

УДК 534.222.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУЕЙ ПЛАМЕНИ

В. Чжао, Ц.-С. Хань, Ц. Чжан

Нанкинский университет авиации и астронавтики, 210016 Нанкин, Китай, hqx205@nuaa.edu.cn

Представлены результаты исследования инициирования детонации поперечными струями пламени. Проведены серии одноциклических экспериментов, в которых использовались стехиометрические пропанокислородные смеси, разбавленные азотом, при начальном атмосферном давлении как в форкамере сгорания с изменяющейся конфигурацией, так и в трубе диаметром 70 мм и длиной 1550 мм. Эксперименты показали, что диаметр сопла форсунки слабо влияет на переход горения в детонацию; конфигурация камеры сгорания также оказывает незначительное воздействие на длину перехода, но влияет на его длительность — последняя уменьшается с увеличением длины форкамеры сгорания. Для сравнения было экспериментально исследовано традиционное зажигание искрой. При этом инициирование детонации не наблюдалось в смесях с концентрацией азота до 65 %.

Ключевые слова: горение, поперечные струи пламени, инициирование детонации, переход горения в детонацию, ударная волна.

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный детонационный двигатель (ИДД) — новая концепция двигателя, в последние годы привлекающая к себе всё большее внимание [1]. Он обещает быть достаточно дешевой импульсной системой со значениями числа Маха в широком диапазоне как для дозвуковых, так и для сверхзвуковых полетов. ИДД использует периодическую детонационную волну для создания тяги. Для практического применения ИДД необходима частота работы свыше 100 Гц, чтобы получить квазистационарный режим. Следовательно, операционный цикл должен иметь временной масштаб порядка миллисекунд. Один полный цикл работы включает в себя заполнение горючим, зажигание, инициирование детонации, ее распространение, расширение сгоревшего газа и выхлоп. Ключевой проблемой в этом цикле является инициирование детонации. Хотя она может быть инициирована напрямую, это не используется на практике в импульсных устройствах, поскольку для инициирования требуется мощный источник зажигания [2, 3]. Привлекателен другой метод инициирования, называемый переходом горения в детонацию (ПГД). По сути, ПГД представляет собой процесс уско-

рения пламени, который создает подходящие условия для инициирования детонации. Переход горения в детонацию включает в себя целый ряд различных процессов, которые обусловлены многими факторами (размер трубы, положение и тип воспламенителя, шероховатость стенок, наличие препятствий) [4], даже если используются одни и те же взрывчатые смеси. В настоящее время нет общих экспериментальных показателей или теоретических выражений, которые описывали бы переход горения в детонацию, поэтому проводились многочисленные эксперименты по изучению перехода горения в детонацию при различных условиях [5–8].

В процессах ПГД основное внимание сконцентрировано на уменьшении времени и длины ПГД. Одно из решений этого вопроса — усовершенствовать воспламенитель. В последние годы были разработаны такие воспламенители, как преддетонационная труба [9, 10] и зажигание неравновесной плазмой [11]. В обзоре [3] отмечалось, что их использование ускоряет инициирование детонационных волн. Однако и преддетонатор, и зажигание неравновесной плазмой приводят к усложнению конструкции ИДД и увеличению его массы.

Более разумным представляется зажигание струей пламени (ЗСП). Этот подход был разработан А. К. Опенхаймом [12] для автомобиля. Использовать его в ИДД впервые

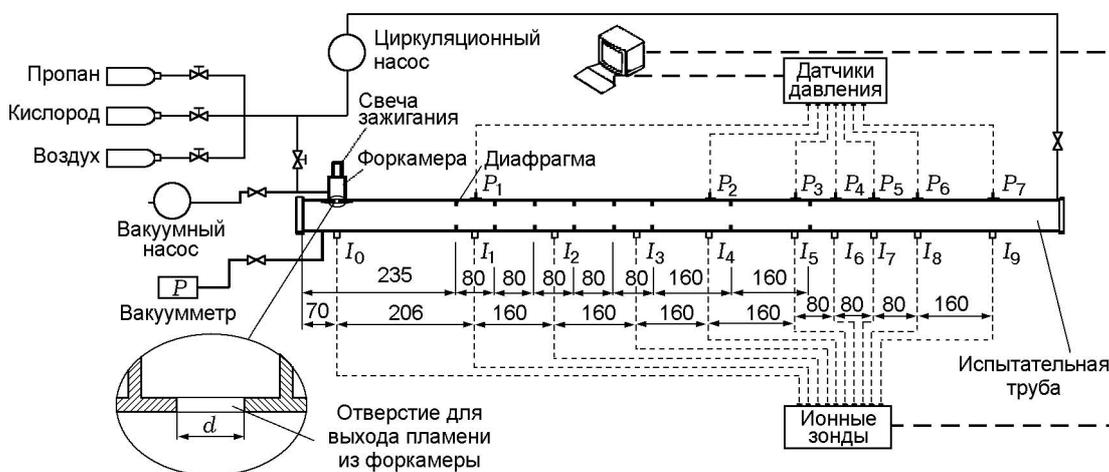


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

предложил Х. Шимада с коллегами [13]. Они исследовали различные конфигурации форкамеры. Был предложен безразмерный параметр LD/φ_n^2 (L — длина форкамеры ЗСП, D — диаметр форкамеры ЗСП, φ_n — диаметр сопла форсунки), показавший свою эффективность при разработке базовой конструкции форкамеры ЗСП объемом $0.5 \div 12.8 \text{ см}^3$. Наилучшие результаты получены при значении $LD/\varphi_n^2 = 10$, соответствующем наименьшему времени ПГД. Тем не менее представленных выше результатов недостаточно для анализа ЗСП с разными начальными условиями. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования ЗСП.

Целью проводимых нами экспериментов является исследование инициирования детонации поперечной струей пламени. Изучены три аспекта: 1) влияние диаметра струи пламени на чувствительность к инициированию детонации; 2) влияние конфигурации форкамеры на время и дистанцию ПГД и процесс распространения пламени; 3) сравнение эволюции ударной волны вдоль испытательной трубы при традиционном зажигании искрой и при зажигании струей пламени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она состоит из системы заполнения газом, системы зажигания, системы циркуляции, системы измерения и диагностики и испытательной трубы ИДД. Диаметр испытательной трубы 70 мм, длина 1550 мм. Для усиления турбулизации течения в трубе установлено восемь диафрагм с внутренним отвер-

стием диаметром $d_0 = 53 \text{ мм}$. Эти препятствия характеризуются блокирующим отношением $BR = 1 - d_0^2/D^2 = 0.43$. Это значение BR взято из работы [14] и использовалось в большинстве экспериментов по детонации. Форкамера ЗСП с внутренним диаметром $D = 32 \text{ мм}$ была размещена перпендикулярно оси испытательной трубы. Расстояние между осью форкамеры ЗСП и закрытым торцом испытательной трубы — 70 мм. На выходе форкамеры имелись пластинки с отверстиями диаметром 8, 16 и 32 мм. Для регистрации прихода ударной волны и фронта реакции вдоль испытательной трубы установлено семь датчиков давления $P_1 \div P_7$ и десять ионных зондов $I_0 \div I_9$.

В настоящих экспериментах использовались стехиометрические смеси пропан — кислород с разной степенью разбавления азотом ($C_3H_8 + 5(O_2 + \beta N_2)$) как в испытательной трубе, так и в форкамере ЗСП. Коэффициент разбавления азотом β представляет собой отношение объема азота к объему кислорода в смеси заданной концентрации ($\beta = 3.76$ для воздуха). Испытательная труба заполнялась пропаном, кислородом, воздухом в соответствии с их парциальными давлениями. И испытательная труба, и форкамера ЗСП предварительно были герметизированы и вакуумированы. Для получения однородной смеси ее перемешивали не менее 10 мин при помощи циркуляционного насоса. Подробнее условия эксперимента представлены в таблице. Все эксперименты проводили при атмосферном давлении ($P_0 = 0.1 \text{ МПа}$). В каждом случае эксперимент повторяли по меньшей мере пять раз, с тем что-

Условия экспериментов

Номер серии экспериментов	Смесь		β	Конфигурация форкамеры ЗСП		
	испытательная труба	форкамера ЗСП		D , мм	L , мм	d , мм
1	$C_3H_8 + 5(O_2 + \beta N_2)$	$C_3H_8 + 5(O_2 + \beta N_2)$	2.89	32	85	8
			2.51			
			2.21			
			1.98			
2	$C_3H_8 + 5(O_2 + \beta N_2)$	$C_3H_8 + 5(O_2 + \beta N_2)$	2.21	32	85	8
					150	16
					220	32

бы обеспечить необходимую точность результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах детонационная волна определялась как в детонационной модели Зельдовича — Неймана — Дёринга (ЗНД) [15] и рассматривалась как ударная волна, связанная с зоной экзотермической реакции. Ударная волна и фронт реакции регистрировались почти одновременно датчиками давления и ионными зондами, установленными в одном и том же поперечном сечении испытательной трубы. Это означает, что ударная волна и фронт реакции связаны как детонационная волна.

Влияние диаметра струи пламени на чувствительность к детонации

Исследовано влияние диаметра сопла на чувствительность к детонации. Для описания чувствительности к детонации использовался такой параметр, как критическое для инициирования количество азота (по объему). Условия этой серии экспериментов приведены под номером 1 в таблице. В этих экспериментах длина форкамеры горения была фиксированной — $L = 85$ мм, а диаметр сопла форсунки пламени менялся — $d = 8, 16$ и 32 мм.

Иницирование детонации не наблюдалось при содержании азота выше 68 %. Критическое содержание азота в трех случаях находится в пределах 65 ÷ 68 % ($\beta = 2.21 \div 2.51$), что несколько отличается от результатов экспериментов [16] по прямому иницированию детонации горячей струей. В работе [16] критическое содержание азота увеличивалось с 30 до 40 % при увеличении диаметра сопла пламени

с 3.2 до 19 мм. Результаты наших экспериментов указывают, что диаметр сопла струи практически не влияет на критическое содержание азота. Тем не менее состав смесей чувствителен к иницированию детонации.

На рис. 2 показаны типичные результаты по распространению пламени при разном содержании азота в смеси при диаметре сопла 8 мм. Видно, что процесс ускорения пламени при содержании N_2 в смеси 65 % ($\beta = 2.21$) отличен от процесса при содержании N_2 68 % ($\beta = 2.51$). Это указывает на то, что пламя ускорялось до максимума при локальной скорости звука и содержании N_2 выше критического разбавления. В работе [2] такое состояние пламени названо быстрым сверхзвуковым пламенем (choked flame). При разбавлении азотом ниже критического значения наблюдалось иницирование детонации, скорость распространения пламени составляла ≈ 2000 м/с.

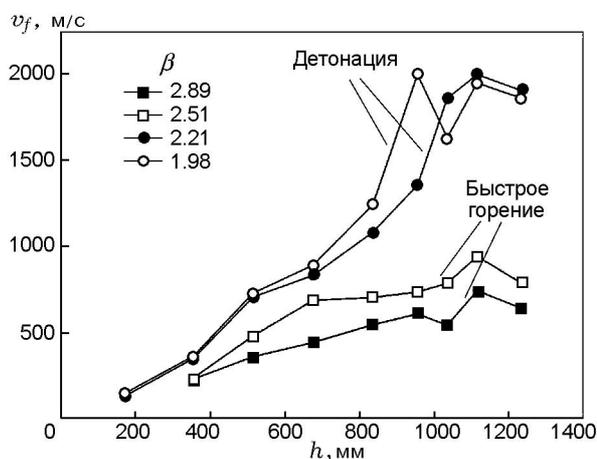


Рис. 2. Распространение пламени при различных концентрациях азота

Влияние конфигурация форкамеры ЗСП на время и длину ПГД

Условия экспериментов по исследованию влияния конфигурации форкамеры ЗСП на время и длину ПГД приведены в таблице под номером 2. В этих экспериментах нулевая точка отсчета для времени ПГД определялась по времени сигнала ионного зонда I_0 , расположенного напротив сопла форсунки. Это означает, что временем от искрового разряда до инъекции пламени можно пренебречь, а время ПГД рассматривается как период от начала распространения пламени до возникновения детонации.

Как видно на рис. 3, длина ПГД во всех случаях равна примерно 1035 ± 80 мм. Она немного меняется с изменением диаметра d струйного сопла. Похожие результаты получены в работе [17]. В [18] показано, что длина ПГД слабо зависит от энергии зажигания, если энергия достаточно большая, но время ПГД при этом меняется значительно — от минимальной величины 1.8 мс до максимальной 4.5 мс. Время ПГД возрастает также с увеличением диаметра форкамеры при ее фиксированной длине $L = 85$ мм. При $L = 150$ и 220 мм время ПГД сначала убывает, затем возрастает. Более того, оно уменьшается с увеличением длины форкамеры. Предполагается, что более сильная струя пламени генерируется более длинной форкамерой, которая поставляет больше начальной энергии для распространения пламени и уменьшает время ПГД.

На рис. 4 показан процесс распространения пламени вдоль испытательной трубы при разных конфигурациях форкамеры сгорания.

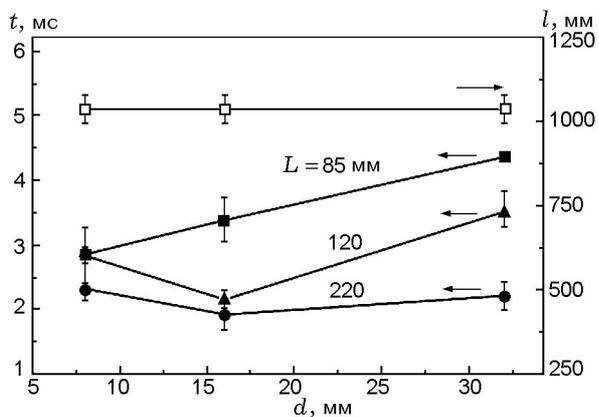


Рис. 3. Время и длина ПГД (l) в зависимости от диаметра струи пламени

Горизонтальная линия на всех трех графиках соответствует скорости Чепмена — Жуке $D_{СЖ} = 1945$ м/с в смеси с $\beta = 2.21$. Это значение, рассчитанное с помощью пакета СНЕМКИН с учетом упрощенного механизма реакций для 26 компонентов [19], близко к экспериментальному значению $D_{СЖ} = 2000$ м/с. Обнаружено, что аналогичная тенденция про-

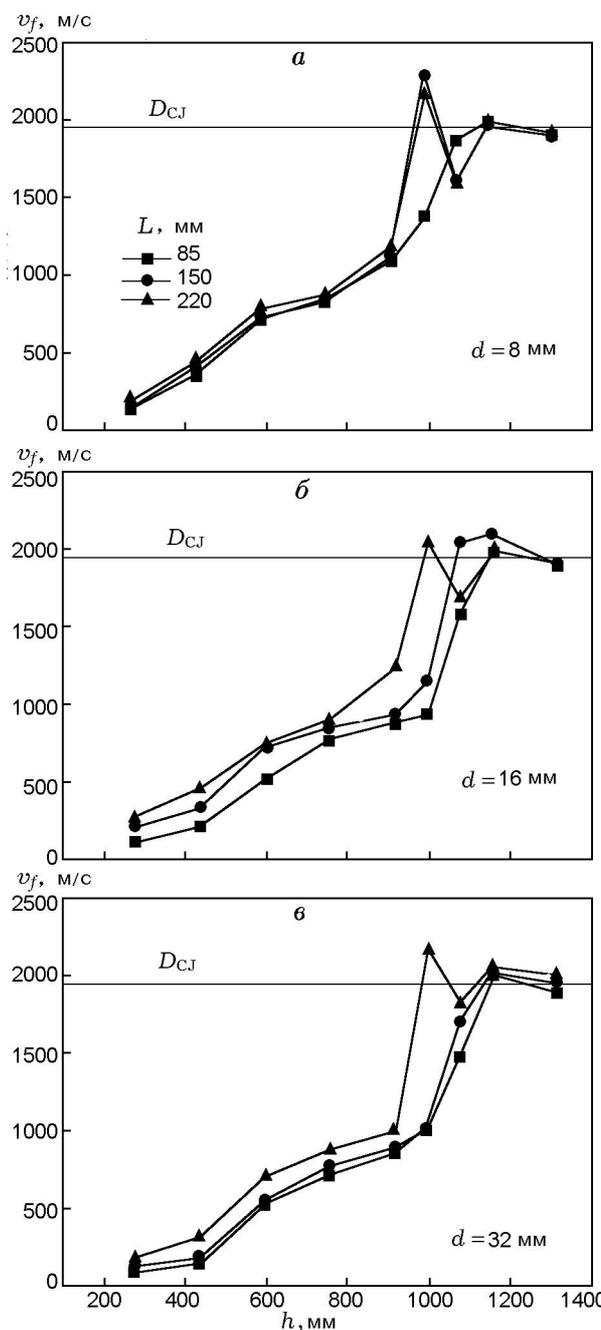


Рис. 4. Распространение пламени при различных длинах форкамеры ЗСП

цесса распространения пламени имеет место во всех случаях. Однако на последнем этапе распространения пламени существовало две различные моды: одна представляла собой процесс непрерывного ускорения вплоть до инициирования детонации, другая содержала стадию замедления после достижения максимального значения скорости (порядка 2000 м/с). Последний случай может быть вызван локальным взрывом на стадии вблизи порога инициирования детонации.

Сравнение с традиционным искровым зажиганием

Для сравнения были выполнены эксперименты с традиционным зажиганием искрой, расположенной в той же позиции, что и форкамера ЗСП. Использовалась та же газовая смесь с $\beta = 2.21$. В испытательной трубе детонация не наблюдалась. В этих условиях скорость фронта реакции была около 1200 м/с вдоль испытательной трубы. На рис. 5 показаны профили давления для двух случаев зажигания. На кривой давления P_1 регистрируется серия волн сжатия, возбужденных расширяющимся горением. Очевидно, что интенсивность волн сжатия при ЗСП (рис. 5, *a*) больше, чем в случае зажигания искрой (рис. 5, *б*). Вскоре после волн сжатия ударная волна при ЗСП, обозначенная P_2 , формируется при давлении 2.7 МПа раньше, чем P_5 при 2.34 МПа. Это означает, что пламя ускоряется быстрее при зажигании струей пламени, что предполагает турбулентное горение в качестве важной причины, приводящей к этому результату.

Чтобы подробнее исследовать метод зажигания струей пламени и оценить энергию зажигания, которая реализуется в форкамере, было проведено компьютерное моделирование процесса инъекции двумерной струи пламени с помощью пакета FLUENT для расчетов динамики жидкости и газа. Смесь моделировалась идеальным газом, течение описывалось уравнениями Навье — Стокса, осредненными по Рейнольдсу (RANS), в рамках SST $k-\omega$ -модели турбулентности со стандартными условиями на стенках. Химическая реакция описывалась моделью EDC с использованием схемы с 34 реакциями для 26 компонентов [19]. Все граничные условия соответствовали используемым в экспериментах. На рис. 6 представлены средневзвешенные по площади значения характеристик среды (скорость реакции пропана, скорость течения, температура, удельная тепло-

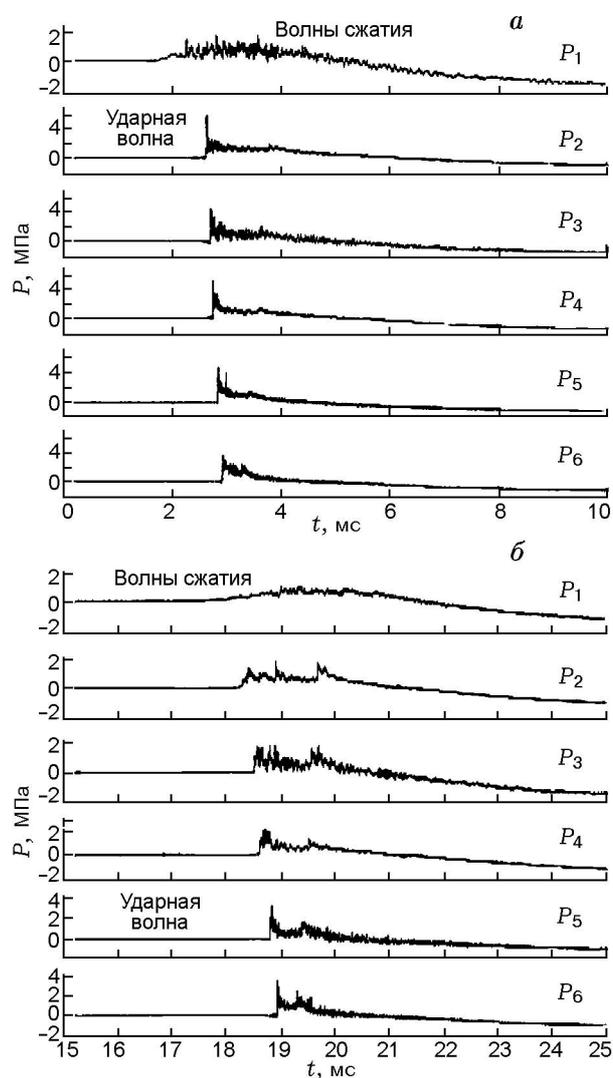


Рис. 5. Профили давления при зажигании струей пламени (*a*) и при традиционном зажигании искрой (*б*)

та, плотность) около сопла пламени в течение 0.6 мс. Как показано на рисунке, отметка t_0 соответствует началу химической реакции в позиции сопла пламени, это считалось началом зажигания струей пламени. Отметка t_1 соответствует точке со скоростью потока, равной нулю, которая показывает, что инъекция струи из форкамеры закончена. Это можно рассматривать как окончание зажигания струей пламени. Промежуток от t_0 до t_1 является временем зажигания (0.2556 мс). Соответственно, используя результаты, показанные на рис. 6, можно вычислить перенесенную в трубу энергию Q по формуле

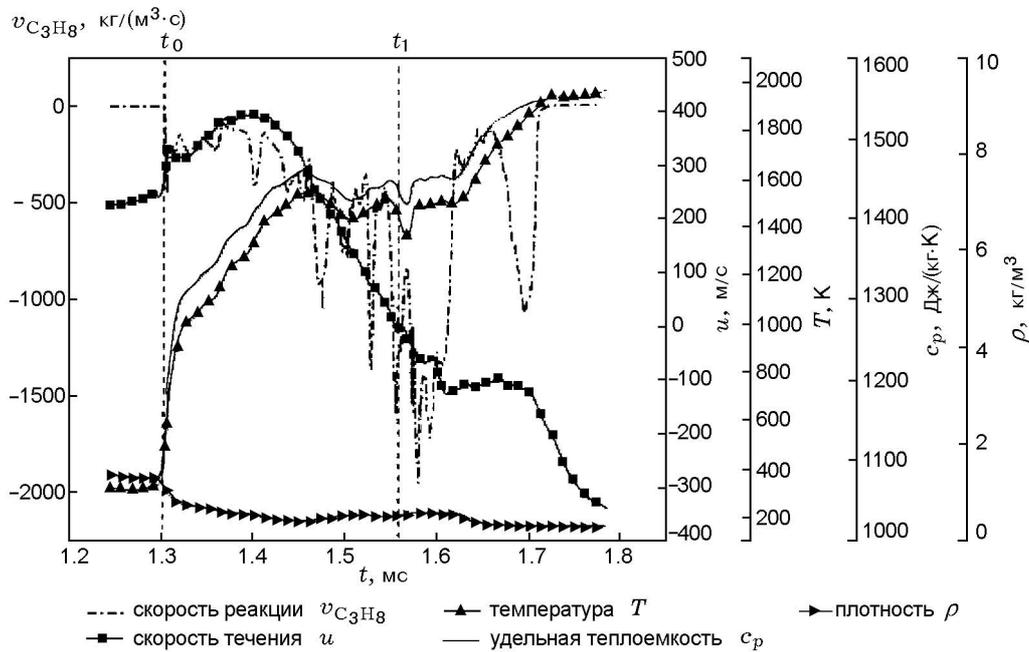


Рис. 6. Осредненные по площади значения характеристик течения возле отверстия форсунки

$$Q = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi \int_{t_0}^{t_1} c_p(t) \rho(t) u(t) \Delta T(t) dt,$$

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0.$$

Здесь d — диаметр форсунки, c_p — удельная теплоемкость, ρ — плотность, u — скорость потока, ΔT — подъем температуры, $T(t)$ — температура, $T_0 = 300$ К — начальная температура смеси. Все эти параметры представляют собой характеристики течения через струйное сопло. Вычисленное значение Q равно 9.96 Дж. Это примерно в 20 раз больше, чем энергия при зажигании искрой (0.5 Дж). Тем не менее этого недостаточно для подтверждения идеи о том, что энергия зажигания напрямую определяет инициирование детонации. Метод ЗСП дает другое начальное состояние горения по сравнению с методом зажигания искрой. В струе пламени высокая концентрация свободных радикалов приводит к резкому росту скорости химической реакции и смешиванию с несгоревшей свежей смесью, что обеспечивает большую поверхность реакции и формирует локальное турбулентное горение. Об этом свидетельствуют шпирен-фотографии [9]. С другой стороны, начальное горение при зажигании искрой распространяется в виде сферического ламинарного фронта пламени. Таким образом, бо-

лее интенсивное и раннее турбулентное горение может быстро формировать индуцированную ударную волну и уменьшать время перехода в детонацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена серия одноцикловых экспериментов по инициированию детонации поперечной струей пламени. Выявлены некоторые макроскопические характеристики инициирования детонации поперечной струей пламени при изменении конфигурации форкамеры сгорания.

Установлено, что во всех случаях детонация не инициируется в смесях с содержанием азота более 68 %. Критическое содержание азота лежит в диапазоне 65 ÷ 68 % и не зависит от диаметра сопла струи пламени. Исследование влияния конфигурации форкамеры ЗСП на длину ПГД показало, что детонация инициируется в одном и том же месте, которое соответствует условиям смеси при $\beta = 2.21$. При этом время ПГД оказалось чувствительно к диаметру струи пламени. Более того, обнаружено, что удлинение форкамеры приводит к уменьшению времени ПГД. Однако этот вывод ненадежен, так как не учитывались дополнительные факторы процесса ПГД, такие как диаметр трубы, диаметр форкамеры и локализация струи пламени. Для получения более

полных выводов требуется исследование этих факторов. Для сравнения были проведены эксперименты с традиционным зажиганием искрой при одинаковых условиях, детонация не наблюдалась, индуцированная ударная волна формировалась слишком поздно для того, чтобы инициировать детонацию в пределах испытательной трубы. Более того, энергия при ЗСП была в 20 раз больше, чем энергия при зажигании искрой в сравнимых экспериментальных случаях.

Проведенные эксперименты показали, что зажигание поперечной струей пламени является эффективным методом инициирования детонации, его разумно использовать в ИДД. В будущем следует сконцентрировать внимание на локальных характеристиках данного процесса путем проведения численных и экспериментальных исследований.

Работа поддержана Funding of Jiangsu Innovation Program for Graduate Education и Fundamental Research Funds for the Central Universities (CXLX11_0215).

ЛИТЕРАТУРА

- Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // *Prog. Energy and Combust. Sci.* — 2004. — V. 30, N 6. — P. 545–672.
- Cicarelli G., Dorofeev S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts // *Prog. Energy and Combust. Sci.* — 2008. — V. 34, N 4. — P. 499–550.
- Kailasanath K. Research on pulse detonation combustion systems // *AIAA Paper 2009-631*.
- Lee J. H. S. Detonation waves in gaseous explosives // *Handbook of Shock Waves*. — Acad. Press, 2001. — V. 3, ch. 17.
- Лю Ц.-М., Бай Ч.-Х., Дай В.-С., Цзян Л. Переход горения в детонацию в аэрозоле изопропилнитрата // *Физика горения и взрыва*. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 82–91.
- Бабкин В. С., Коржавин А. А. Контроль перехода дефлаграции в детонацию в системах с сопротивлением // *Физика горения и взрыва*. — 2011. — Т. 47, № 5. — С. 75–84.
- Фролов С. М. Ускорение перехода горения в детонацию в газах: от К. И. Щёлкина до наших дней // *Физика горения и взрыва*. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 13–24.
- Васильев А. А. Оптимизация перехода горения в детонацию // *Физика горения и взрыва*. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 25–34.
- Brophy C. M., Werner S., Sinibaldi J. O. Performance characterization of a valvess pulse detonation engine // *AIAA Paper 2003-1344*.
- Zhang Yining, Tang Hao, Wang Jiahua, et al. Experimental investigation on PDE prototype with initiator // *Acta Aeronaut. Astronaut. Sinica*. — 2009. — V. 30, N 3. — P. 391–396.
- Sinibaldi J. O., Rodriguez J., Channel B., Brophy C. Investigation of transient plasma ignition for pulse detonation engines // *AIAA Paper 2005-3774*.
- Oppenheim A. K., Beltramo J., Faris D. W., et al. Pulsed jet combustion — a key to controlled combustion engines // *SAE Technol. Paper No. 890153*. — 1989.
- Shimada H., Kenmoku Y., Sato H. A new ignition system for pulse detonation engine // *AIAA Paper 2004-308*.
- Lindstedt R. P., Michels H. J. Deflagration to detonation transitions and strong deflagrations in alkane and alkene air mixtures // *Combust. Flame*. — 1989. — V. 76. — P. 169–181.
- Von Neumann J. Theory of detonation waves // *John Von Neumann's Collected Works*. — 1956. — V. 6.
- Lieberman D. H., Parkin K. L., Shepherd J. E. Detonation initiation by a hot turbulent jet for use in pulse detonation engines // *AIAA Paper 2009-2*.
- Ishii K., Akiyoshi T., Gonda M., et al. Effects of flame jet configurations on detonation initiation // *Shock Waves*. — 2009. — Pt IV. — P. 239–244.
- Sinibaldi J. O., Brophy C. M., Robinson J. P. Ignition effects on deflagration-to-detonation transition distance in gaseous mixtures // *AIAA Paper 2000-3590*.
- Petrova M. V., Williams F. A. Reduced chemistry for autoignition of C3 hydrocarbons in air // *Combust. Sci. Technol.* — 2007. — V. 179. — P. 961–986.

Поступила в редакцию 5/XI 2011 г.,
в окончательном варианте — 19/VI 2012 г.