

03

Управление положением стабилизированной детонационной волны в сверхзвуковом потоке газовой смеси в плоском канале

© В.А. Левин, Т.А. Журавская[¶]Научно-исследовательский институт механики Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова[¶] E-mail: zhuravskaya@imec.msu.ru*Поступило в Редакцию 8 ноября 2016 г.*

Используя детальный кинетический механизм химического взаимодействия, исследована стабилизация детонационной волны в стехиометрической водородно-воздушной смеси, поступающей со сверхзвуковой скоростью в плоский симметричный канал с пережатием. Определены условия, обеспечивающие формирование в канале создающего тягу течения со стабилизированной волной детонации. Исследовано влияние изменения числа Маха входящего потока, запыленности поступающей в канал горючей смеси и размера выходного сечения на положение стабилизированной в потоке детонационной волны с целью повышения эффективности детонационного сжигания газовой смеси. Установлена возможность формирования в канале создающего тягу течения со стабилизированной волной детонации без затрат энергии.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.06.44407.16560

Изучение условий стабилизации детонационной волны в сверхзвуковом потоке газовой смеси является одним из основных направлений исследования детонационного горения в высокоскоростных потоках. Подробный обзор работ, посвященных данной тематике, представлен в [1]. Так, в [2] были определены геометрические параметры плоского симметричного канала с сужением поперечного сечения (с пережатием), обеспечивающие без затрат энергии стабилизацию сформированной детонационной волны в стехиометрической водородно-воздушной смеси, поступающей в указанный канал со сверхзвуковой скоростью. Исследование устойчивости формирующегося течения к сильным возмущениям было проведено в [3]. Однако в [2,3] сгорание

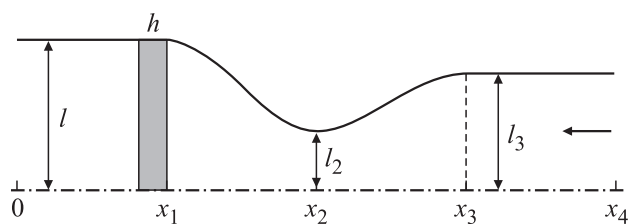


Рис. 1. Схема части канала, выше плоскости симметрии.

смеси в детонационной волне происходит неэффективно: течение не создает тягу.

В данной работе представлены результаты численного исследования возможности формирования создающего тягу течения со стабилизированной детонационной волной (СДВ) в плоском симметричном канале с сужением, а также указаны некоторые способы управления положением СДВ в потоке с целью повышения эффективности детонационного сжигания газовой смеси.

Подобно исследованиям [2,3] в работе изучается детонационное горение стехиометрической водородно-воздушной смеси, поступающей со сверхзвуковой скоростью в симметричный плоский канал с сужением. В отличие от указанных выше работ исследуется течение газа в канале, выходное сечение которого больше входного. Схема части канала, выше плоскости симметрии, представлена на рис. 1. Горючая смесь при нормальных условиях втекает в канал параллельно его плоскости симметрии через границу $x = x_4$ (направление движения газа обозначено стрелкой, рис. 1) и вытекает через границу $x = 0$. Параметры газовой смеси на входе в канал имеют следующие значения: $p_0 = 101325$ Па, $T_0 = 298$ К, $M_0 > M_{J0}$. Здесь p_0 , T_0 , M_0 — давление, температура и число Маха потока, M_{J0} — число Маха самоподдерживающейся детонационной волны, распространяющейся по покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смеси с параметрами p_0 , T_0 . Отметим, что в данных условиях $M_{J0} \approx 4.85$. Поступающая в канал горючая смесь рассматривается как смесь газов H_2 , O_2 , N_2 и Ar в объемном соотношении 42:21:78:1 соответственно.

Система уравнений, описывающих плоское двумерное нестационарное течение невязкой нетеплопроводной многокомпонентной газовой

смеси, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho(u^2 + v^2)/2 + \rho h - p)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial(\rho v((u^2 + v^2)/2 + h))}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(\rho n_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u n_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v n_i)}{\partial y} &= \rho \omega_i. \end{aligned}$$

Здесь x и y — продольная и поперечная декартовы координаты; u и v — соответствующие компоненты скорости; t — время; ρ , p и h — плотность, давление и удельная энтальпия смеси; n_i и ω_i — удельные концентрация и скорость образования i -го компонента смеси.

Уравнения состояния горючей смеси, рассматриваемой как совершенный газ, есть

$$p = \rho R_0 T \sum_i n_i, \quad h = \sum_i n_i h_i(T).$$

Здесь T — температура, R_0 — универсальная газовая постоянная. Зависимости парциальных энтальпий от температуры $h_i(T)$ определяются по приведенным энергиям Гиббса соответствующих компонентов смеси [4].

Для описания химического взаимодействия используется детальный кинетический механизм окисления водорода, предложенный в [5].

Начальное условие — плоское стационарное течение газовой смеси в канале, полученное методом установления. Для инициирования детонации в начальный момент времени используется мгновенный подвод сверхкритической (достаточной для прямого инициирования детонационного горения) энергии E_0 в области, имеющей форму тонкого слоя толщиной h около сечения $x = x_1$ (затемненная область, рис. 1). Плотность энергоподвода зависит от поперечной координаты y по гауссовскому закону.

Решение уравнений газовой динамики совместно с уравнениями детальной химической кинетики было проведено конечно-разностным методом, основанным на схеме С.К. Годунова [6]. Численное моделирование выполнено при шаге разбиения расчетной сетки $\Delta = 0.02\text{--}0.04$ м, обеспечивающем корректное разрешение структуры детонационной волны. Рассматривались каналы с сужением, геометрические параметры которых отличаются от параметров канала работы [3] величиной l , т.е. $x_1 = 0.125$ м, $x_2 = 0.25$ м, $x_3 = 0.375$ м, $x_4 = 0.5$ м, $l_2 = 0.0175$ м, $l_3 = 0.035$ м и $l > l_3$.

В результате начального подвода энергии E_0 образуются две детонационные волны: одна распространяется по потоку и быстро сносится им за пределы канала, вторая — против потока. Исследовались условия, обеспечивающие стабилизацию этой волны в потоке так, чтобы на стенки канала действовала сила тяги. В рассматриваемом случае тяга T определялась следующим образом:

$$T = 2 \int_0^{x_4} p(x, y(x), t) \operatorname{ctg} \alpha(x) dx,$$

где $y(x)$ — функция, задающая форму верхней стенки канала, $\alpha(x)$ — угол между вектором внешней нормали к верхней стенке и осью x .

В результате проведенного численного исследования установлено, что число Маха входящего потока M_0 и величина половины выходного сечения l могут быть подобраны так, что в канале формируется создающее тягу течение с СДВ. Так, в случае $M_0 = 5$ достаточным условием для эффективной стабилизации волны является использование канала с $l = 0.04$ м (рис. 2, а). Отметим, что для детального представления течения около СДВ на рис. 2 (и далее на рис. 3) изображены поля давления лишь в части рассматриваемого канала. Иницируемая начальным энергоподводом около сечения $x = 0.125$ м пересжатая детонационная волна проходит против потока и стабилизируется в расширяющейся части канала около сечения $x = 0.143$ м (вблизи плоскости симметрии), образуя с косым скачком стационарного течения трехударную маховскую конфигурацию.

С целью увеличения эффективности детонационного сжигания смеси исследовано влияние изменения числа Маха входящего потока, запыленности поступающей в канал смеси и размера выходного сечения

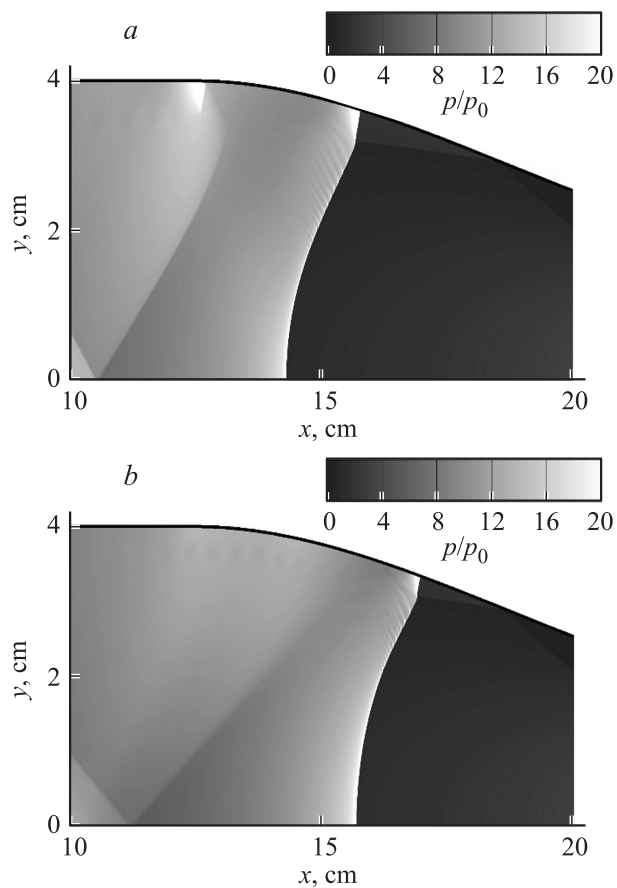


Рис. 2. Стабилизация детонационной волны в канале с пережатием в случае $l = 0.04$ м: *a* — $M_0 = 5$; *b* — $M_0 = 4.9$, плотность пыли в поступающем потоке $\rho_{s0} = 0.1 \text{ kg/m}^3$.

на положение СДВ в потоке. Для моделирования течения запыленной газовой смеси в данной работе использовалась расширенная на многокомпонентные смеси [3] равновесная модель [7], описывающая течение газа с мелкими инертными частицами. Представленная в [7] модель использовалась в ряде работ, например в [8].

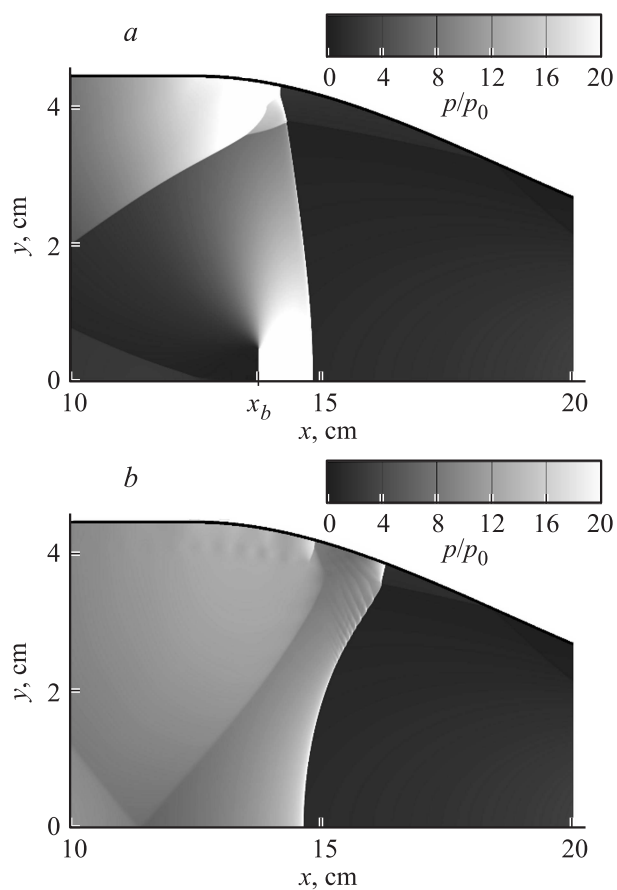


Рис. 3. Формирование создающего тягу течения с СДВ без затрат энергии в случае чистой смеси при $M_0 = 4.9$, $l = 0.045$ м: *a* — $t = 0.05$ мс, *b* — $t = 2.5$ мс.

В рассмотренном выше канале уменьшение числа Маха входящего потока до $M_0 = 4.9$ приводит к тому, что детонационная волна проходит в сужающуюся часть и выходит из канала против потока. Однако добавление в горючую смесь мелких инертных частиц пыли служит механизмом, позволяющим стабилизировать детонацию. Так,

в случае плотности пыли в поступающем в канал (при $M_0 = 4.9$) потоке запыленной смеси $\rho_{s,0} = 0.1 \text{ kg/m}^3$ и удельной теплоемкости пыли $c_s = 800 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ получено, что волна детонации стабилизируется в расширяющейся части канала около сечения $x = 0.157 \text{ m}$ (рис. 2, *b*). Таким образом, указанные уменьшение числа Маха потока и степень запыленности поступающей смеси приводят к перемещению положения СДВ в расширяющейся части канала в направлении выше по потоку и увеличению тяги более чем в 3 раза по сравнению с рассмотренным течением при $M_0 = 5$.

Другим механизмом, позволяющим управлять детонационным горением в потоке, является величина выходного сечения канала. Так, в случае чистой горючей смеси, поступающей в канал со скоростью, соответствующей $M_0 = 4.9$, размер выходного сечения может быть подобран так, что в канале формируется течение с СДВ, а создаваемая им тяга превышает тягу рассмотренного выше течения при $M_0 = 5$. В частности, получено, что небольшое расширение выходного сечения $l = 0.045 \text{ m}$ обеспечивает такое положение СДВ, что тяга увеличивается примерно в 2.5 раза.

Проведенное численное моделирование показало, что течение с СДВ в канале с пережатием может быть получено без каких-либо затрат энергии, если для инициирования детонации вместо энергоподвода использовать препятствие (барьер). Так, в рассмотренном случае $M_0 = 4.9$, $l = 0.045 \text{ m}$ установлено, что инициирование детонационного горения возможно благодаря препятствию высоты $h_b = 0.005 \text{ m}$, расположенному на плоскости симметрии около сечения $x_b = 0.1375 \text{ m}$, существующему время $t_b = 0.05 \text{ ms}$ (рис. 3). В результате в канале формируется создающее тягу течение с детонационной волной (рис. 3, *b*), стабилизирующейся точно в том месте, где стабилизировалась волна, инициируемая энергоподводом.

Таким образом, в работе определены условия, обеспечивающие формирование создающего тягу течения с СДВ в плоском симметричном канале с пережатием; установлены механизмы управления положением в потоке СДВ, позволяющие повышать эффективность детонационного сжигания газовой смеси; выявлена возможность формирования в указанном канале создающего тягу течения с СДВ без затрат энергии.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (№ 14-01-00742, 16-29-01092), гранта НШ-8425.2016.1. Разработка используемого

программного комплекса и изучение стабилизации детонации в запыленной газовой смеси выполнены при поддержке РФФИ (проекты № 14-19-01759 и 14-11-00773 соответственно). Исследования выполнены с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова [9].

Список литературы

- [1] Журавская Т.А., Левин В.А. // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 2. С. 117–128.
- [2] Журавская Т.А., Левин В.А. // Изв. РАН. МЖГ. 2012. № 6. С. 126–136.
- [3] Журавская Т.А., Левин В.А. // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 4. С. 120–129.
- [4] Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Под ред. Глушко В.П. и др. Т. I. М.: Наука, 1978. 495 с.
- [5] Старик А.М., Титова Н.С., Шарипов А.С., Козлов В.Е. // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46 (5). С. 3–19.
- [6] Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
- [7] Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 432 с.
- [8] Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 18. С. 17–24.
- [9] Воеводин В.В., Жуматий С.А., Соболев С.И. и др. // Открытые системы. 2012. № 7. С. 36–39.