4] получено в [5].

Провели три серии экспериментов, цель которых – получить детонацию в распыле жидкого н-гексана в воздухе с помощью двух последовательно срабатывающих электрических разрядников. Использовали стальные трубы диаметром 51 и 28 мм. На одном конце трубы устанавливали пнев-

матическую форсунку, обеспечивающую весь расход воздуха (20–30 л/с) и тонкое распыление топлива со средним размером капель 5–6 мкм. Другой конец трубы соединяли с атмосферой огнестойким материалом в виде камеры, заполненной металлической лентой. Опыты проводили при импульсной подаче воздуха и топлива. Длительность импульса – 1 с. Труба состояла из инициирующей секции с двумя электрическими разрядниками и измерительной секции. Первый разрядник помещали на расстоянии 60 мм от сопла форсунки, а второй – на расстоянии L от первого разрядника, кратном 100 мм. Электропитание разрядников включало высоковольтные конденсаторы емкостью C_1 и C_2 . Энергию разрядов E_1 и E_2 варьировали, изменяя напряжение на конденсаторах U , которое было одинаковым для обоих разрядников. Энергию рассчитывали по емкости конденсаторов и напряжению. Сигнал запуска разряда поступал на разрядник от цифрового управляющего блока. Управляющий блок позволял заранее устанавливать время задержки запуска второго разряда по отношению к первому. Продолжительность разрядного тока τ варьировали от 50 до 100 мкс, используя разрядники разной конструкции. Для измерения динамики волновых процессов использовали пьезоэлектрические датчики давления. В измерительной секции устанавливали три датчика. Расстояние до датчиков отсчитывали от первого разрядника. Система диагностики включала аналого-цифровой преобразователь и компьютер. В экспериментах подбирали время задержки запуска второго разряда Δt_d , добиваясь инициирования детонации при наименьшей суммарной энергии разрядов $E = E_1 + E_2$.

В первой серии экспериментов использовали трубу диаметром 51 мм и разрядники с $\tau = 100$ мкс. Емкость конденсатора каждого разрядника $C_1 = C_2 = 300$ мкФ. В опытах изменяли напряжение U , время задержки Δt_d и расстояние L . Рис. 1 построен для $L = 200$ мм. Знаки “плюс” на рис. 1 отно-

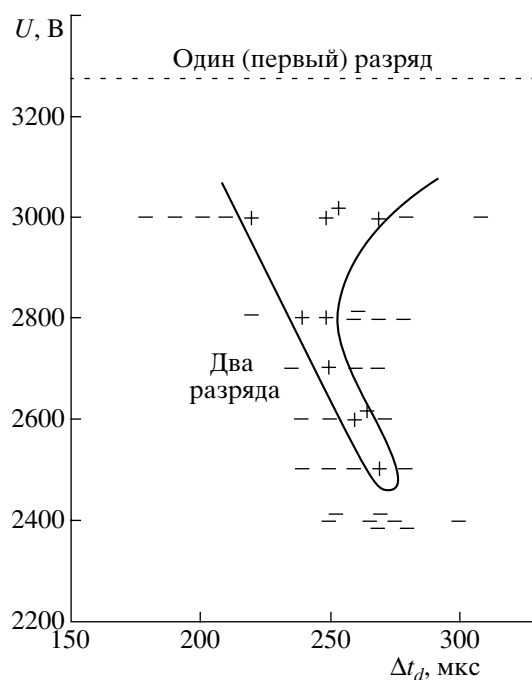


Рис. 1. “Полуостров” детонации для распыла жидкого н-гексана в воздухе в трубе диаметром 51 мм при инициировании двумя последовательными электрическими разрядами.

сятся к условиям (по U и Δt_d), при которых на измерительных базах 0.7–1.1 и 1.1–1.3 м регистрировали ДВ, распространяющуюся со средней скоростью 1780 ± 100 м/с. Измеренная скорость ДВ близка к термодинамическому значению скорости детонации в гомогенной стехиометрической смеси н-гексана с воздухом (1840 м/с). Знаки “минус” соответствуют условиям, при которых детонация не возникала. Для возбуждения детонации одним разрядником с конденсатором удвоенной емкости ($C_1 = 600$ мкФ или $C_2 = 600$ мкФ) требовалось напряжение 3300 В (для первого разрядника) и 4100 В (для второго разрядника, расположенного на расстоянии 260 мм от сопла форсунки). Указанные значения напряжения соответствуют энергии разрядов $E = E_1 = 3.3$ кДж и $E = E_2 = 5.1$ кДж. Из рис. 1 видно, что инициирование детонации двумя разрядниками более эффективно с учетом энергетических затрат: минимальное требуемое напряжение U_{\min} снижается на 25% (от 3300 до 2500 В) и 39% (от 4100 до 2500 В), а энергия инициирования снижается на 43% (от 3.3 до 1.9 кДж) и 62% (от 5.1 до 1.9 кДж) по сравнению с инициированием одиночными разрядами. Ширина “полуострова” детонации на рис. 1 очень мала и составляет 50 мкс при $U = 3000$ В и 10 мкс вблизи предела инициирования ($U = 2500$ В).

Минимальное напряжение U_{\min} и оптимальное время задержки Δt_{d0} , при котором $U = U_{\min}$, зави-

сят от расстояния L между разрядниками. Так, при $L = 100, 200$ и 300 мм получили: $U_{\min} = 3000$ В и $\Delta t_{d0} = 100$ мкс; 2500 В и 270 мкс; 3000 В и 370 мкс соответственно. При $L = 400$ мм и $U = 3000$ В, детонация не возникала при любых Δt_d . Видно, что для достижения наименьшей энергии инициирования детонации существует оптимальное расстояние ($L \approx 200$ мм) между разрядниками.

Во второй серии экспериментов использовали трубу диаметром 28 мм и разрядники с $\tau = 50$ мкс. Емкость конденсаторов $C_1 = C_2 = 225$ мкФ. В опытах изменяли время задержки Δt_d при напряжении $U = 2000$ В и расстоянии между разрядниками $L = 200$ мм. Детонация возникла при $211 < \Delta t_d < 221$ мкс, т.е. ширина “полуострова” детонации, как и в трубе диаметром 51 мм, на пределе инициирования очень мала (10 мкс). Наименьшая суммарная энергия разрядов, при которой получили детонацию, $E = 0.9$ кДж. На рис. 2а и 2б приведены осциллограммы давления на датчиках Д1, Д2 и Д3, расположенных в сечениях 0.265, 0.665 и 1.065 м при $\Delta t_d = 214$ (а) и 211 мкс (б). Видно, что в отличие от рис. 2а, где зарегистрирована ДВ, на рис. 2б зарегистрирована затухающая ударная волна (УВ). Отметим, что средняя скорость первичной УВ, образованной первым разрядом, в обоих случаях составила 1020 ± 12 м/с. На рис. 2а средняя скорость ДВ на двух измерительных базах равна 1700 ± 13 и 1720 ± 13 м/с, что ниже термодинамической скорости детонации ввиду близости диаметра трубы к предельному диаметру. Чувствительность датчиков давления – 0.025–0.030 В/атм, следовательно давление на фронте ДВ составило 15–20 атм (без учета “шума”). На рис. 2б средняя скорость затухающей УВ на тех же измерительных базах равна 1440 ± 11 и 1060 ± 8 м/с. Кроме сигналов датчиков давления, на рис. 2 приведены записи канала диагностики с сигналами управляющего блока и разрядных токов. Эти записи позволяют определить истинную задержку запуска второго разрядника с погрешностью 0.3 мкс. Сигналы разрядных токов видны и на осциллограммах давления в виде возмущений “нулевой” линии. Отметим, что оптимальное время запуска второго разряда $\Delta t_d \approx 214$ мкс хорошо согласуется с приходом первичной УВ в сечение второго разрядника: сигнал датчика Д1 на рис. 2а совпадает с окончанием разрядного тока на втором разряднике.

В третьей серии опытов также использовали трубу диаметром 28 мм и разрядники с $\tau = 50$ мкс. Чтобы уменьшить энергию инициирования детонации E , между разрядниками устанавливали спираль Щелкина длиной 460 мм, свитую из вольфрамовой проволоки диаметром 4 мм с шагом 18 мм. Емкость C_1 уменьшили до 25 мкФ, а емкость C_2 оставили прежней – 225 мкФ. В опытах варьировали напряжение U и время задержки запуска второго разрядника Δt_d по отношению к времени

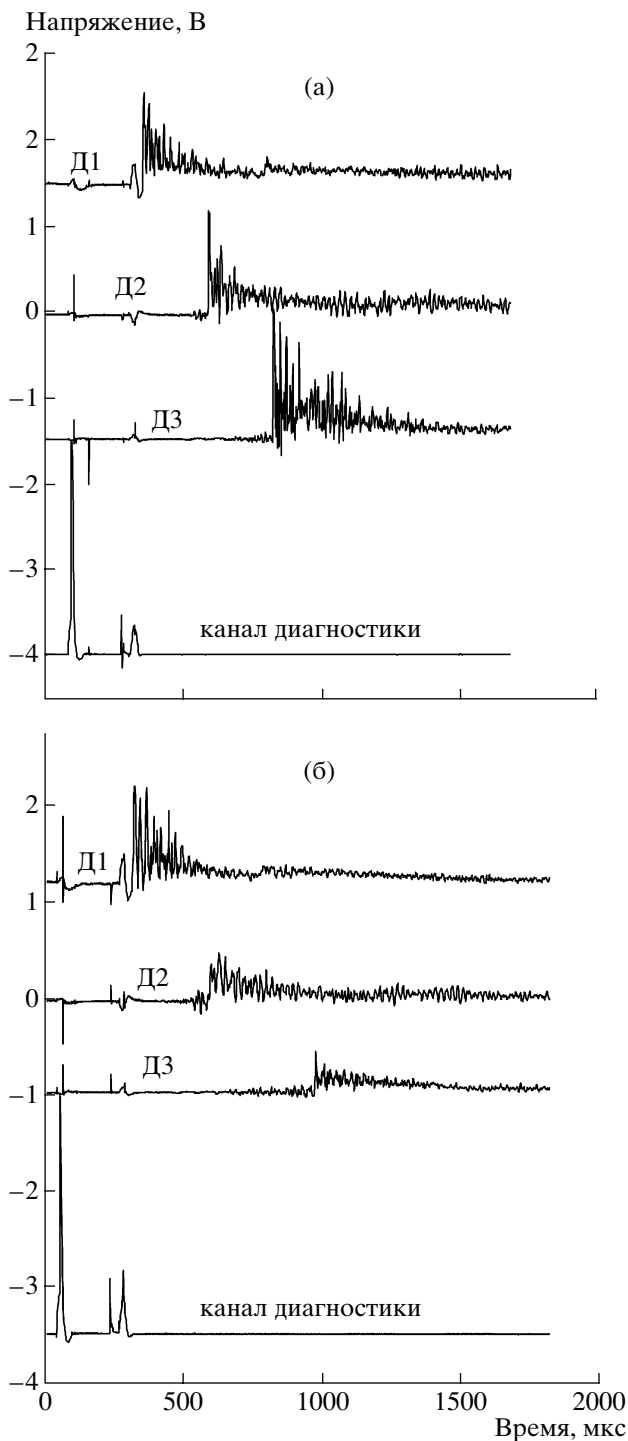


Рис. 2: Осциллограммы давления при ее детонации (а) и при отсутствии (б) в распыле жидкого *n*-гексана в воздухе. Труба диаметром 28 мм. Инициирование двумя последовательными электрическими разрядами.

прихода первичной УВ на специальный зонд, установленный в секции со спиралью на расстоянии 90 мм от второго разрядника. Использование спирали позволило уменьшить энергию до значения $E = 0.66$ кДж, что на 80 и 87% меньше, чем минимальная энергия инициирования детонации одиночными разрядами в трубе диаметром 51 мм. В опытах со спиралью детонация возникала при $60 < \Delta t_d < 120$ мкс, т.е. ширина “полуострова” детонации в окрестности предела инициирования была значительно больше, чем в опытах без спирали. Следовательно, спираль существенно снижает требования к точности синхронизации запуска второго разряда с приходом первичной УВ.

Таким образом, экспериментально продемонстрирован новый способ инициирования детонации в распылах жидкого топлива в воздухе. Он дополняет известные способы – прямое инициирование ДВ и переход горения в детонацию – и основан на принудительном зажигании горючей смеси электрическим разрядом в окрестности фронта относительно слабой первичной УВ. При продолжительности разрядного тока менее 100 мкс обеспечивается быстрое сгорание смеси и трансформация первичной УВ в ДВ. Детонация возникает на коротких расстояниях, причем энергия инициирования оказывается значительно меньше, чем при прямом инициировании одним разрядом. Использование трубы околопредельного диаметра и спирали Щелкина повышает эффективность способа, снижая требуемые энергетические затраты и расширяя пределы инициирования детонации.

СПИСОК ЛИТРАТУРЫ

1. Фролов С.М. // Тяжелое машиностроение. 2003. № 9. С. 19–22.
2. Dabora E.K. Progress in Astronautics and Aeronautics. N.Y.: AIAA, 1991. V. 133. P. 311–324.
3. Brophy C.M., Netzer D.W., Sinibaldi J., Jonson R. High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control. M.: Elex-KM Publ., 2001. P. 207–222.
4. Зельдович Я.Б., Компанеец А.С. Теория детонации. М., Гостехтеориздат, 1955. 268 с.
5. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. XXVII академические чтения по космонавтике. М.: Война и мир, 2003. С. 323–324.