

УДК 533.27:534.222.2

МНОГОГОЛОВАЯ ВРАЩАЮЩАЯСЯ ДЕТОНАЦИЯ В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ

© 2022 г. Академик РАН В. А. Левин^{1,2,*}, И. С. Мануйлович^{1,**}, В. В. Марков^{1,3,***}

Поступило 18.11.2021 г.

После доработки 18.11.2021 г.

Принято к публикации 25.11.2021 г.

Численно исследованы течения в камере сгорания в форме кольцевого зазора между пластинами с многоголовой вращающейся детонацией пропановоздушной смеси, поступающей в камеру в направлении оси симметрии из резервуара с заданными параметрами торможения. Определены условия формирования заданного числа волн в многоголовой волне детонации, связанные с размерами камеры сгорания и параметрами инициаторов. Получены значения максимального числа волн при заданных размерах камеры сгорания. Установлено, что существование максимального критического значения числа волн в многоголовой детонации связано с блокировкой подачи горючей смеси. Получено, что при неравномерном расположении инициаторов постепенно происходит выравнивание взаимных углов между волнами, составляющими многоголовую детонацию. Для расчетов, проводившихся на суперкомпьютере МГУ “Ломоносов”, использовался оригинальный вычислительный комплекс, в котором реализованы модифицированный метод С.К. Годунова и одностадийная кинетика реакций.

Ключевые слова: вращающаяся детонация, пропановоздушная смесь, кольцевой зазор

DOI: 10.31857/S2686740022010114

Газовая детонация представляет собой сложный многомерный процесс, адекватное моделирование которого возможно только в трехмерной нестационарной постановке. В настоящее время в центре внимания исследователей детонации находятся вопросы инициирования, формирования и устойчивости непрерывно вращающихся детонационных волн [1] в камерах сгорания автономных реактивных двигателей. Определенное сходство с вращающейся детонацией имеет спиновая детонация, распространяющаяся по неподвижной смеси в каналах круглого сечения [2]. Вращающуюся детонацию рассматривают, как правило, в канале, ограниченном двумя соосными цилиндрами [3]. Ранее в работах авторов изучалось осесимметричное устройство с кольцевым соплом

[4], в котором тяга создавалась рабочим телом на тяговой стенке, примыкающей к кольцевому соплу в форме сферического сегмента.

В настоящей работе в трехмерной нестационарной постановке исследуется процесс формирования в кольцевом зазоре между пластинами нескольких непрерывно вращающихся волн детонации пропановоздушной смеси, изучаются вопросы инициирования, устойчивости и анализируются возникающие ударно-волновые структуры. Далее комплекс, состоящий из нескольких вращающихся волн детонации, будет называться многоголовой вращающейся детонацией. Расчеты проводятся в оригинальном программном комплексе, в котором реализована схема С.К. Годунова. Определены критические условия инициирования заданного количества вращающихся волн детонации, связанные с размерами камеры сгорания, энергией инициирования и размерами инициаторов.

Численное моделирование осуществляется на базе системы уравнений Эйлера для идеальной многокомпонентной реагирующей смеси в неподвижной декартовой системе координат:

$$\begin{aligned}(\rho_i)_t + (\rho_i u)_x + (\rho_i v)_y + (\rho_i w)_z &= \omega_i, \\ (\rho u)_t + (p + \rho u^2)_x + (\rho uv)_y + (\rho uw)_z &= 0,\end{aligned}$$

¹ Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

³ Математический институт имени В.А. Стеклова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: levin@imec.msu.ru

**E-mail: ivan.manuylovich@gmail.com

***E-mail: markov@mi-ras.ru

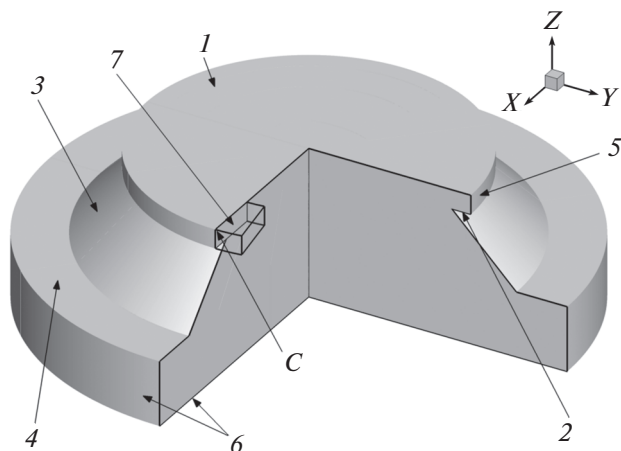


Рис. 1. Схема устройства с вырезанной четвертью.

$$\begin{aligned} (\rho v)_t + (\rho uv)_x + (p + \rho v^2)_y + (\rho vw)_z &= 0, \\ (\rho w)_t + (\rho uw)_x + (\rho vw)_y + (p + \rho w^2)_z &= 0, \\ (H - p)_t + (Hu)_x + (Hv)_y + (Hw)_z &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$H = \sum_{i=1}^N \rho_i h_i + \rho(u^2 + v^2 + w^2)/2, \quad \rho = \sum_{i=1}^N \rho_i,$$

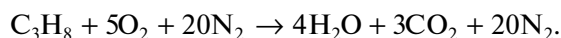
где $(f)_\xi$ обозначает частную производную, p , ρ – давление и плотность смеси, u , v и w – компоненты скорости вдоль осей x , y и z и соответственно, N – число компонентов смеси, ρ_i и h_i – плотность и энтальпия i -го компонента смеси, ω_i – скорость изменения ρ_i при химических реакциях, H – полная энтальпия.

Калорические и термическое уравнения состояния смеси имеют вид

$$h_i = c_{0i} + c_{pi}T, \quad i = 1 \dots N, \quad p = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_i}{\mu_i} \right) R_0 T,$$

где T – температура смеси, μ_i – молярные массы компонентов, R_0 – универсальная газовая постоянная, а c_{0i} , c_{pi} – постоянные, полученные аппроксимацией табличных значений [5].

Рассматривается стехиометрическая смесь, моделирующая пропановоздушную смесь и состоящая из пропана, кислорода и азота в молярном соотношении $\nu_{C_3H_8} : \nu_{O_2} : \nu_{N_2} = 1 : 5 : 20$. Горение пропана описывается одностадийной кинетикой [6] согласно уравнению реакции



При этом ω_i в ((1)) определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{C_3H_8}}{\mu_{C_3H_8}} &= \frac{\omega_{O_2}}{5\mu_{O_2}} = -\frac{\omega_{H_2O}}{4\mu_{H_2O}} = -\frac{\omega_{CO_2}}{3\mu_{CO_2}} = \\ &= AT^\delta e^{-\frac{E}{R_0 T}} \left(\frac{\rho_{C_3H_8}}{\mu_{C_3H_8}} \right)^\alpha \left(\frac{\rho_{O_2}}{\mu_{O_2}} \right)^\beta, \\ \omega_{N_2} &= 0, \end{aligned}$$

где A , E , δ , α и β – константы, определяющие скорость реакции.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается осесимметричное устройство, схема которого с вырезанной четвертью представлена на рис. 1. Здесь 1 – плоский диск заданного диаметра D_1 , 2 – параллельное диску плоское кольцо с заданным внутренним диаметром D_2 , 3 – коническая секция заданной длины L с углом полураствора 45° , 4 – плоское кольцо. Плоские диск 1 и кольцо 2 образуют зазор заданной ширины h , в который через кольцо 5 в направлении к оси симметрии подается горючая смесь, 6 – открытые границы расчетной области, 7 – один из инициаторов детонации с временной стенкой, C – точка пересечения поверхностей диска 1, кольца 5 и временной стенки инициатора. Используется специальная расчетная сетка, в которой линейный размер всех расчетных ячеек меньше 0.2 мм.

Предполагается, что в зазор через кольцо 5 поступает однородная смесь с заданными параметрами торможения, а в каждой точке кольца ее скорость и термодинамические параметры определяются согласно одномерной теории сопла Лавалю по параметрам торможения и статическому давлению в зазоре. Так, если давление в зазоре в точке вблизи кольца больше давления торможения, то смесь не втекает, а при давлении, равном или меньшем критического, смесь втекает со скоростью звука и соответствующими ей значениями термодинамических параметров. В других случаях имеет место втекание с дозвуковой скоростью.

С целью иницирования M одновременно непрерывно вращающихся волн детонации (M -головой вращающейся детонации) вдоль кольца 5 располагаются M инициаторов, формирующих волны детонации мгновенным энергоподводом по ранее разработанной методике [7]. Формирование такой детонации при прочих равных условиях, таких как значения параметров торможения и геометрии устройства D_1 , D_2 , L и h , зависит от параметров инициаторов – энергии инициирования и размера зон энергоподвода. В настоящей работе численно решается вопрос о нахождении диапазонов допустимых параметров инициирования детонации и максимального значения чис-

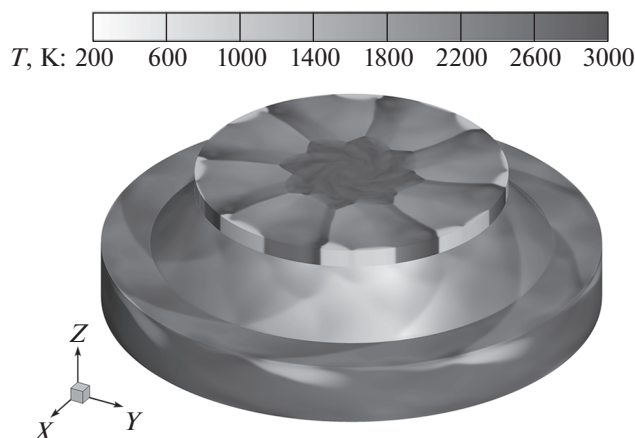


Рис. 2. Поле температуры при распространении 8 вращающихся волн детонации.

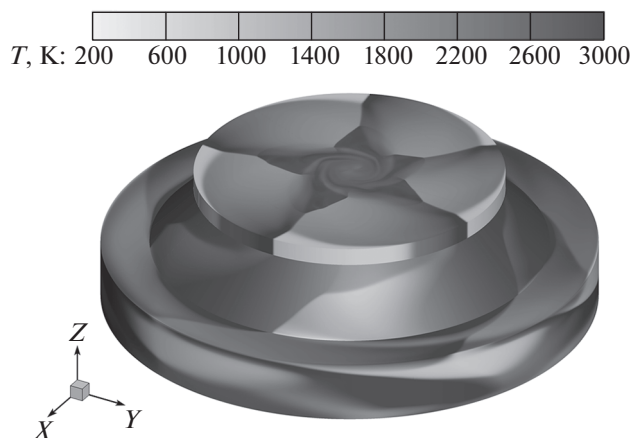


Рис. 3. Поле температуры при распространении 5 вращающихся волн детонации.

ла волн M при заданных размерах камеры сгорания.

Численное исследование проводится модифицированным методом С.К. Годунова [8] 1-го порядка точности по пространству и времени, который реализован в оригинальном программном комплексе, предназначенном для решения широкого круга задач, связанных с многомерной детонацией. Расчеты проводились на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов» с использованием 176 процессорных ядер на сетке, состоящей из 300 млн ячеек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты для $D_1 = 7.52$ см, $D_2 = 6.64$ см, $L = 1.5$ см, $h = 0.44$ см показали, что максимальное число волн, которые могут сформироваться в этом случае, равно 4. При $M > 4$ происходит затухание вызванных инициаторами волн детонации. Согласно расчетам, это связано с тем, что при большом числе волн детонации, возникающих непосредственно в результате энергоподвода, из-за высоких давлений за их фронтами горючая смесь не поступает в зазор.

При больших размерах камеры сгорания максимальное значение M может возрасти. Расчеты, проведенные для $D_1 = 18.12$ см, $D_2 = 16$ см, $L = 3.61$ см, $h = 1.06$ см, показали, что максимальное число волн детонации равно 8. Длительные расчеты, проведенные для $M = 8$, позволили убедиться в формировании устойчивого вращения 8 волн детонации (рис. 2). При $M > 8$ взаимодействие соседних детонационных волн приводит к затуханию одной или нескольких волн и уменьшению числа вращающихся волн.

Дополнительно изучался вопрос об изменении относительного расположения волн детонации.

Отметим, что оно может быть задано изначально путем соответствующего размещения инициаторов детонации. При несимметричном размещении возникает вопрос о конечной устойчивой конфигурации волн при стационарном вращении. Так, согласно расчетам, при числе инициаторов $M = 8$ возникало течение с 8 стационарными волнами детонации, располагающимися под углами 45° , равными изначально.

Случай $M = 5$ соответствует варианту отсутствия 3 инициаторов из 8. Исключаемые инициаторы располагались под углами 90° , 90° и 180° друг к другу. Расчеты показали, что с течением времени взаимные углы, образуемые соседними волнами детонации, изменяются от изначальных значений 90° , 90° , 90° , 45° , 45° до 5 равных значений 72° , что также свидетельствует об устойчивости течения с симметричным вращением 5 волн детонации (рис. 3).

Случай $M = 7$ соответствует варианту отсутствия 1 инициатора из 8. Расчеты показали, что из-за большой плотности инициаторов в камере сгорания выбранных размеров и из-за несимметричного инициирования эволюция структуры течения приводит к затуханию 1 волны из 7. Это означает, что для инициирования 7 волн детонации в данной камере инициаторы необходимо размещать более симметрично. Длительный расчет течения показал, что оставшиеся 6 волн детонации долго сохраняют несимметричное расположение с взаимными углами около 90° , 90° , 45° , 45° , 45° (рис. 4а). Однако в конечном итоге структура волн изменилась и углы между соседними волнами детонации составили 60° (рис. 4б).

Расчет в случае $M = 6$ с отсутствием 2 инициаторов из 8, располагающихся под углом 90° друг к другу, показал аналогичную эволюцию ударно-волновой структуры течения. Длительный расчет

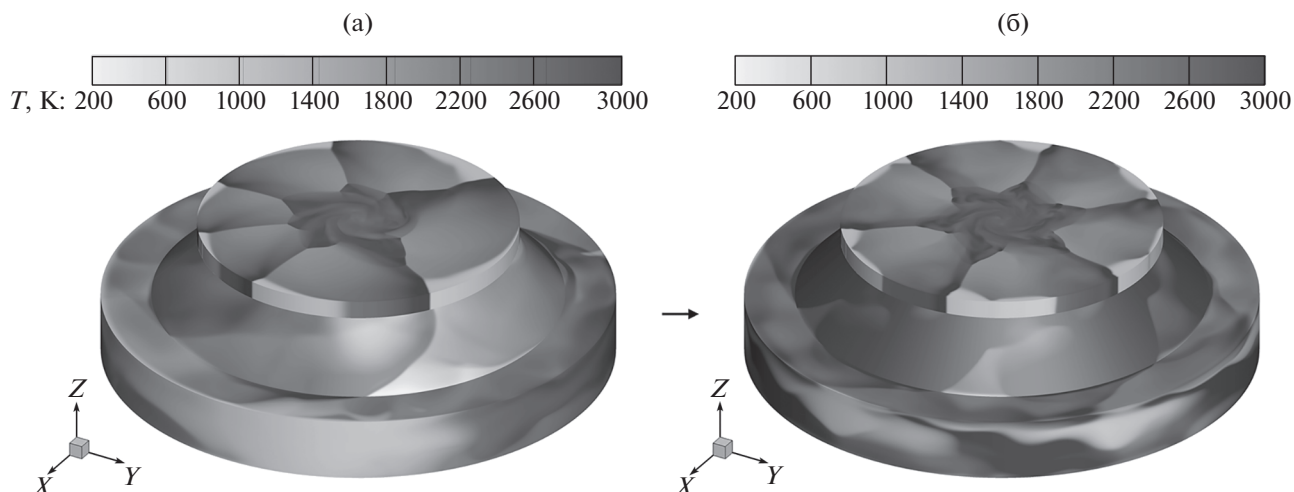


Рис. 4. Поле температуры при несимметричном (а) и стационарном симметричном (б) расположении 6 вращающихся волн детонации.

течения приводит к 6 равным значениям угла 60° между соседними волнами детонации. Следует отметить, что упоминаемые углы между волнами не достигают постоянного значения, а испытывают малые колебания около “стационарного” значения из-за нестационарной природы детонации.

Согласно расчетам, при $M = 2, 3, 4$ и несимметричном инициировании в конечном счете формируется многоголовая вращающаяся детонация с равными углами между составляющими ее волнами. Так, расчет течения при $M = 3$ и для углов между инициаторами $180^\circ, 90^\circ, 90^\circ$ показал, что углы между волнами детонации с течением времени приближаются к 120° .

Во всех рассмотренных случаях многоголовой детонации вблизи оси симметрии устройства формируется сложная структура течения с взаимодействием множества ударных волн, вращающихся в области, занятой продуктами детонации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численно исследованы течения в камере сгорания в форме кольцевого зазора между пластинами с вращающейся многоголовой волной детонации пропановоздушной смеси, поступающей в камеру в направлении оси симметрии из резервуара с заданными параметрами торможения. Определены условия формирования заданного числа волн в многоголовой волне детонации, связанные с размерами камеры сгорания и параметрами инициаторов. Получены значения максимального числа волн при заданных размерах камеры сгорания. Установлено, что существование максимального критического значения числа волн в многоголовой детонации связано с блокировкой подачи горючей смеси. Получено, что при

неравномерном расположении инициаторов постепенно происходит выравнивание взаимных углов между волнами, составляющими многоголовую детонацию.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова [9] при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2020-806).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войцеховский Б.В.* Спиновая стационарная детонация // ПМТФ. 1960. № 3. С. 157–164.
2. *Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.* Формирование спиновой детонации в каналах круглого сечения // ДАН. 2015. Т. 460. № 6. С. 656–659. <https://doi.org/10.7868/S0869565215060109>
3. *Чванов В.К., Левин В.А., Левочкин П.С., Мануйлович И.С., Марков В.В., Стернин Л.Е.* Трехмерный расчет газодинамических параметров продуктов сгорания в кольцевой камере ЖРД с вращающейся детонацией // Труды НПО “Энергия” им. Академика В.П. Глушко. 2015. Т. 32. С. 23–35.
4. *Левин В.А., Афонина Н.Е., Громов В.Г., Мануйлович И.С., Хмелевский А.Н., Марков В.В.* Исследование спектрального состава пульсаций тяги и давления газа в соплах с дефлектором // МЖГ. 2019. № 3. С. 123–137. <https://doi.org/10.1134/S0568528119030010>
5. *Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др.* Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. Т. 1. Кн. 2. М.: Наука. 1978. 327 с.

6. Westbrook C.K., Dryer F.L. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.* 1984. V. 10. P. 1–57.
7. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Исследование вращающихся волн детонации в кольцевом зазоре // Труды МИАН. 2020. Т. 310. С. 199–216. <https://doi.org/10.4213/tm4098>
8. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
9. Воеводин Вл., Жуматий С., Соболев С., Антонов А., Брызгалов П., Никитенко Д., Стефанов К., Воеводин Вад. Практика суперкомпьютера “Ломоносов” // Открытые системы. СУБД. 2012. № 7. С. 36–39.

MULTI-HEADED ROTATING DETONATION IN ANNULAR GAP

Academician of the RAS V. A. Levin^{a,b}, I. S. Manuylovich^a, and V. V. Markov^{a,c}

^a *Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics, Moscow, Russian Federation*

^b *Institute of Automation and Control Processes of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

^c *Steklov Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

The flows in the combustion chamber in the form of an annular gap between the plates with multi-headed rotating detonation of the propane-air mixture entering the chamber in the direction of the symmetry axis from the reservoir with the specified braking parameters are studied numerically. The conditions for the formation of a given number of waves in a multi-headed detonation wave are determined, which are associated with the dimensions of the combustion chamber and the parameters of the initiators. The values of the maximum number of waves for the given dimensions of the combustion chamber are obtained. It was found that the existence of the maximum critical value of the number of waves in a multi-headed detonation is associated with blocking the supply of a combustible mixture. It was found that with an uneven arrangement of initiators, the mutual angles between the waves that make up the multi-headed detonation are gradually aligned. For the calculations carried out on the Lomonosov supercomputer of the Moscow State University, an original computer complex was used, based on the modified S.K. Godunov method and one-stage reaction kinetics.

Keywords: rotating detonation, propane-air mixture, annular gap