

УДК 533.27:534.222.2

ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОГОЛОВОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ

В. А. Левин^{1,2}, И. С. Мануйлович¹, В. В. Марков^{1,3}¹НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, 119192 Москва,
levin@imec.msu.ru, ivan.manuylovich@gmail.com²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 690041 Владивосток³Математический институт им. В. А. Стеклова РАН, 119991 Москва, markov@mi-ras.ru

Численно исследовано течение в камере сгорания в форме кольцевого зазора между пластинами с многоголовой вращающейся детонацией. Предполагается, что однородная пропановоздушная смесь с заданными параметрами торможения поступает в камеру сгорания через элементарные сопла, равномерно заполняющие внешнее ограничивающее ее кольцо. Газодинамические параметры смеси определяются как функции параметров торможения и статического давления в зазоре. Получены условия формирования заданного числа волн в многоголовой волне детонации, связанные с размерами камеры сгорания и параметрами инициаторов. Установлено максимальное число волн при заданных размерах камеры сгорания. Существование максимального критического числа волн в многоголовой детонации связано с блокировкой подачи горючей смеси. При рассмотренных геометрических параметрах области течения наблюдалось формирование от одной до восьми вращающихся детонационных волн. 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 Годунова и одностадийная кинетика реакций.

Ключевые слова: многоголовая вращающаяся детонация, кольцевой зазор, одностадийная кинетика, численный метод, программный комплекс, суперкомпьютер.

DOI 10.15372/FGV20220510

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент и теория позволяют однозначно утверждать, что неотъемлемым атрибутом как реальной газовой детонации, так и ее теоретических моделей является формирование детерминированных периодических структур [1–3], что связано с неустойчивостью процесса. Согласно расчетам одномерных течений самоподдерживающаяся волна всегда нестационарная, а скорость головного скачка и газодинамические параметры на его фронте совершают мощные периодические колебания [4–7]. Самоподдерживающийся процесс распространения одномерной детонации связан с периодическим формированием продольной волны детонации в

зоне индукции, и он реализуется при взрывном инициировании детонации, если энергия взрыва выше определенного критического значения [8–11]. Ударное инициирование может произойти в результате кумуляции потока или при взаимодействии горючей смеси с поверхностями за счет кинетической энергии относительного движения [12–19]. В случае двумерных течений продольные волны за головным ударным фронтом сменяются поперечными, которые двигаются вдоль него, дожигают горючую смесь и, периодически сталкиваясь друг с другом, создают, как и в одномерном случае, зоны высокого давления, которые как микровзрывы инициируют расходящиеся волны детонации. Поперечные волны вместе с головным скачком образуют тройные конфигурации и изломы на его фронте. Траектории тройных точек в реальных экспериментах оставляют следы на закопченных пластинах, которые образуют ромбовидные ячейки, а в вычислительном эксперименте их траектории совпадают с линиями, проведенными через точки максимальных значений давления, полученные в процессе расче-

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ и Математического института им. В. А. Стеклова РАН с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М. В. Ломоносова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020).

© Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В., 2022.

та [20]. Согласно расчетам трехмерных течений с волнами детонации, спонтанно формирующаяся в канале ячеистая структура хаотична и приобретает регулярный характер в канале, ширина которого в одном направлении достаточно мала. Суперкомпьютерные системы позволили детально исследовать многомерные течения и, в частности, обнаружить неизвестную ранее галолирующую слоистую детонацию [16], а также изучить процесс спонтанного формирования и устойчивости трехмерной спиновой детонации [21, 22]. В плане приложений большой интерес представляет вращающаяся детонация [23]. Авторами ранее была исследована односторонняя вращающаяся детонация в цилиндрическом и кольцевом зазорах [24, 25] и начато изучение детонации в кольцевом зазоре с несколькими одновременно вращающимися волнами [26], которую далее будем называть многоголовой.

Настоящая статья продолжает работы [25, 26] и посвящена исследованию в трехмерной нестационарной постановке процесса формирования многоголовой волны детонации пропановоздушной смеси в кольцевом зазоре. В данной статье изучаются вопросы устойчивости и анализируются возникающие ударно-волновые структуры.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Для теоретического исследования многомерных быстротекающих процессов в химически активной смеси, связанных с прямым (ударным) инициированием волн детонации в ограниченных в пространстве объемах относительно небольших размеров, уместно использовать систему нестационарных уравнений Эйлера для идеальной многокомпонентной реагирующей смеси, которая в неподвижной декартовой системе координат в дивергентной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_i u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_i v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho_i w)}{\partial z} &= \omega_i, \\ \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial (p + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho uw)}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial (p + \rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho vw)}{\partial z} &= 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial (p + \rho w^2)}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial (H - p)}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} + \frac{\partial (Hw)}{\partial z} &= 0, \\ H = \sum_{i=1}^N \rho_i h_i + \rho \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}, \quad \rho = \sum_{i=1}^N \rho_i. \end{aligned}$$

Здесь p , ρ — давление и плотность смеси; u , v , w — компоненты скорости вдоль осей X , Y , Z соответственно; N — число компонентов смеси; ρ_i , h_i — плотность и энтальпия i -го компонента; ω_i — скорость изменения ρ_i при химических реакциях; H — полная энтальпия.

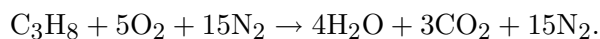
Калорические и термические уравнения состояния смеси имеют вид:

$$\begin{aligned} h_i &= c_{0i} + c_{pi} T, \quad i = 1, \dots, N, \\ p &= \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{\mu_i} R_0 T, \end{aligned}$$

где T — температура смеси; μ_i — молярная масса i -го компонента; R_0 — универсальная газовая постоянная; c_{0i} , c_{pi} — постоянные коэффициенты, полученные аппроксимацией табличных значений [27].

Для описания химических реакций в горючей смеси углеводорода с воздухом используется одностадийная кинетика [28] с одной необратимой реакцией, которая, несмотря на простоту, как показала практика ее использования в исследованиях широкого круга задач о волнах детонации, качественно и количественно позволяет адекватно воспроизвести наблюдаемые в экспериментах явления.

В настоящей статье представлены результаты исследования детонации пропановоздушной смеси, для которой предполагается, что реакция протекает в соответствии со стехиометрическим уравнением



В этом случае компонентов смеси $N = 5$, а скорость реакции определяет все ω_i в представленной выше системе уравнений согласно равенствам

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{\text{C}_3\text{H}_8}}{\mu_{\text{C}_3\text{H}_8}} &= \frac{\omega_{\text{O}_2}}{5\mu_{\text{O}_2}} = -\frac{\omega_{\text{H}_2\text{O}}}{4\mu_{\text{H}_2\text{O}}} = -\frac{\omega_{\text{CO}_2}}{3\mu_{\text{CO}_2}} = \\ &= AT^\beta \exp\left(-\frac{E}{R_0 T}\right) \left(\frac{\rho_{\text{C}_3\text{H}_8}}{\mu_{\text{C}_3\text{H}_8}}\right)^a \left(\frac{\rho_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2}}\right)^b, \end{aligned}$$

$$\omega_{\text{N}_2} = 0,$$

где индекс i заменен символами компонентов

смеси, а A , E , a , b , β — постоянные, определяющие скорость реакции.

Воздух считается смесью кислорода с азотом в молярном соотношении $\nu_{O_2} : \nu_{N_2} = 1 : 3$, соответствующем большему содержанию кислорода, чем в стандартной атмосфере. Пропановоздушная смесь задается соотношением $\nu_{C_3H_8} : \nu_{O_2} : \nu_{N_2} = 1 : 5 : 15$ со стехиометрическими долями пропана и кислорода.

На стенках выставляется условие непротекания.

Исследование проводится модифицированным методом Годунова [29], который реализован в оригинальном программном комплексе с графическим интерфейсом с функциями визуализации. Вычислительный алгоритм распараллелен на основе MPI и позволяет проводить расчеты задач с количеством ячеек в несколько миллиардов. В данной работе расчеты выполнены на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов» [30] с использованием 176 процессорных ядер на сетке, состоящей из 300 млн ячеек.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ

Разработанный программный комплекс был использован для детального исследования трехмерной вращающейся детонации в кольцевом зазоре между параллельными диском и кольцом. Ниже исследуется течение с числом волн детонации $1 \div 8$. Изучаются вопросы инициирования заданного количества вращающихся волн детонации, связанные с размерами камеры сгорания, анализируется устойчивость возникающих ударно-волновых структур.

Как и в [25, 26], рассматривалось осесимметричное устройство, схема которого с вырезанной четвертью представлена на рис. 1. Здесь 1 — плоский диск заданного диаметра D_1 , 2 — параллельное диску плоское кольцо заданного внутреннего диаметра 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.

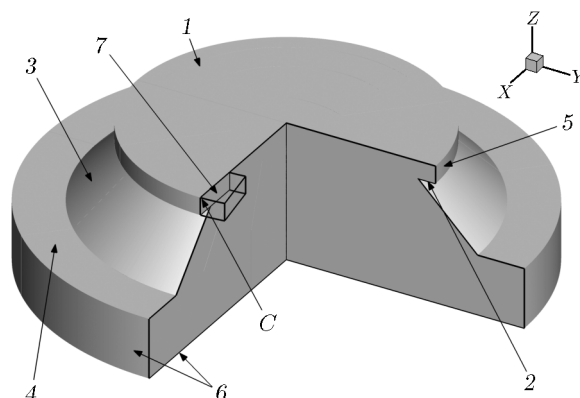


Рис. 1. Схема устройства с вырезанной четвертью

На границах расчетной области, соответствующих непроницаемым поверхностям (1–4 на рис. 1), принимается условие равенства нулю нормальной компоненты скорости газа, а на открытых границах 6 параметры потока определяются из решения задачи о распаде произвольного разрыва при истечении продуктов детонации в покоящийся во внешнем пространстве газ с давлением $p_0 = 1$ атм и температурой $T_0 = 300$ К.

Предполагается, что в зазор через кольцо 5 поступает однородная смесь с заданным давлением торможения $p_s = 40$ атм и температурой торможения $T_s = 300$ К, а в каждой точке кольца скорость смеси и термодинамические параметры определяются согласно одномерной теории сопла Лаваля 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 инициирования 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 [25]. Формирование такой детонации при прочих равных условиях, таких как параметры 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 числа волн M при заданных размерах камеры сгорания.

Предполагается, что во всей расчетной области находится воздух с заданными давлением и температурой, и в начальный момент времени в зазор по всей поверхности кольца 5 начинает поступать горючая смесь из резервуара, в котором давление существенно выше, чем в зазоре. Через небольшой промежуток времени, когда заканчивается формирование сходящегося потока горючей смеси, происходит инициирование детонации мгновенным однородным подводом энергии в зону (инициатор) в форме части цилиндрического кольца (7 на рис. 1), высота которого равна ширине зазора, а ширина — заданная величина l_1 . Одна из прямоугольных сторон инициатора предполагается непроницаемой в течение определенного промежутка времени, по истечении которого она убирается (временная стенка), чтобы не препятствовать вращению детонационной волны. Стенка необходима для кратковременного разделения горячих продуктов детонации с одной ее стороны и холодной горючей смеси — с другой. При этом в результате энергоподвода детонация начинает распространяться от стенки в определенную сторону вдоль кольца 5. Исчезновение стенки можно трактовать как ее выгорание под воздействием высокой температуры продуктов детонации. Была проведена серия расчетов и получены подходящие значения геометрических, временных параметров инициатора и энергии инициирования E .

Выше описан инициатор, в результате действия которого формируется одна вращающаяся детонационная волна. Аналогичным образом можно инициировать несколько детонационных волн, вращающихся в одну и ту же сторону, используя несколько стенок с примыкающими зонами энергоподвода, расположенными с определенной стороны. В продолжение работы [26] в данной работе приведены результаты расчетов с тремя инициаторами, а также с $5 \div 8$ инициаторами для камеры сгорания большего размера.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ С ТРЕМЯ ВОЛНАМИ

Серийные расчеты начальных стадий подготовки потока и инициирования детонации

позволили определить параметры инициатора детонации, приводящего к формированию непрерывно вращающейся детонационной волны, и проследить динамику процесса [25]. Инициирование трех волн вращающейся детонации происходит в один и тот же момент времени аналогично инициированию одной волны. Для этого достаточно разместить в камере сгорания несколько инициаторов в виде временных твердых стенок и зон мгновенного энергоподвода с одной из сторон от стенки. Направление инициирования, определяемое стороной стенки, вблизи которой осуществляется энергоподвод, должно быть одинаковым, иначе две волны, двигающиеся навстречу друг другу, при столкновении затухнут из-за отсутствия вблизи горючей смеси. Инициирование трех вращающихся волн детонации осуществлялось в камере сгорания с $D_1 = 7.52$ см, $D_2 = 6.64$ см, $L = 1.5$ см, $h = 0.44$ см, у которой площадь входного сечения равна $S = 10.39$ см². Стенки располагались под взаимными углами 90° , 90° и 180° , чтобы проверить, произойдет ли перестройка течения и выровняются ли углы между детонационными волнами. При инициировании нескольких волн детонации ограничения на параметры инициатора становятся более жесткими. Так, например, максимальное время существования твердой стенки уменьшается, поскольку детонационная волна, распространяясь от одной твердой стенки, не должна столкнуться со следующей стенкой.

Рис. 2 демонстрирует рассчитанную динамику поля температуры при распространении трех волн вращающейся детонации. Видно, что со временем картина течения становится симметричной и углы между волнами становятся равными 120° . Картина линий тока во вращающейся системе координат показана на рис. 3.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ С ЧИСЛОМ ВОЛН $5 \div 8$

Расчеты для камеры сгорания размеров $D_1 = 7.52$ 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. Это связано с тем, что при большом числе волн детонации, возникающих непосредственно в результате энергоподвода, из-за высокого давления за их фронтами горючая смесь не поступает в зазор.

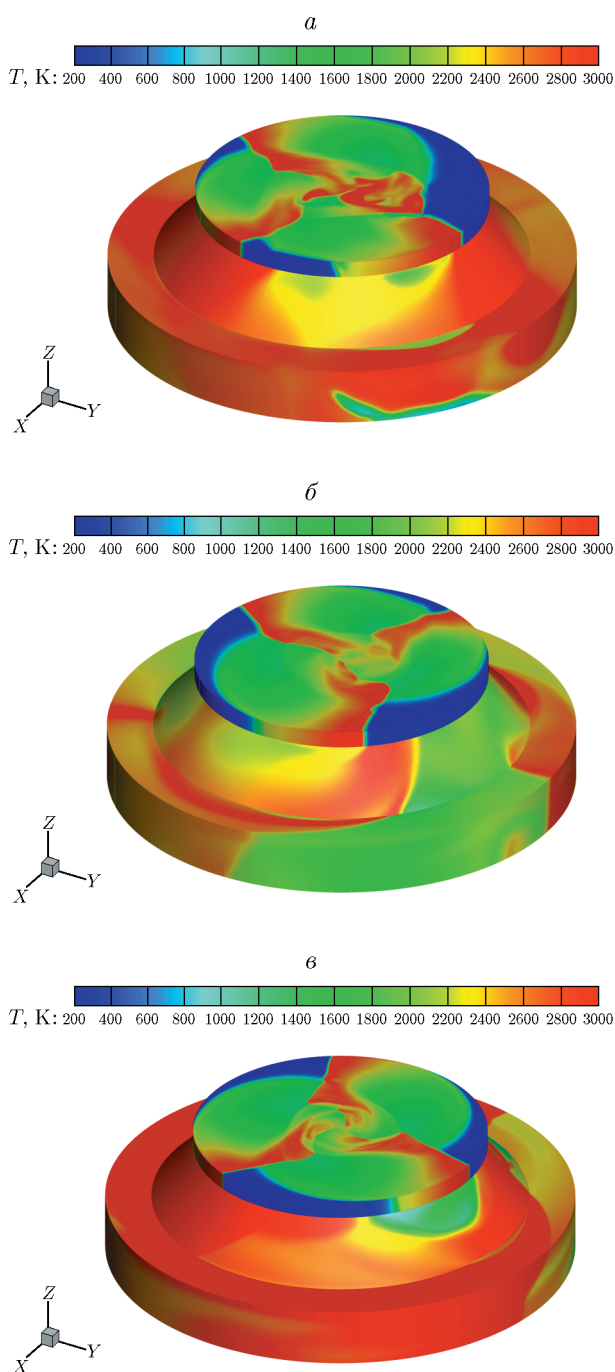


Рис. 2. Поле температуры при вращении трех детонационных волн в моменты времени $t = 53.8$ мкс (а) и $t = 160.7$ мкс (б), а также при стационарном вращении (в)

При бóльших размерах камеры сгорания максимальное значение числа волн M может возрасти. Для камеры размеров $D_1 = 18.12$ см, $D_2 = 16$ см, $L = 3.61$ см, $h = 1.06$ см ($S = 60.34$ см²) максимальное рассчитанное число

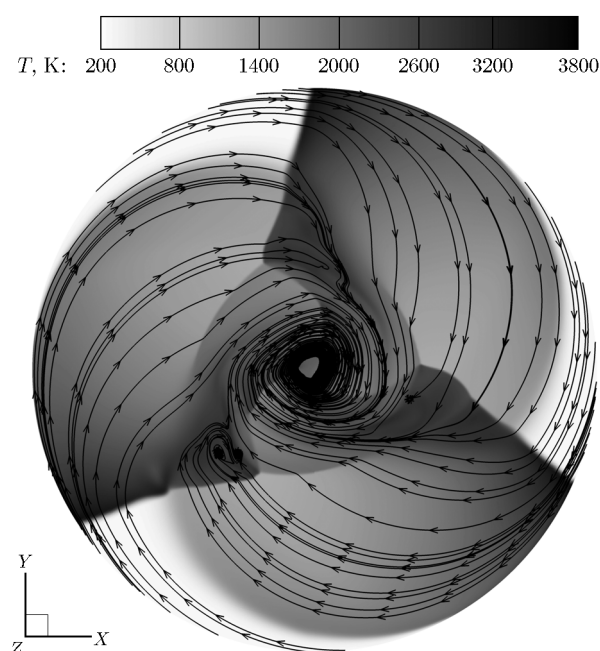


Рис. 3. Поле температуры с линиями тока при стационарном вращении трех детонационных волн:

линии тока построены в системе координат, вращающейся вместе с волнами детонации

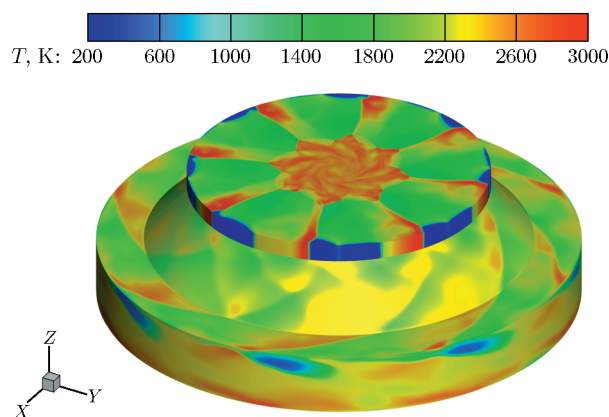


Рис. 4. Поле температуры при распространении восьми вращающихся волн детонации

волн детонации равно 8. Длительные расчеты, проведенные для $M = 8$, позволили убедиться в формировании устойчивого вращения восьми волн детонации (рис. 4). 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, которое может быть задано изначально

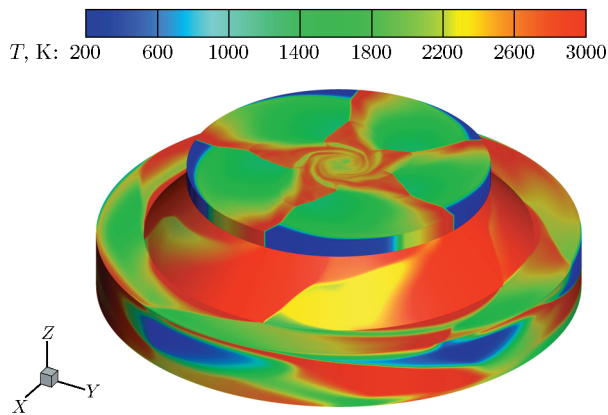


Рис. 5. Поле температуры при распространении пяти вращающихся волн детонации

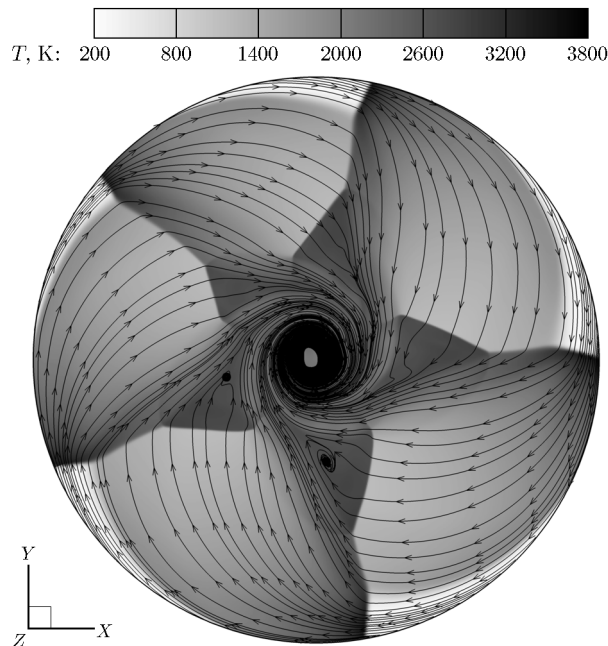


Рис. 6. Поле температуры с линиями тока при пяти волнах детонации

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 восемью стационарными волнами детонации, располагающимися под углами 45° , равными изначальным.

В случае $M = 5$ из восьми инициаторов исключены три инициатора, располагавшиеся под углами 90° , 90° и 180° друг к другу. Расчеты показали, что с течением времени взаим-

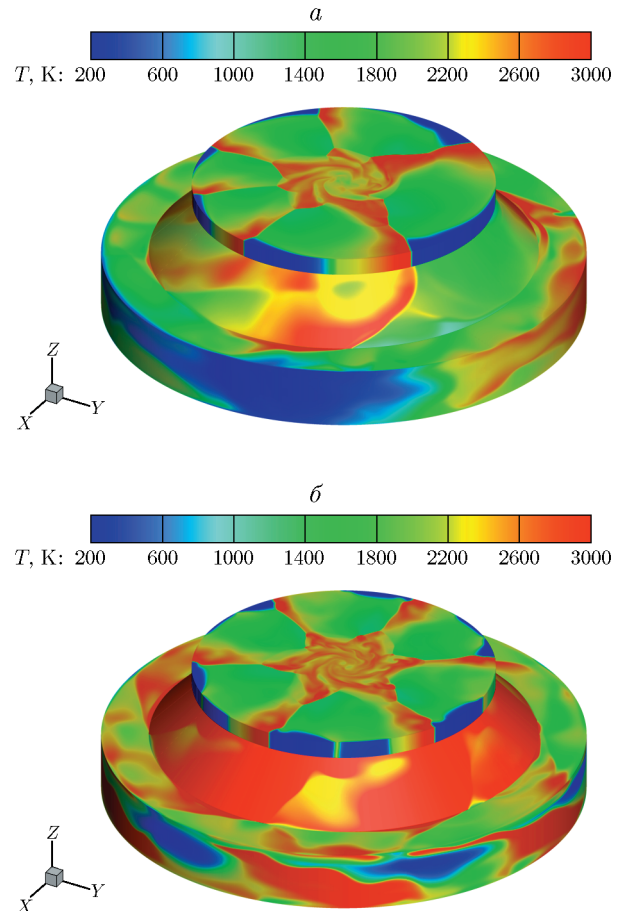


Рис. 7. Поле температуры при несимметричном (а) и стационарном симметричном (б) расположении шести вращающихся волн детонации

ные углы, образуемые соседними волнами детонации, изменяются от начальных значений 90° , 90° , 90° , 45° , 45° до пяти равных значений 72° , что также свидетельствует об устойчивости течения с симметричным вращением пяти волн детонации (рис. 5). На рис. 6 приведена картина линий тока в системе координат, вращающейся вместе с волнами детонации.

В случае $M = 7$ отсутствует один инициатор из восьми. Из-за большой плотности инициаторов в камере сгорания выбранных размеров и из-за несимметричного инициирования эволюция структуры течения приводит к затуханию одной волны из семи. Это означает, что для иницирования семи волн детонации в данной камере инициаторы необходимо размещать более симметрично. Длительный расчет течения показал, что оставшиеся шесть волн детонации долго сохраняют несимметричное распо-

ложение с взаимными углами около 90° , 90° , 45° , 45° , 45° , 45° (рис. 7,а). Однако в конечном итоге структура волн изменилась и углы между соседними волнами детонации составили 60° (рис. 7,б).

Расчет в случае $M = 6$ с отсутствием двух инициаторов, располагавшихся под углом 90° друг к другу, показал аналогичную эволюцию ударно-волновой структуры течения. Длительный расчет течения приводит к шести 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.

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.

ВЫВОДЫ

Решена трехмерная задача об инициировании многоголовой вращающейся детонации в осесимметричной камере сгорания в форме кольцевого зазора между пластинами, в которую через внешнее цилиндрическое кольцо в направлении к оси симметрии с заданными параметрами торможения поступает однородная пропановоздушная смесь. Предложена модель взрывного инициирования заданного числа волн и заданного направления их вращения. Система подачи смеси реализована с учетом соотношения давления в резервуаре и статического давления на входе в камеру сгорания. Определены условия формирования заданного числа волн (от трех до восьми) в многоголовой волне детонации, связанные с размерами камеры сгорания и параметрами инициаторов. Получены и проанализированы нестационарные ударно-волновые структуры, возникающие в процессе формирования многоголовой стационарной вращающейся детонации. Установлено, что существование максимального критического числа волн в многоголовой детонации связано с блокировкой подачи горючей смеси. Показано, что при неравномерном расположении инициаторов постепенно происходит выравнивание взаимных углов между волнами, составляющими многоголовую детонацию.

Исследование проводилось в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме Годунова, в оригинальном программном комплексе, разработанном для проведения многопараметрических расчетов и визуализации течений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korobeinikov V. P., Levin V. A., Markov V. V., Chernyi G. G. Propagation of blast waves in a combustible gas // *Acta Astronaut.* — 1972. — V. 17, N 4. — P. 529–537.
2. Митрофанов В. В., Солоухин Р. И. О дифракции многофронтной детонационной волны // *Докл. АН СССР.* — 1964. — Т. 159, № 5. — С. 1003–1006.
3. Солоухин Р. И. Структура многофронтной детонационной волны в газе // *Физика горения и взрыва.* — 1965. — Т. 1, № 2. — С. 35–42.
4. Korobeinikov V. P., Markov V. V. On the propagation of combustion and detonation // *Arch. Procesów Spalania.* — 1977. — V. 8, N 1. — P. 101–118.
5. Левин В. А., Марков В. В. Возникновение детонации при концентрированном подводе энергии // *Физика горения и взрыва.* — 1975. — Т. 11, № 4. — С. 623–633.
6. Левин В. А., Марков В. В., Осинкин С. Ф. Прямое инициирование детонации в смеси водорода с кислородом, разбавленной азотом // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* — 1992. — № 6. — С. 151–156.
7. Седов Л. И., Коробейников В. П., Марков В. В. Теория распространения взрывных волн // *Тр. МИАН.* — 1986. — Т. 175. — С. 178–216.
8. Левин В. А., Марков В. В., Осинкин С. Ф. Моделирование инициирования детонации в горючей смеси газов электрическим разрядом // *Хим. физика.* — 1984. — Т. 3, № 4. — С. 611–614.
9. Левин В. А., Марков В. В., Осинкин С. Ф. Инициирование детонации в водородовоздушной смеси взрывом сферического заряда ТНТ // *Физика горения и взрыва.* — 1995. — Т. 31, № 2. — С. 91–95.
10. Левин В. А., Марков В. В., Осинкин С. Ф. Восстановление детонации с помощью разрушающейся оболочки // *Докл. АН.* — 1997. — Т. 352, № 1. — С. 48–50.
11. Левин В. А., Марков В. В., Осинкин С. Ф. Влияние воздушной прослойки на инициирование взрывом детонации в водородовоздушной смеси // *Тр. МИАН.* — 1998. — Т. 223. — С. 136–143.

12. Левин В. А., Марков В. В., Осинкин С. Ф., Журавская Т. А. Определение критических условий инициирования детонации в ограниченном объеме сходящейся к центру ударной волной // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 6. — С. 96–102.
13. Левин В. А., Марков В. В., Журавская Т. А. Прямое инициирование детонации в водородовоздушной смеси сходящейся ударной волной // Хим. физика. — 2001. — Т. 20, № 5. — С. 26–30.
14. Журавская Т. А., Левин В. А., Марков В. В., Осинкин С. Ф. Влияние разрушающейся оболочки на формирование детонации в ограниченном объеме сходящейся ударной волной // Хим. физика. — 2003. — Т. 22, № 8. — С. 34–37.
15. Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Новые эффекты слоистой газовой детонации // Докл. АН. — 2010. — Т. 430, № 2. — С. 185–188.
16. Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Особенности галопирующей детонации в сверхзвуковом потоке горючей смеси под слоем инертного газа // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. — 2010. — № 5. — С. 167–175.
17. Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Формирование детонации во вращающихся каналах // Докл. АН. — 2010. — Т. 432, № 6. — С. 775–778.
18. Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Иницирование детонации при вращении эллиптического цилиндра внутри кругового цилиндра и деформировании стенок канала // ПМТФ. — 2010. — Т. 51, № 4. — С. 17–25.
19. Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Математическое моделирование ударно-волновых процессов при взаимодействии газов с твердыми границами // Тр. МИАН. — 2013. — Т. 281. — С. 42–54.
20. Марков В. В. Численное моделирование образования многофронтной структуры детонационной волны // Докл. АН СССР. — 1981. — Т. 258, № 2. — С. 314–317.
21. Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Формирование спиновой детонации в каналах круглого сечения // Докл. АН. — 2015. — Т. 460, № 6. — С. 656–659.
22. Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Численное моделирование спиновой детонации в каналах круглого сечения // Журн. вычисл. математики и мат. физики. — 2016. — Т. 56, № 6. — С. 1122–1137.
23. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Современное состояние исследований непрерывной детонации топливовоздушных смесей (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 31–46.
24. Чванов В. К., Левин В. А., Лёвочкин П. С., Мануйлович И. С., Марков В. В., Стернин Л. Е. Трёхмерный расчёт газодинамических параметров продуктов сгорания в кольцевой камере ЖРД с вращающейся детонацией // Тр. НПО «Энергия» им. акад. В. П. Глушко. — 2015. — Т. 32. — С. 23–35.
25. Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Вращающаяся волна детонации в кольцевом зазоре // Тр. МИАН. — 2018. — Т. 300, № 1. — С. 135–145.
26. Levin V. A., Manuylovich I. S., Markov V. V. Rotating detonation waves in annular gap with variable stagnation pressure // Shock Waves. — 2021. — V. 31. — P. 651–663. — DOI: 10.1007/s00193-020-00988-3.
27. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / под ред. В. П. Глушко. — М.: Наука, 1978. — Т. I, кн. 2.
28. Westbrook C. K., Dryer F. L. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion // Prog. Energy Combust. Sci. — 1984. — V. 10, N 1. — P. 1–57. — DOI: 10.1016/0360-1285(84)90118-7.
29. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.
30. 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.

Поступила в редакцию 01.02.2022.

После доработки 17.02.2022.

Принята к публикации 28.02.2022.