

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ТРУБЕ
С ПРОФИЛИРОВАННЫМ ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

© 2011 г. С. М. Фролов, И. О. Шамшин, С. Н. Медведев, А. В. Дубровский

Представлено академиком А.А. Берлиным 18.02.2011 г.

Поступило 21.02.2011 г.

С помощью численного моделирования распространения ударной волны (УВ) в трубе с центральным телом (ЦТ) доказана возможность существенного облегчения перехода горения в детонацию (ПГД) в метановоздушной смеси. Показано, что ЦТ должно удовлетворять определенным требованиям: перекрывать сечение трубы приблизительно на 60%, иметь параболический профиль головной части с углом атаки $\sim 40^\circ$ и параболический или эллиптический профиль хвостовой части с углом схождения не более 7° . В этом случае детонацию можно инициировать УВ с числом Маха 3.5 на длине ~ 0.5 м за время ~ 0.2 мс.

Детонационное горение — способ прямого сжигания вещества, который теоретически позволяет повысить термодинамический коэффициент полезного действия технологических горелок и реактивных двигателей летательных аппаратов [1, 2]. Преимущество импульсно-детонационного горения — сочетание высокой мощности энерговыделения с высокими значениями температуры и скорости продуктов детонации. При использовании импульсной детонации в горелочных устройствах теплопередача от продуктов детонации к теплоносителю существенно выше, чем при использовании традиционных горелок, за счет конвективной составляющей. В настоящее время исследуется возможность реализации процесса импульсно-детонационного горения природного газа для повышения эффективности работы энергетических установок [3].

Основная проблема реализации процесса импульсно-детонационного горения природного газа связана с его низкой детонационной способностью. Поэтому в качестве способа инициирования детонации рассматривают ПГД. В [4] для осуществления быстрого ПГД предложено использовать специальные устройства для ускорения пламени в комбинации с устройствами, фокусирующими ударные волны, бегущие перед пламенем. В [5] в качестве фокусирующего устройства для

организации ПГД в метано-воздушной смеси использовалось суживающе-расширяющееся сопло. Показано, что установка в трубе сопла специальной формы позволяет обеспечить переход УВ в детонацию в стехиометрической смеси природного газа с воздухом при нормальных условиях и скорости УВ на входе в сопло выше 1150 ± 30 м/с, что приблизительно соответствует числу Маха 3.3–3.5.

В отличие от [5] в настоящей работе для тех же целей предлагается использовать профилированное ЦТ. Работа посвящена поиску оптимальной формы ЦТ для импульсной детонационной установки с быстрым ПГД в метано-воздушной смеси. Поиск оптимальной формы ЦТ проводили с помощью численного моделирования дифракции относительно слабой УВ на ЦТ, размещенном в прямой трубе круглого сечения.

На рис. 1 показана схема расчетной области. В трубе диаметром D расположено ЦТ диаметром d . Центральное тело состоит из лобовой части, имеющей параболический или конический профиль с углом атаки α , цилиндрической вставки длиной L и хвостовой части, имеющей конический или эллиптический профиль с углом схождения β . Степень перекрытия поперечного сечения трубы телом задается коэффициентом $\delta = (d/D)^2$. В начальный момент времени труба заполнена стехиометрической метано-воздушной смесью при нормальных условиях. Плоская УВ с числом Маха M_0 создается путем задания на левой границе расчетной области соответствующих значений давления, плотности и скорости.

В результате расчета дифракции УВ на ЦТ определяется возможность возникновения детонации в области за телом. Цель расчетов — подобрать такие параметры ЦТ (δ , L , α , β , форма профиля), при которых инициирование детонации максимально облегчается, т.е. достигается при наименьшем значении M_0 .

В основу математической модели положены уравнения газовой динамики для невязкого и нетеплопроводного идеального газа в цилиндрической системе координат:

$$[pr]_t + [\rho ur]_z + [\rho vr]_r = 0,$$

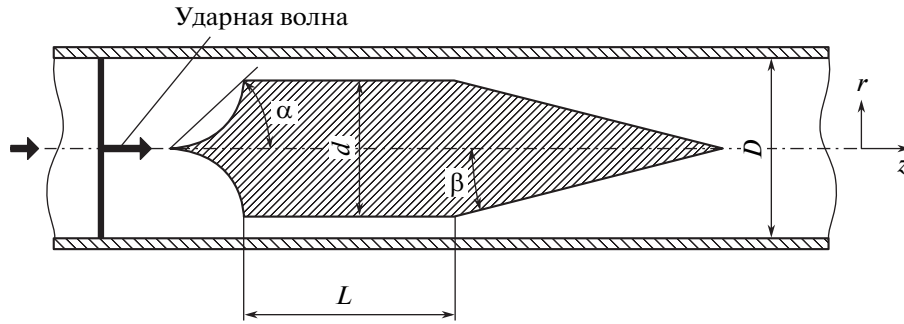


Рис. 1. Схема расчетной области.

$$[\rho ur]_t + [(\rho u^2 + p)r]_z + [\rho uvr]_r = 0,$$

$$[\rho vr]_t + [\rho uvr]_z + [(\rho v^2 + p)r]_r = p,$$

$$[Er]_t + [(E + p)ur]_z + [(E + p)vr]_r = r\dot{Q},$$

$$[\rho Y_i r]_t + [\rho Y_i ur]_z + [\rho Y_i vr]_r = rJ_i,$$

где t – время, z и r – продольная и радиальная координаты, ρ – плотность газа, Y_i – массовая доля i -го вещества, u и v – продольная и радиальная составляющие вектора скорости, p – давление, $E = \rho(e + (u^2 + v^2)/2)$ – полная удельная энергия $\left(e = \int_0^T C_v(T) dT \right)$ – внутренняя энергия газа, $C_v(T) = \sum_{i=1}^{N_g} Y_i C_{vi}(T)$ – удельная теплоемкость газа, которую рассчитывали по известным зависимостям удельной теплоемкости веществ от температуры [6], N_g – общее число компонентов в смеси.

Систему уравнений замыкали уравнением состояния идеального газа

$$p = \rho RT \sum_{i=1}^{N_g} Y_i \mu_i^{-1},$$

где R – универсальная газовая постоянная, T – температура, μ_i – молекулярная масса i -го вещества.

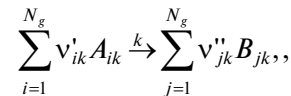
Источники массы J_i и тепла \dot{Q} определяли по известным скоростям химических реакций w_k и энтальпиям образования веществ ΔH_i^0 :

$$J_i = \mu_i \sum_{k=1}^{N_r} (v''_{ik} - v'_{ik}) w_k,$$

$$\dot{Q} = \sum_{k=1}^{N_r} w_k Q_k, \quad Q_k = \sum_{i=1}^{N_g} (v'_{ik} - v''_{ik}) \Delta H_i^0,$$

N_r – общее число реакций в смеси.

Химические превращения описывали реакциями вида:



где A_{ik} и B_{jk} – исходные реагенты и продукты k -й реакции, а v'_{ik} , v''_{jk} – их стехиометрические коэффициенты соответственно; Скорости химических реакций рассчитывали по известной формуле:

$$w_k = A_k (p/p_0)^{m_k} \exp(-(E_a)_k / RT) \prod_{i=1}^{N_g} (\rho Y_i \mu_i^{-1})^{v_{ik}}$$

где A_k – предэкспоненциальный множитель, $(E_a)_k$ – энергия активации, m_k – параметр, учитывающий изменение скорости реакции с давлением, p_0 – атмосферное давление.

В расчетах использовали глобальный кинетический механизм окисления метана [7], содержащий пять реакций с участием шести компонентов (CH_4 , O_2 , CO , H_2 , CO_2 и H_2O). Предварительно проверено, что механизм [7] с приемлемой точностью воспроизводит имеющиеся экспериментальные данные по задержкам самовоспламенения в условиях, близких к исследуемым.

В основе численной реализации математической модели лежит принцип расщепления по физическим процессам. Подсистема уравнений, описывающая конвективный перенос и работу сил давления, решается методом Годунова–Колгана. Подсистема обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая химические реакции, решается явным методом Рунге–Кутты по формулам Дормана и Принса с автоматическим выбором шага интегрирования по времени. Программная реализация использует пространственную декомпозицию расчетной области на подобласти и обмен граничными данными при помощи интерфейса передачи сообщений (MPI) для ускорения вычислений на многопроцессорных компьютерах.

Расчеты проведены для трубы диаметром $D = 97$ мм. Длина расчетной области – 1 м. Разност-

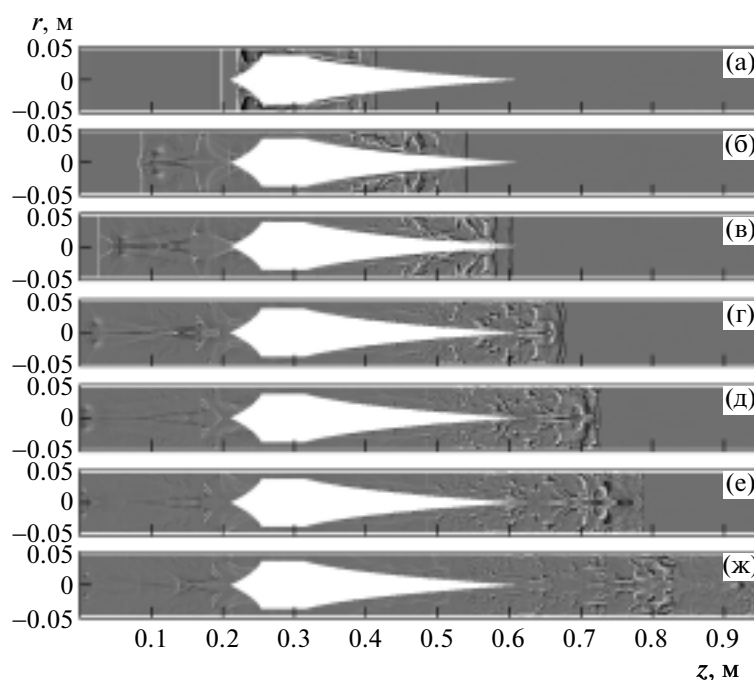


Рис. 2. Полуторные профили градиента плотности.

Время, мс: 0.200 (а), 0.300 (б), 0.350 (в), 0.400 (г), 0.425 (д), 0.450 (е), 0.520 (ж).

ная сетка — равномерная с шагом 0.2 мм. Опыты и расчеты с профилированными соплами [5, 8] показали, что инициирование детонации максимально облегчается при степени сужения сечения ~ 0.7 . Принимая этот факт во внимание, расчеты с ЦТ были также проведены для $\delta = 0.6-0.7$. В ходе предварительных расчетов ($L = 1$ м, $\beta = 90^\circ$) установлено, что инициирование детонации максимально облегчалось при дифракции УВ на ЦТ с параболическим профилем лобовой части и $\alpha \approx 40-45^\circ$. При прочих равных условиях детонация в трубе с ЦТ с коническим или параболическим профилем хвостовой части инициировалась легче при $\delta = 0.6$ и 0.7 соответственно (в обоих случаях значения β изменялись от 3 до 7°). Число Маха инициирующей УВ изменяли в диапазоне от 3.0 до 3.8 . Эти значения существенно ниже, чем число Маха детонации Чепмена—Жуге, приблизительно равное 5.3 .

В расчетах инициирование детонации достигнуто при $M_0 \geq 3.5$ и $\delta = 0.6$ для ЦТ конического ($\alpha = 45^\circ$) и параболического ($\alpha = 40^\circ$) профилей головной части с хвостовыми частями конического, параболического и эллиптического профилей ($\beta \leq 7^\circ$). При минимальном значении M_0 детонационный взрыв происходил в хвостовой части ЦТ после серии отражений УВ от поверхности тела и трубы. Как правило, инициирование детонационной волны проходило через стадию пересжатой детонации, т.е. в переходный период скорость лидирующего фронта волны V была

больше термодинамической скорости детонации V_{CJ} ($V/V_{CJ} = 1.2-1.4$). При этом на фронте детонационной волны всегда наблюдались “горячие точки”, образовавшиеся в результате столкновения поперечных волн.

На рис. 2 приведен пример расчета инициирования детонации при дифракции УВ с $M_0 = 3.5$ на ЦТ с параболическими профилями головной и хвостовой части ($\alpha = 40^\circ$, $\beta = 7^\circ$, $L = 60$ мм, $\delta = 0.6$). В этом примере пересжатая детонационная волна возникает в виде нового газодинамического разрыва за инициирующей УВ, претерпевшей дифракцию (рис. 2в). На рис. 2г оба разрыва сливаются, образуя единый фронт детонации, который в дальнейшем распространяется в самоподдерживаемом режиме. В итоге инициирующая УВ с числом Маха 3.5 превращается в детонацию за время ~ 0.2 мс на расстоянии ~ 0.5 м. Подчеркнем, что в расчетах распространения такой же УВ в трубе без ЦТ никакой сколь-нибудь заметной химической активности в ударно-сжатой смеси не обнаружено.

Таким образом, в результате численного моделирования распространения УВ в трубе с ЦТ доказана возможность сокращения расстояния и времени ПГД в метано-воздушной смеси. Показано, что ЦТ должно удовлетворять определенным требованиям: перекрывать сечение трубы с $\delta \approx 0.6$, иметь параболический профиль головной части с углом $\alpha \approx 40^\circ$ и параболический или эллиптический профиль хвостовой части с углом β

не более 7°. Минимальная интенсивность УВ, требуемая для инициирования детонации, оказалась приблизительно на том же уровне, что и при использовании фокусирующего сопла [5, 8]. Однако возможность использования ЦТ существенно расширяет круг конструктивных решений при проектировании импульсно-детонационных горелочных устройств на природном газе.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственные контракты 02.516.12.6026 “Разработка процесса импульсного детонационного горения природного газа для повышения эффективности работы энергетических установок” и П502 “Разработка методов численного моделирования нестационарного горения и детонации газов и капельных смесей в каналах сложной геометрии и полуограниченных объемах для применения в импульсно-детонационных энергетических установках”), а также при частичной поддержке РФФИ и Президиума Российской Академии наук (программа № 22).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я. Б. // ЖТФ. 1940. Т. 10. В. 17. С. 1453–1461.
2. Фролов С. М., Барыкин А. Е., Борисов А. А. // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 3. С. 17–25.
3. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С. и др. // Горение и взрыв. 2011. В. 4. С. 101–107.
4. Фролов С. М. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
5. Фролов С. М., Аксенов В. С., Скрипник А. А. // ДАН. 2011. Т. 436. № 3. С. 346–350.
6. JANAF: Thermochemical Tables. 2nd ed. US. Wash. (D.C.): Dept. Commerce; Nat. Bureau Standards 1970.
7. Басевич В. Я., Фролов С. М. // Хим. физика. 2006. Т. 25. № 6. С. 54–62.
8. Semenov I.V., Utkin P.S., Markov V.V., et al. // Combust. Sci. and Technol. 2010. V. 182. P. 1735–1746.