

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНО ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ВОДОРОДО-КИСЛОРОДНЫХ СМЕСЯХ \*

С. А. ЖДАН

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева*  
e-mail: zhdan@hydro.nsc.ru Проспект М.А. Лаврентьева, 15

А.С. СЫРЯМИН

Рассмотрена физическая модель явления вращающейся детонационной волны (ВДВ) и ее особенности, связанные с периодичностью поперечных детонационных волн (ПДВ). Сформулирована двумерная нестационарная математическая модель ВДВ в кольцевых камерах сгорания ракетного типа. Проведено ее численное исследование для водородо-кислородных смесей. Выделены и проанализированы определяющие параметры возникающей периодической задачи. Показано, что период (расстояние между соседними ПДВ) нельзя задавать произвольно, он является собственным числом сформулированной в рамках уравнений Эйлера математической задачи, которое необходимо искать в процессе ее решения.

Сформулированы основные принципы, которым нужно следовать при численном моделировании двигателя с вращающейся детонационной волной (ВДВД). Проведен анализ ряда работ последнего времени о двумерном и трехмерном численном моделировании ВДВД. Установлено, что нарушение хотя бы одного из сформулированных основных принципов приводит к получению ошибочных результатов, которые не могут наблюдаться в реальном физическом процессе ВДВ.

В качестве альтернативы традиционному сжиганию топлив в турбулентном пламени в настоящее время рассматривается способ их детонационного сжигания. Он позволяет интенсивно, более термодинамически выгодно и стабильно производить сжигание различных топлив в камерах небольших габаритов, определяемых характерным размером фронта детонационной волны [1].

Для водородо - кислородных смесей в кольцевых цилиндрических камерах сгорания типа ракетного двигателя при раздельной подаче компонентов через форсунки режимы непрерывной спиновой детонации были получены в [2]. Физико-математическая модель непрерывной вращающейся детонации в двумерной нестационарной газодинамической постановке была сформулирована в [3]. Там же представлены первые результаты расчетов динамики ПДВ для стехиометрической водородо-кислородной смеси в кольцевой цилиндрической камере. Комплексное расчетно-экспериментальное исследование непрерывной спиновой детонации [2] позволило провести сравнение результатов численного моделирования с экспериментом, показавшее идентичность ПДВ по структуре и удовлетворительное соответствие по скорости непрерывной детонации и давлению в камере.

---

\*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-01-00203).

Цель данной работы численно исследовать в двумерной нестационарной постановке задачу о непрерывной детонации в кольцевой камере для нестехиометрических водородо-кислородных смесей. Рассчитать структуру газодинамического течения и собственные значения периодической задачи. Выяснить влияние коэффициента избытка горючего на параметры ПДВ и величины удельного импульса.

Рассмотрим задачу о непрерывном детонационном сжигании нестехиометрических водородо-кислородных смесей ( $2\phi\text{H}_2 + \text{O}_2$ ,  $\phi$  - коэффициент избытка горючего) в камере сгорания ЖРД кольцевой геометрии с расширяющимся соплом (рис. 1а, диаметр  $d_c$ , длина канала постоянного сечения  $L_1$ , длина камеры  $L$ , ширина кольцевого канала на входе  $\Delta$  и на выходе  $\Delta_{exit}$ ). Течение происходит в кольцевом пространстве камеры с границами  $\Gamma_1$  (верхний торец камеры, через форсунки в котором поступает горючая смесь) и  $\Gamma_2$  (открытый конец камеры, через который вытекают продукты сгорания). Поскольку  $\Delta \ll d_c$ , то аналогично [3], можно разрезать по вертикали кольцевую область и развернуть ее в прямоугольную область решения  $\Omega = (0 < x < L, 0 < y < l)$ , которая представлена на рис. 1б.

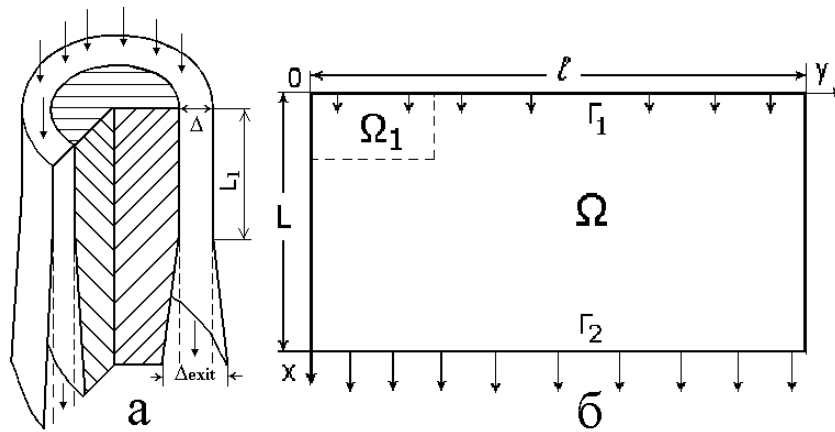


Рис. 1. Схема кольцевой камеры сгорания с расширяющимся соплом (а) и область численного решения задачи (б).

Пусть в некоторый момент времени после начала вдува через границу  $\Gamma_1$  реагирующей смеси в части области решения  $\Omega_1$  выделяется энергия, достаточная для инициирования детонации. В результате инициирования в области  $\Omega$  будет распространяться нестационарная детонационная волна. Требуется определить ее динамику, структуру, а также условия выхода на самоподдерживающийся режим непрерывной детонации в зависимости от определяющих параметров задачи.

Математическая модель непрерывной вращающейся детонации в двумерной нестационарной газодинамической постановке и замыкающие соотношения подробно описаны в [3], поэтому здесь не приводится. Задача для  $2\phi\text{H}_2 + \text{O}_2$  смесей решалась численно по схеме Годунова Колгана.

**Определяющие параметры задачи.** Решение зависит от параметров

$$p_m, T_m, \mu_m, \gamma, S_*/S_0, \phi, \Delta_{exit}/\Delta, L_1, L, l. \quad (1)$$

Здесь первые пять - параметры в системе подачи смеси: давление торможения  $p_m$ , температура торможения  $T_m$ , молекулярная масса  $\mu_m$ , показатель адиабаты  $\gamma$  и отношение площадей критического и выходного сечений  $S_*/S_0$  на тяговой стенке, ко-

торые задают начальный удельный расход смеси  $G_0 = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{0.5(\gamma+1)}{\gamma-1}} \sqrt{\gamma p_m \rho_m} (S_*/S_0)$ , где  $\rho_m = p_m \mu_m / (RT_m)$ . Последние четыре - масштабные факторы: отношение ширины кольцевого канала на выходе к ширине на входе  $\Delta_{exit}/\Delta$ , длина канала постоянного сечения  $L_1$ , общая длина камеры  $L$  вдоль оси  $x$  и период задачи  $l$  вдоль оси  $y$ . Из перечисленных в (1) определяющих параметров – последний параметр период задачи  $l$  является особым. Его нельзя задавать произвольно. В противном случае можно получить целый класс "паразитных" решений, не имеющих отношения к реальному физическому явлению. Период  $l$  является собственным значением сформулированной в рамках уравнений Эйлера математической задачи о непрерывной вращающейся детонационной волне, которое необходимо искать в процессе ее решения.

Непонимание этого основного принципа при численном моделировании непрерывно вращающейся детонации привело авторов работ [4], [5], о чем будет сказано ниже, к получению результатов расчетов, относящихся к "паразитным" периодическим решениям, которые не описывают реальную непрерывно вращающуюся детонацию в камерах сгорания типа ЖРД.

Для определения влияния на параметры и структуру непрерывной детонации отклонения исходного состава водородокислородной смеси от стехиометрии численное исследование выполнено для смесей четырех составов: а) две бедных по горючему -  $H_2 + O_2$  ( $\phi = 0.5$ );  $4/3H_2 + O_2$  ( $\phi = 2/3$ ); б) две богатых по горючему смеси -  $3H_2 + O_2$  ( $\phi = 1.5$ );  $4H_2 + O_2$  ( $\phi = 2$ ). С целью последующего анализа результатов расчетов для нестехиометрических смесей и сопоставления их с результатами численного моделирования для стехиометрии [2],[3] предварительные расчеты проведены для цилиндрической камеры при таких же значениях определяющих параметров, как и в [3]:  $p_m = 10$  атм,  $T_m = 300$  К,  $\gamma = 1.4$ ,  $S_*/S_0 = 0.0657$ ,  $\Delta_{exit}/\Delta = 1$ ,  $L_1 = L = 4$  см.

**Периодическое решение с ПДВ.** Для нахождения периодического решения с ПДВ необходимо задать период задачи  $l$ . Типичные расчетные зависимости безразмерного давления  $P(t) = p(x_1, y_1, t)/p_0$  в фиксированной точке с координатами ( $x_1 = 0.5$  см,  $y_1 = 0$ ) от времени  $t$  (мс), отсчитываемого от момента инициирования ПДВ представлены на рис. 2 для двух нестехиометрических смесей  $\phi = 0.5$  (а) и  $\phi = 2$  (б). Здесь  $p_0 = 1.013 \cdot 10^5$  Па.

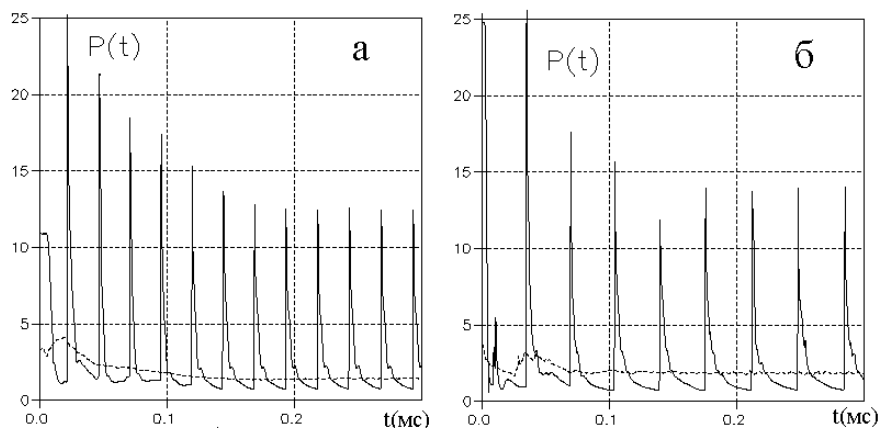


Рис. 2. Зависимости безразмерного давления  $P(t)$  от времени  $t$  (мс) в точке ( $x_1 = 0.5$  см,  $y_1 = 0$ ) для двух смесей: а)  $H_2 + O_2$  при  $l = 5$  см; б)  $4H_2 + O_2$  при  $l = 12$  см.

Видно, что для обоих вариантов давление меняется немонотонно - пульсирует со

временем. Причем на ранней стадии процесса (пять-шесть пульсаций) давление совершает нерегулярные колебания с уменьшающейся амплитудой, а затем переходит на периодические колебания со следующими значениями периода  $\Delta t$ , максимальной  $P_{max} = p_{max}/p_0$  и минимальной  $P_{min} = p_{min}/p_0$  амплитудами и среднюю за период скорость ПДВ  $\langle D \rangle = l/\Delta t$ : а)  $\Delta t = 24.6$  мкс,  $P_{max} \approx 12.5$ ,  $P_{min} \approx 0.75$ ,  $\langle D \rangle = 2.03$  км/с; б)  $\Delta t = 42.7$  мкс,  $P_{max} \approx 13.7$ ,  $P_{min} \approx 0.74$ ,  $\langle D \rangle = 2.81$  км/с. В аналогичных расчетах, выполненных для смесей  $4/3\text{H}_2 + \text{O}_2$  и  $3\text{H}_2 + \text{O}_2$ , также был получен выход на периодический режим с непрерывно вращающейся ПДВ.

**Зависимость  $l_{min}$  от  $\phi$ .** Для того чтобы убедиться, что представленные на рис. 2 периодические решения не относятся к "паразитным" периодическим решениям о непрерывной вращающейся детонации для каждого из пяти исследованных составов  $\text{H}_2 - \text{O}_2$  смеси при фиксированных значениях параметров в системе подачи были найдены собственные значения задачи - минимальный период  $l_{min}(\phi)$ . При фиксированном  $\phi$  уменьшая величину периода  $l$ , численно решалась последовательность периодических задач до тех пор, пока не происходил "срыв" ПДВ и унос фронта горения и продуктов сгорания вниз по потоку (см. [3]), тем самым определялся "минимальный" период задачи  $l_{min}(\phi)$ , величина которого естественно зависит от состава смеси. После нахождения  $l_{min}(\phi)$  определяем допустимую область решений, имеющих физический смысл

$$l_{min}(\phi) < l < 2l_{min}(\phi). \quad (2)$$

Все периодические решения, полученные при  $l > 2l_{min}(\phi)$ , являются "паразитными". Наличие "паразитных" периодических решений связано с тем, что газодинамические уравнения Эйлера не содержат механизма размножения ПДВ, который наблюдается в экспериментах [1],[2] при увеличении диаметра камеры или удельного расхода горючей смеси и обусловлен эффектами вязкости и теплопроводности, имеющими определяющее значение на боковых стенках кольцевой камеры сгорания.

**Зависимость  $l_{min}$  от удельного расхода  $g$ .** В результате проведенных нами для бедной ( $\phi = 0.5$ ), стехиометрической и богатой ( $\phi = 2$ ) смесей систематических расчетов, в которых варьировалась величина давления торможения смеси  $p_m/p_0$  в ресивере, получены количественные данные о минимальном периоде задачи  $l_{min}$ . На рис. 3 представлены расчетные значения минимального периода  $l_{min}$  в зависимости от удельного расхода водородно-кислородной смеси  $g$  (кг/с · м<sup>2</sup>) для стехиометрической (рис. 3а, точки 1) и нестехиометрических (рис. 3б) смесей. На рис. 3а также изображены - допустимая область периодических решений (заштрихована), экспериментальные значения расстояний между соседними ПДВ [2], а также расчетные данные [4], [5].

Видно, что значения минимального периода  $l_{min}$  во-первых, убывают с ростом удельного расхода смеси  $g$ , во-вторых, коррелируют с имеющимися экспериментальными данными [2]. Также очевидно, что все результаты расчетов авторов работ [4] и [5] находятся в области "паразитных" периодических решений и не имеют отношения к реальному режиму непрерывно вращающейся детонации водородно-кислородной смеси.

Итак, при математическом моделировании и численном решении периодической задачи о непрерывной детонации в кольцевой камере сгорания необходимо сначала вычислять собственное значение задачи  $l_{min}$ , которое позволяет отсечь "паразитные" решения. Кроме того, корреляция (см. рис. 3) собственного значения  $l_{min}$  с экспериментом дает основание говорить о правильности используемых нами замыкающих уравнений химической кинетики и достоверности получаемых результатов численного моделирования непрерывно вращающейся детонации.

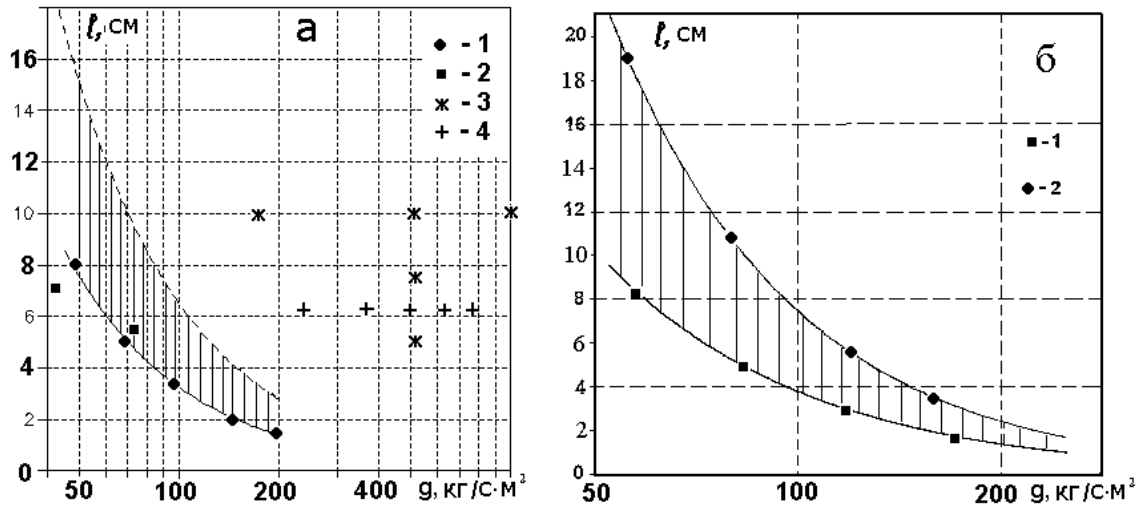


Рис. 3. Зависимости минимального периода задачи  $l_{min}$ , от удельного расхода  $g$  (кг/с · м<sup>2</sup>): а) 2 – эксперимент [2], 3 – [4], 4 – [5]; б) 1 -  $H_2 + O_2$ ; 2 -  $4H_2 + O_2$ .

## Список литературы

- [1] BYKOVSKII F.A., ZHDAN S.A. AND VEDERNIKOV E.F. CONTINUOUS SPIN DETONATIONS // JOURNAL OF PROPULSION AND POWER. 2006. Vol. 22, No. 6. P. 1204–1216.
- [2] БЫКОВСКИЙ Ф.А., ЖДАН С.А., ВЕДЕРНИКОВ Е.Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДОКИСЛОРОДНЫХ СМЕСЕЙ. 1. КАМЕРЫ КОЛЬЦЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ // ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА. 2008. Т. 44, № 2, С. 32-45.
- [3] ЖДАН С.А., БЫКОВСКИЙ Ф.А., ВЕДЕРНИКОВ Е.Ф. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ВОЛНЫ ДЕТОНАЦИИ В ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ // ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА. 2007. Т. 43, № 4, С. 90-101.
- [4] DAVIDENKO D.M., GOKALP I., KUDRYAVTSEV A.N. NUMERICAL STUDY OF THE CONTINUOUS DETONATION WAVE ROCKET ENGINE // AIAA 2008-2680, 2008, pp. 1 - 8.
- [5] SHAO Y.T., LIU M., WANG J.P., FUJIWARA T. NUMERICAL INVESTIGATION OF CONTINUOUS DETONATION ENGINE // PROCEEDINGS INTERN. 22-ND ICDERS, MINSK, BELARUS, 2009, CD ROM, No. 12.