

# Results of Calculations of Detonation Wave Propagation in a Channel with a Hydrogen Gas Mixture

A. V. Panasenko

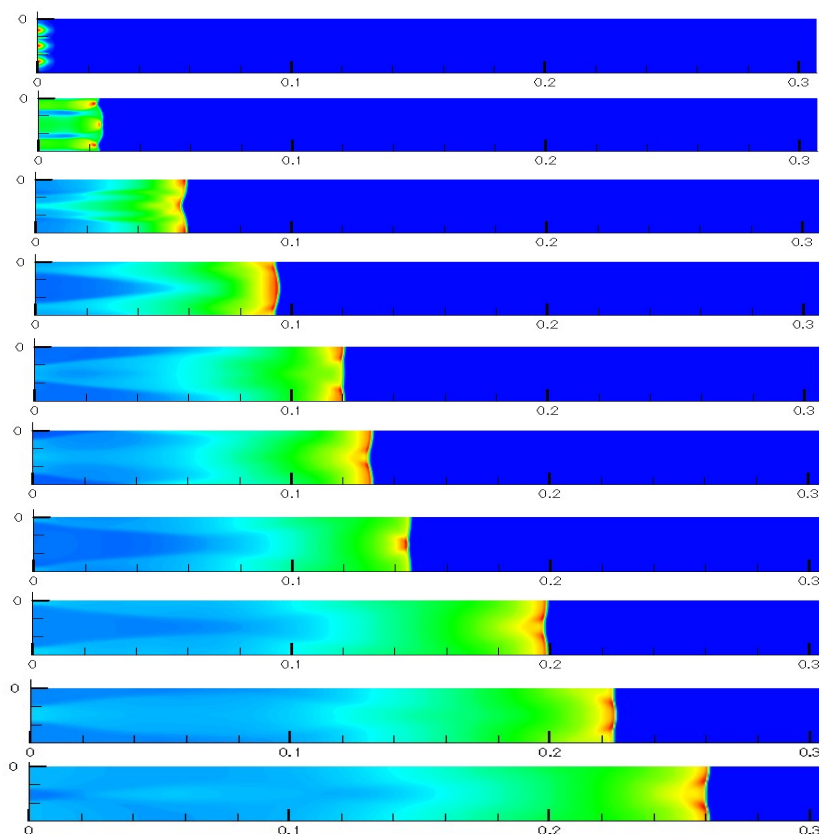
*Ishlinskyi Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),  
Moscow, 119526, Russia*

[akpanas@mail.ru](mailto:akpanas@mail.ru)

## Abstract

The results of calculations of detonation flows in various mixtures of reptiles containing  $H_2$ ,  $O_2$ , Ar are presented. A comparison with published theoretical and experimental results is carried out.

Keywords: aerogasdynamics, detonation shock wave.



The figure shows the development of the detonation process in time in the channel. The red parts in the figures are the areas of movement of the detonation structure shown in the figure. Initially, the resulting shock waves interact with each other and move towards the upper and lower boundaries of the channel. They are reflected from the borders and move towards the centre. After interacting in the centre, they move back to the borders. In the future, the process is repeated. At the same time, the velocities of the leading detonation wave at the level of 1660 m/s were obtained in the calculations. In [12], 1623 m/s was obtained at a Chapman – Jouget velocity of 1619 m/s.

УДК 533.6.011

# Результаты расчетов распространения детонационных волн в канале с водородосодержащей смесью газов

**А. В. Панасенко**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук  
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101-1*

[akpanas@mail.ru](mailto:akpanas@mail.ru)

## Аннотация

Приведены результаты расчетов детонационных течений в различных смесях газов, содержащих  $H_2$ ,  $O_2$ , Ar. Проведено сравнение с опубликованными теоретическими и экспериментальными результатами.

Ключевые слова: аэрогазодинамика, детонационная ударная волна.

## 1. Введение

Изучение явления детонации важно, как для использующих ее технических приложений, так и для предотвращения катастрофических последствий ее эволюции. Исследованию различных аспектов формирования и развития детонации посвящено большое число работ, изложение которых можно найти, например, [1–3]. Можно выделить направления исследований, связанные с развитием детонационного течения, например, [4–8], с созданием детонационных двигателей, например, [9–10], с математическим моделированием с учетом кинетических уравнений, например, [11–13]. Из недавно опубликованных работ можно, например, отметить работы [14–18], направленные на исследование горения и детонации.

Я. Б. Зельдовичем в предисловии к [2] отмечено, что детонационные волны обладают сложной структурой. Амплитуда ударной волны зависит от внешних факторов. Детонация есть самоподдерживающийся процесс. Ее свойства зависят лишь от энергии, плотности и других характеристик исходной смеси. Уравнения Чепмена, Жуге [7, 8] допускают семейство конечных решений. Зельдовичу (1940 г.), Дерингу (1942 г.) и фон Нейману (1943 г.) удалось прийти к основополагающей идее о горении, которое возбуждается ударной волной, бегущей впереди зоны химической реакции. Важной проблемой является формирование детонационной волны при медленном горении.

Детонация может возникать как внутри предприятия в горючих химических веществах, так и вне его в облаке газа, образующегося при случайной утечки жидкого или газообразного детонационно способного вещества.

## 2. Постановка задачи и методы расчета

Рассматривается плоский двумерный канал высоты  $H$  и длины  $L$ . Начало координат совпадает с началом канала, ось  $X$  направлена по его длине, а ось  $Y$  – вертикально вверх.

В канале предполагается наличие областей водородо-воздушной смеси газов с концентрацией горючего достаточной для возникновения детонации.

Принимается, что в начальный момент времени  $t = 0$  в пространстве по направлению координаты  $X$  при постоянных параметрах воздушной среды во всей области: давлении  $P = P_0$ ,

температуры  $T_0$ , нулевой скорости газа  $U = 0$  и массовых концентрациях компонент  $C_i$ , возникло распределение параметров воздушной среды (плотности  $\rho$ , температуры  $T$ , концентрации горючего – «горячее пятно»), подчиняющееся линейному закону («горячее пятно», при  $x = 0$ :  $T_m$  – максимум температуры,  $C_{mH_2}$  – минимум концентрации горючего,  $L_T$  – линейный размер «горячего пятна», при  $x = L_T$  – выход на параметры невозмущенной среды). В соответствии с гипотезой Зельдовича Я. Б. [4] такое распределение параметров может в дальнейшем приводить к возникновению детонации. Рассматривается стехиометрическая смесь со значениями массовых концентраций компонент вне области «горячего пятна».

В качестве характерных масштабов принимаются следующие величины:  $P_0, \rho_0, L = 1$  м ( $L$  – характерный линейный масштаб). На левом конце расчетной сетки поддерживаются условия стенки, а на правом – условия свободного вытекания.

Расчетная сетка имеет однородную структуру.

При проведении расчетов использовалась система уравнений Эйлера, описывающая нестационарные течения газа, записанная в декартовой прямоугольной системе координат в интегральной форме.

Приводимые ниже результаты получены при использовании системы уравнений газовой динамики в совокупности с уравнениями химической кинетики [18] на основе схемы МакКормака [19].

Введем:

$c_i = \rho_i / \rho$  – массовая концентрация  $i$ -го химического элемента;

$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i$  – массовая плотность смеси газа (суммирование проводится по всем химическим компонентам);

$N$  – общее число индивидуальных химических компонентов в смеси;

$\dot{w}_i = \left. \frac{\partial \rho_i}{\partial t} \right|_{\text{chem}}$  – массовая скорость образования  $i$ -й компоненты в единице объема в результате протекания химической реакции ( $w_i > 0$  – при образовании  $i$ -й компоненты,  $w_i < 0$  – при расходе  $i$ -й компоненты);

$\dot{Q}_{\text{chem}}$  – тепловыделение химических реакций в единице объема за единицу времени;

$E = \rho \cdot \varepsilon + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\vec{V} \cdot \vec{V})$  – полная энергия газа на единицу объема;

$\varepsilon$  – внутренняя энергия единицы массы газа.

Система уравнений, описывающая течение смеси газов, имеет вид

Система уравнений, описывающая течение смеси газов, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \iiint_{\Omega} \rho \cdot d\Omega \right) + \oint_S \rho \cdot \vec{V} d\vec{S} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \iiint_{\Omega} \rho_i \cdot d\Omega \right) + \oint_S \rho_i \cdot \vec{V} d\vec{S} &= \iiint_{\Omega} \dot{w}_i \cdot d\Omega, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \iiint_{\Omega} \rho \cdot \vec{V} \cdot d\Omega \right) + \oint_S \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{V} d\vec{S} &= - \oint_S p d\vec{S}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \iiint_{\Omega} E \cdot d\Omega \right) + \oint_S \rho \cdot \left( h + \frac{1}{2} \vec{V}^2 \right) \vec{V} d\vec{S} &= \iiint_{\Omega} \dot{Q}_{\text{chem}} \cdot d\Omega \end{aligned} \quad (1)$$

При проведении расчетов использовались 10 основных химических компонент ( $H_2$ ,  $OH$ ,  $H$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $O$ ,  $Ar$ ) и учитывались 40 элементарных химических реакций.

Проведение расчетных исследований с использованием детального кинетического механизма химической реакции наталкивается на значительные вычислительные трудности, связанные с порядковым превышением времени расчета газодинамического шага по сравнению со временем расчета химического шага. Поэтому приводимые ниже результаты получены на многопроцессорной вычислительной системе с использованием параллельного алгоритма вычислений.

Дополнительная монотонизация решения, обеспечивалась введением оператора сглаживания [12]

$$f_i^* = f_i^* + \frac{1}{\Delta\Omega_i} (\Phi_{i+1/2} - \Phi_{i-1/2}), \quad \Phi_i = \begin{cases} \Phi_{i+1/2}, & \text{если } [\delta p_{i+1/2} \delta p_{i-1/2} \cup \delta p_{i+1/2} \delta p_{i+3/2}], \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$\Phi_{i+1/2} = \delta f_{i+1/2}^n \cdot \psi(\Delta\Omega_i, \Delta\Omega_{i+1}), \quad \delta f_{i+1/2} = f_{i+1} - f_i, \quad \psi(a, b) = \frac{2}{(1/\Delta\Omega_i) + (1/\Delta\Omega_{i+1})},$$

где  $f$  – значение параметра в ячейке;  $\Omega$  – объем ячейки.

В качестве граничных условий использовались условия непротекания газа через твердую поверхность, которые реализовывалось аналогично разностной схеме С.К. Годунова [12]. На свободной границе при  $z = 0$  задавалось условие отсутствия потока.

### 3. Результаты расчетов

Сначала рассмотрим одномерное плоское течение. В соответствии с гипотезой Зельдовича Я. Б. [4] в зависимости от величины градиента температуры возможно возникновение или отсутствие детонации.

Начальные условия показаны на рис. 1. На начальном участке канала задано горячее пятно, для зажигания смеси газов  $H_2$  (0.1111) +  $O_2$  (0.8889).

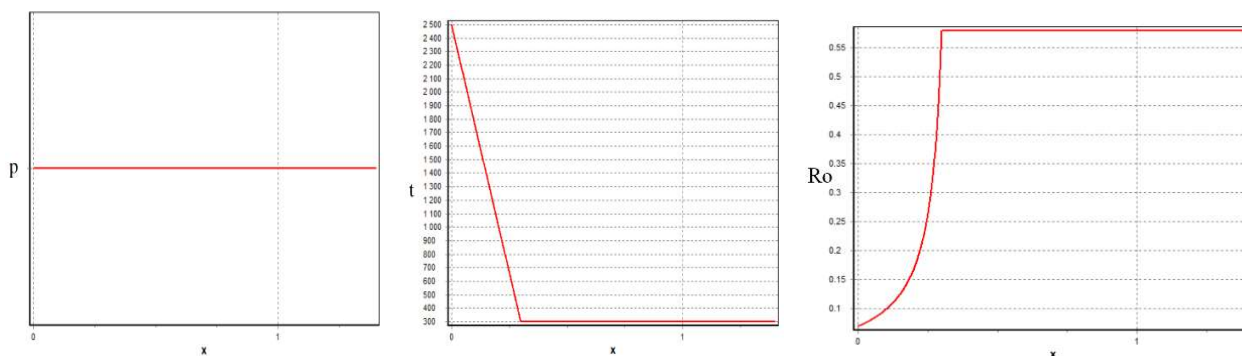


Рис. 1. Начальные профили давления, температуры, плотности

На рис. 2, 3 при длине канала  $X_{\max} = 1.4$  м, для  $P_0 = 1$  атм,  $T_0 = 300$  К,  $T_m = 2500$  К,  $L_T = 0.3$  м приведены типичные зависимости  $P(x)$ , полученные в расчетах при определении границы максимально допустимого градиента температуры, при котором возникает устойчивая детонация.

На рис. 2 показано как развивается процесс по времени при отсутствии формирования ярко выраженной детонационной структуры. В этом случае, соответствующему градиенту температуры выше некоторого критического значения, в результате протекания химических реакций в газовой фазе происходит подъем температуры выше 2400 К со сгоранием водорода и кислорода и образование водяного пара. Однако при этом фронт реакции отстает от волно-

вого фронта и детонационная волна не образуется. Приведенные кривые соответствуют следующим моментам времени в сек: 1, 2 – 0.0000363; 3, 4 – 0.0000784; 5, 6 – 0.000136; 7, 8 – 0.000210.

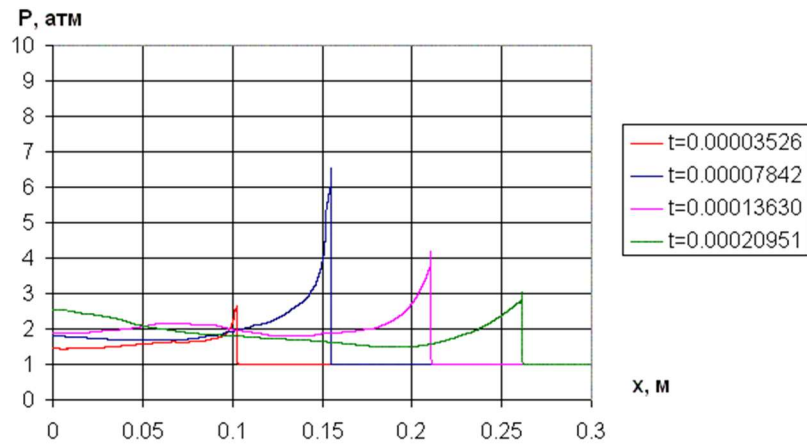


Рис. 2. Развитие процесса при значениях  $\text{grad}(T)$  выше критического

На рис. 3 показано, как происходит формирование самоподдерживающейся детонационной структуры в случае, когда градиент температуры ниже критического значения. Здесь в узкой области на участке «горячего пятна» происходит быстрый рост температуры до значений  $\sim 3000$  К и давления до значений  $\sim 30$  атм. При этом структура детонационной волны, показанная на рис. 3 для момента времени 0.000134 сек, хорошо соответствует теоретическим представлениям (пунктир – уровень давления за детонационной волной, соответствующий уровню давления Чепмена – Жуге [7, 8]). В дальнейшем эта структура сохраняется. Приведенные на рис. 3 кривые соответствуют следующим моментам времени в сек.: 1, 2 – 0.0000614; 3, 4 – 0.0000972; 5, 6 – 0.000134; 7, 8 – 0.000237; 9, 10 – 0.000335.

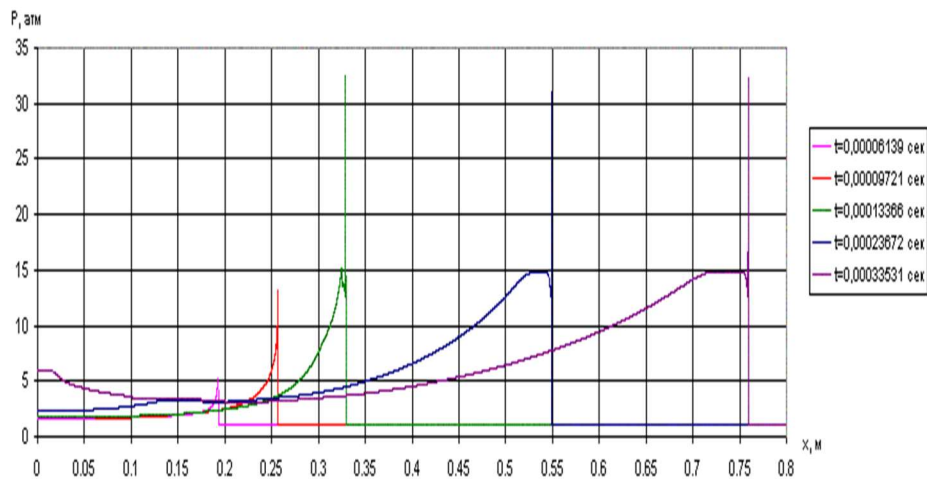
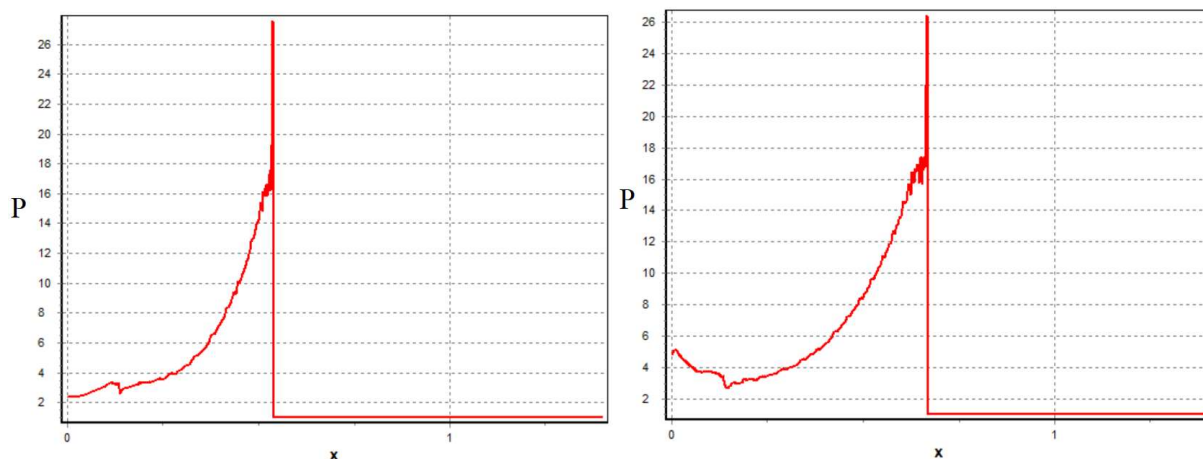
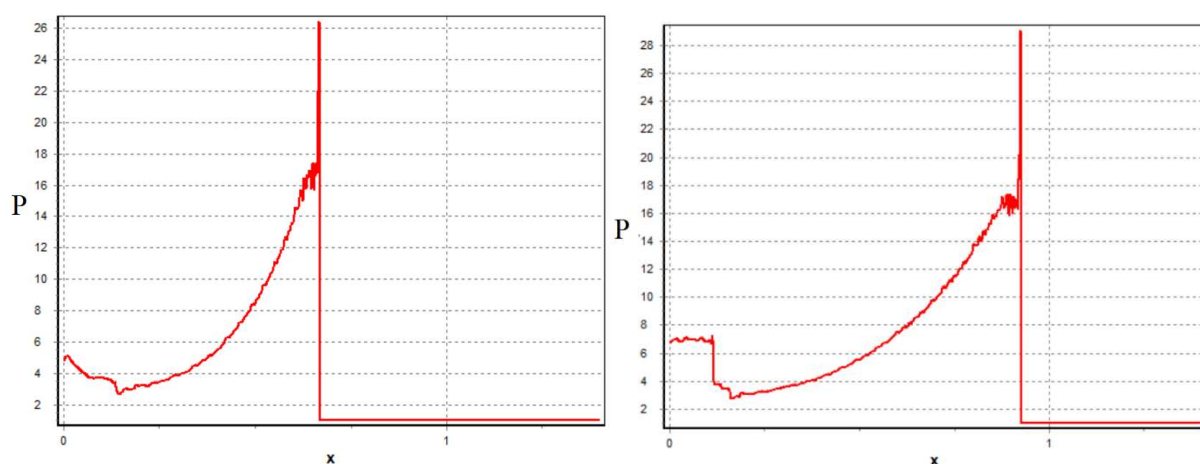


Рис. 3. Развитие процесса при значениях  $\text{grad}(T)$  ниже критического

Представляет интерес сравнить скорость ударной волны с известным теоретическим значением по ее пространственному положению.

На рис. 4, 5 показаны профили давления и моменты времени, когда детонационная волна уже сформировалась и по представленным положениям фронта  $X_D$  детонационной ударной волны можно определить скорость ее движения.

Скорость детонационной волны по рис. 4 составляет  $V_D = 2934$  м/с, а по рис. 5  $V_D = 2871$  м/с. По данным из [1] (стр. 299) скорость детонационной волны  $V_D = 2810$  м/с, что дает погрешность в расчете соответственно в 4 % и 2 %.


 Рис. 4. Профили давления при  $t=0.0001449$  с,  $X_D=0.5398$  м и  $t=0.0001892$  с,  $X_D=0.6698$  м

 Рис. 5. Профиль давления при  $t=0.0001892$  с,  $X_D=0.6698$  м и  $t=0.0002778$  с,  $X_D=0.9242$  м

Интерес представляет сравнить расчетные значения скорости детонационной волны с экспериментальными и расчетными значениями по теории Чепмена – Жуге [7, 8]. Расчет проведен аналогично выше рассмотренному, но при других значениях детонационной смеси. На рис. 6 смесь газов в концентрациях  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 1.5\text{Ar}$ . На некоторых рисунках приведено, полученное в расчете значение давления (пунктир на рисунках), соответствующее давлению Чепмена – Жуге  $P_{\text{ЧЖ}}$ .

Полученные из рис. 6 значения координат фронта детонационной ударной волны и соответствующие им моменты времени позволяют определить скорость ее движения  $V = 2150$  м/с.

На рис. 7 смесь газов в концентрациях  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ . По результатам расчета скорость детонационной волны  $V = 2033$  м/с.

На рис. 8 смесь газов в концентрациях  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 5\text{Ar}$ . По результатам расчета скорость детонационной волны  $V = 1907$  м/с.

Таблица 1

#### Сравнение расчетной скорости детонационной ударной волны с экспериментальными и расчетными данными

Концентрации в газе	Расчетная скорость детонационной ударной волны в м/с	Экспериментальная скорость детонационной ударной волны и по уравнениям Чепмена, Жуге [7, 8] в м/с
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 1.5\text{Ar}$	2150	2117, 1950
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$	2033	1907, 1800
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 5\text{Ar}$	1907	1762, 1700

Сравнение расчетных скоростей детонационных ударных волн с экспериментальными и данными по теории Чепмена – Жуге [7, 8], приведенными в табл. 1, показывает их удовлетворительное соответствие.

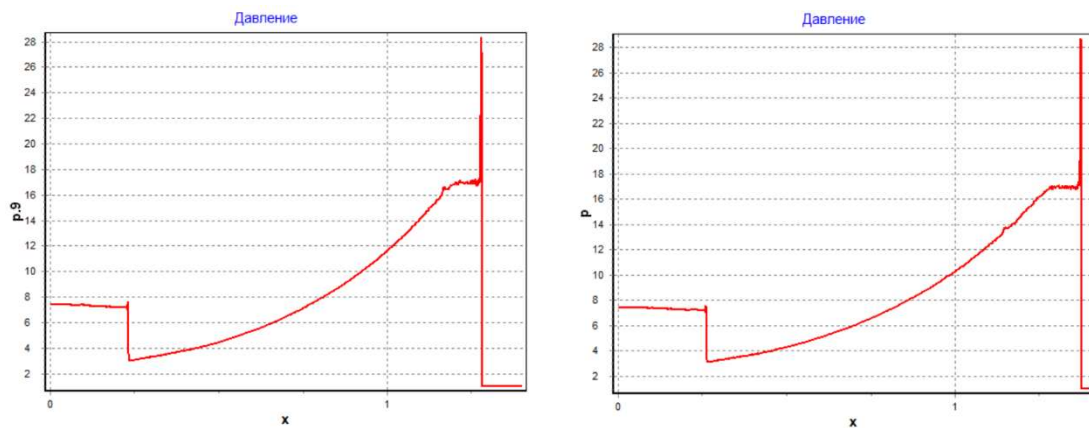


Рис. 6. Профиль давления при  $t = 0.0005256$  с,  $X_D = 1.28$  м,  $P_{чж} = 17.09$  и  $t = 0.0005677$  с,  $X_D = 1.374$  м,  $P_{чж} = 17.06$

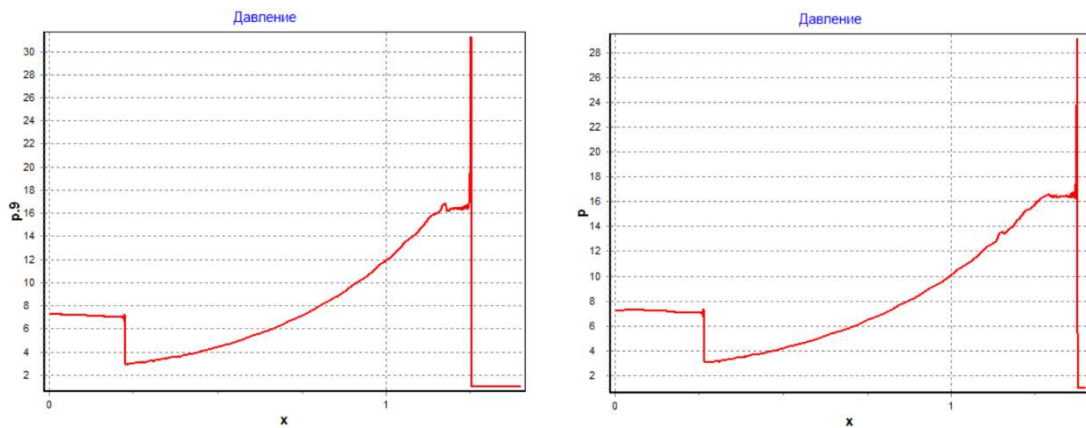


Рис. 7. Профиль давления при  $t = 0.000393$  с,  $X_D = 1.255$  м,  $P_{чж} = 16.5$  и  $t = 0.000576$  с,  $X_D = 1.379$  м,  $P_{чж} = 16.5$

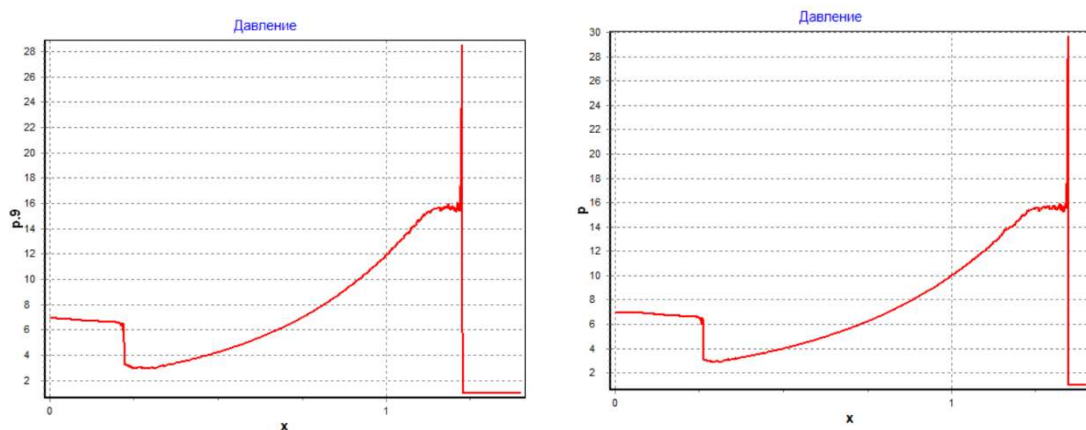


Рис. 8. Профиль давления при  $t = 0.000618$  с,  $X_D = 1.224$  м,  $P_{чж} = 15.6$  и  $t = 0.000683$  с,  $X_D = 1.348$  м,  $P_{чж} = 15.6$

В заключение на рис. 9 приведем профили температур для двух значений концентраций смеси. видны детонационные ударные волны и контактные разрывы, разделяющие возмущенные области газовой смеси.

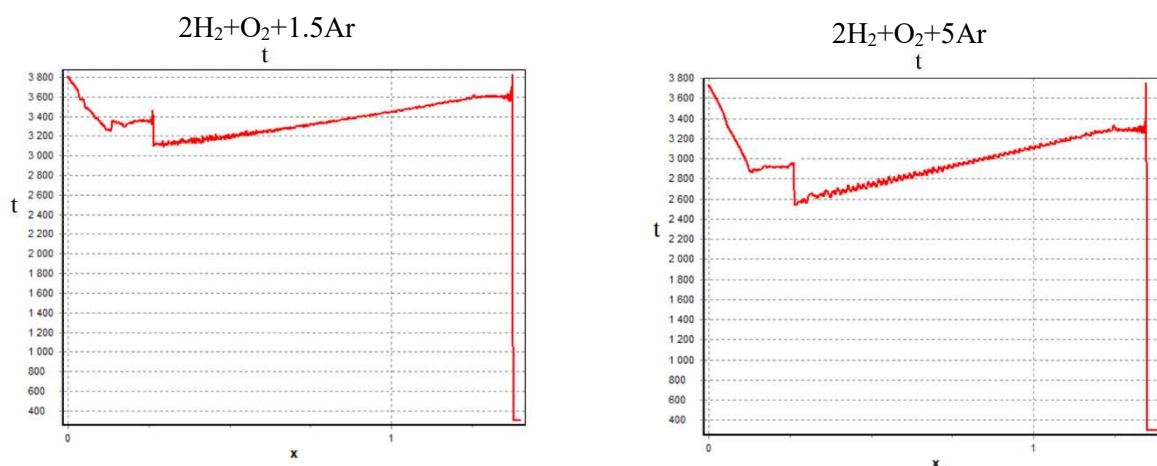


Рис. 9. Профили температуры при  $t = 0.0005677$  с и  $t = 0.000576$  с

Одним из основных направлений исследований в настоящее время является изучение условий формирования ячеистой структуры детонационной ударной волны. Начальная картина распределения давления приведено на рис. 10. В работе [12] отмечалось, что при решении рассматриваемой задачи начальные данные могут быть заданы в достаточно произвольной форме. Необходимо только, чтобы при этом задаваемая начальная энергия превышала некоторую критическую величину. Настоящие расчеты были проведены с заданием начальных данных “взрывного” типа для смеси газов со следующими концентрациями смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$ . При этом во всех проведенных расчетах спустя некоторое время от начала, результат был независим от конкретного их первоначального задания.

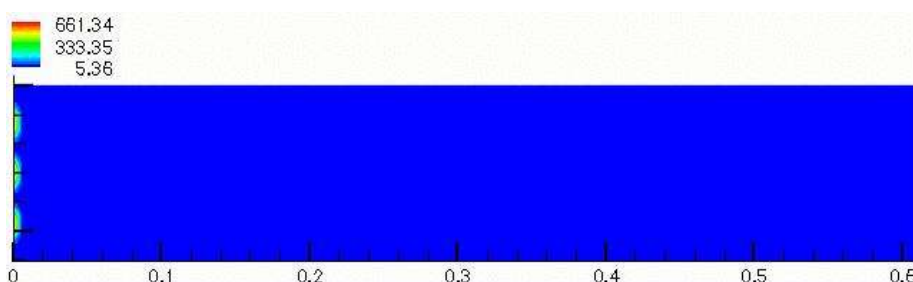


Рис. 10. Начальная картина распределения давления при формировании ячеистой структуры

На некотором расстоянии от первоначального взрывного источника образуется типичная детонационная структура, показанная на рис. 11.

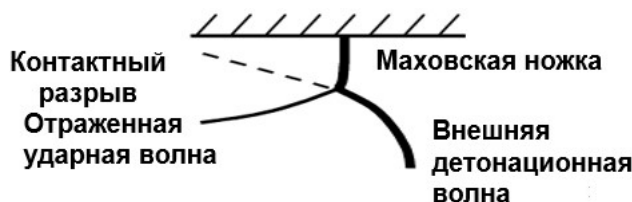


Рис. 11. Типичная детонационная структура

На рис. 12 показано развитие процесса детонации по времени в канале. Из рис. 12 видно развитие детонационного процесса по времени в канале. Красные участки на рисунках, это участки движения детонационной структуры, показанной на рис. 12. Первоначально, возникшие ударные волны взаимодействуют между собой и движутся к верхней и нижней границам канала. Отражаются от границ и движутся к центру. После взаимодействия в центре они снова движутся к границам. В дальнейшем процесс повторяется. При этом в расчетах были получены



скорости лидирующей детонационной волны на уровне 1660 м/с. В работе [12] получено 1623 м/с при скорости Charman – Jouget 1619 м/с.

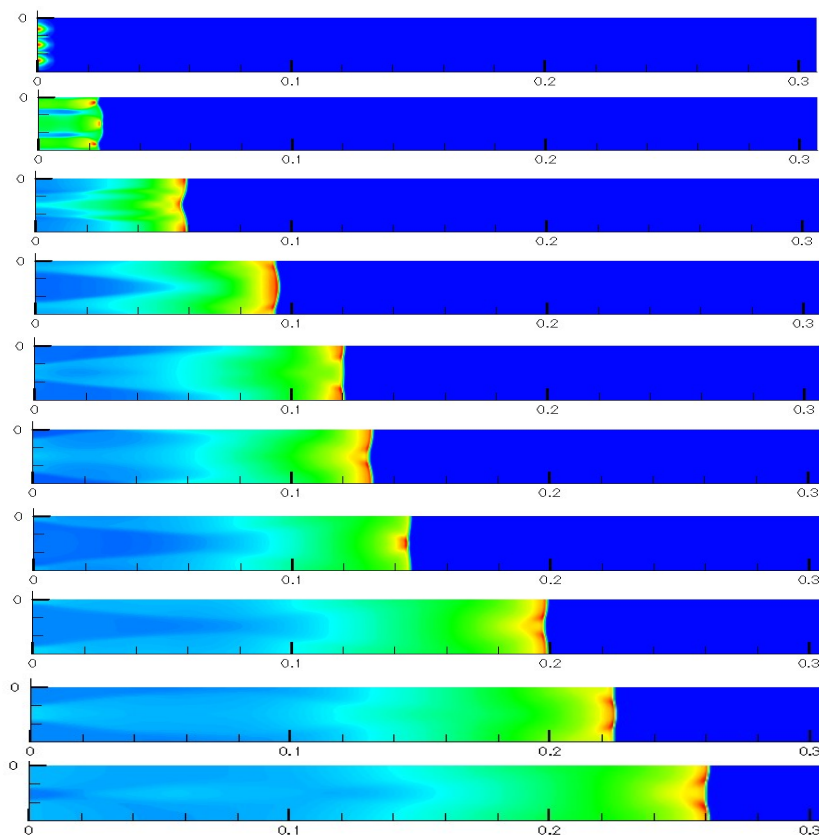


Рис. 12. Развитие процесса детонации по времени в канале

Анализ движения детонационных ударных волн, движущихся в вертикальном и горизонтальном направлениях позволяет построить ячеистую структуру детонационной волны, показанную на рис. 13. Сверху нарисована детонационная структура, полученная по результатам расчетов, представленных на рис. 12. Внизу представлена детонационная ячеистая структура, взятая из [12].

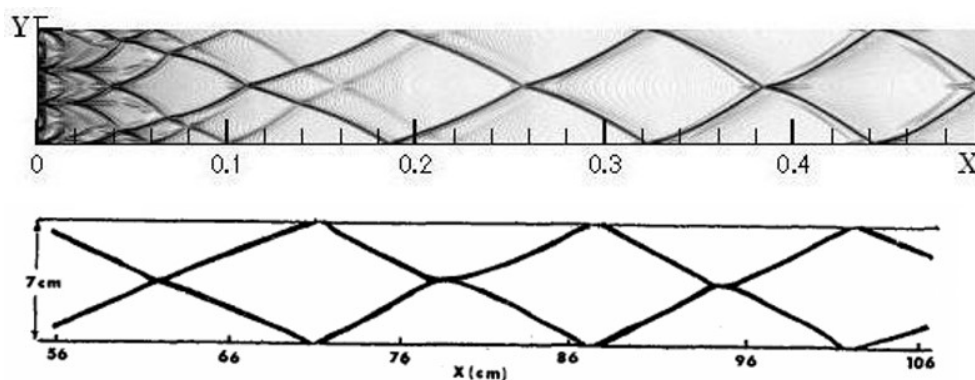


Рис. 13. Ячеистая структура детонационной волны

Линейные размеры ячеек составляют для результатов расчета  $L/h = 6.5/3 = 2.15$ , для результатов из [12] –  $19.6/8.5 = 2.3$ .

Таким образом, ячеистые структуры в двух расчетах находятся в удовлетворительном соответствии.

## 4. Заключение

Проведенные расчеты соответствуют требованиям гипотезы Я.Б. Зельдовича об возникновении и отсутствии детонации. Полученные скорости детонационных ударных волн хорошо соответствуют имеющимся экспериментальным данным. Расчет развития детонационного течения в плоском канале соответствует экспериментальным и теоретическим данным. Полученная в расчете ячеистая структура детонационной ударной волны хорошо соответствует результатам [12].

## Благодарности и ссылки на гранты

Расчеты выполнены с использованием средств государственного бюджета (FFGN-2023-0003 123021700057-0) и проведены на суперкомпьютере МСЦ РАН.

## Литература

1. Соколик А.С. Самовоспламенение и детонация в газах. М.: АН СССР. 1960. 427 с.
2. Нетлетон М. Детонация в газах. М.: Мир. 1989. 280 с.
3. Войцеховский Б.В., Митрофанов В.В., Топчян М.Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: СО АН СССР. 1960.
4. Зельдович Я.Б. Теория распространения детонации в газовых системах // ЖЭТФ. 1940. Т. 10, С. 524.
5. Zel'dovich Y.B. Regime classification of an exothermic reaction with nonuniform initial conditions // Comb. and Flame. Vol. 39, no. 2. 1980. Pp. 211–214. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90017-6)
6. Zel'dovich, Ya.B., Librovich V.B., Makhviladze G.M., Sivashinsky G.I. On the Development of Detonation in a Nonuniformly Preheated Gas // Astronautica Acta. Vol. 15, no. 5–6. 1970. Pp. 313–320.
7. Chapman D.L. On the rate of explosion in gases // Phil. Mag. Vol. 47, no. 284. 1899. Pp. 90–104.
8. Jouguet E. J. Mathem. Pures Appl. Vol. 1. 1905. Pp. 347–425 and Vol. 2. 1906. Pp. 542–568.
9. Фролов С.М., Звезгинцев В.И., Иванов В.С. и др. Испытания модели детонационного прямого двигателя в аэродинамической трубе при обтекании воздушным потоком с числом Маха 5, 7 и температурой торможения 1500 К // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 3. С. 277–281.
10. Егорян А.Д., Крайко А.Н. Сравнение воздушно-реактивных двигателей с медленным и детонационным горением // Изв. РАН МЖГ, 2020, № 2, С. 123–137. DOI: 10.31857/S0568528120020024
11. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. М.: Мир. 1985. 384 с.
12. Oran E.S., Weber J.W., Stefaniev E.I., Lefebvre M.H. and Anderson J.D. A Numerical Study of a Two-Dimensional H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Ar Detonation Using a Detailed Chemical Reaction Model // Combustion and Flame. 1998. Vol. 113. Pp. 147–163. DOI:10.1016/S0010-2180(97)00218-6
13. Кириллов И.А., Осинина Е.В., Панасенко А.В., Стрелкова М.В. Моделирование формирования детонации с использованием детальной химической кинетики // Ж. математическое моделирование. 2005. Т. 17. № 11. С. 93–102.
14. Селезнев Р.К., Суржиков С.Т. Нестационарные газодинамические процессы в осесимметричном канале ГПВРД с периодическим вдувом холодного воздуха // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/499/>
15. Мурзов С.А., Сергеев О.В., Жаховский В.В. Атомистическое моделирование и кинетика химических реакций в детонации модельного твердого АВ взрывчатого вещества // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-4/articles/564/>
16. Зубин М.А., Туник Ю.В. О стабилизации детонационного горения водорода в сопле Лавалья // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/579/>

17. Туник Ю.В., Козлов П.В., Майоров В.О. Протяженность стационарной детонационной волны в смеси гремучего газа с азотом // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т.19, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-3/articles/768/>.  
<http://doi.org/10.33257/PhChGD.19.3.768>
18. Туник Ю.В. Численное моделирование детонационного горения водорода в сопле Лавалья с центральным телом // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т. 20, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/816/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.20.1.816>
19. Marinov N., Westbrook C.K., Pitz W.J. Detailed and global chemical kinetic model for hydrogen. *Transport phenomena in combustion*. Taylor & Francis US. 1996. Vol. 1, p. 118.
20. Mac-Cormack R.W. The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // *AIAA Paper 1969-354*. <https://doi.org/10.2514/6.1969-354>

## References

1. Sokolik A.S., *Spontaneous ignition and detonation in gases*, Moscow: USSR Academy of Sciences, 1960, 427 p. [in Russian].
2. Netleton M., *Detonation in gases*, Moscow: Mir, 1989, 280 p. [in Russian].
3. Wojciekhowski B. V., Mitrofanov V. V., Topchiyan M. E., *The structure of the detonation front in gases*, Novosibirsk: SB OF the USSR Academy of Sciences, 1960.
4. Zeldovich Ya. B., Theory of detonation propagation in gas systems, *J. of Experimental and Theoretical Physics*, 1940, vol. 10, p. 524. [in Russian].
5. Zel'dovich Y. B., Regime classification of an exothermic reaction with nonuniform initial conditions, *Comb. and Flame*, 1980, vol. 39, no. 2, pp. 211–214. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90017-6)
6. Zel'dovich, Ya.B., Librovich V.B., Makhviladze G.M., Sivashinsky, G.I., On the Development of Detonation in a Nonuniformly Preheated Gas, *Astronautica Acta*, 1970, vol. 15, no. 5–6, pp. 313–320.
7. Chapman D. L., On the rate of explosion in gases, *Phil. Mag.*, 1899, vol. 47, no. 284, pp. 90–104.
8. Jouguet E. J., *Mathem. Pures Appl.*, 1905, vol. 1, pp. 347–425 and 1906, vol. 2, pp. 542–568.
9. Frolov S. M., Zvegintsev V. I., Ivanov V. S., et al., Tests of a model of a detonation ramjet engine in a wind tunnel when flowing with an air flow with a Mach number of 5.7 and a braking temperature of 1500 K, *Dokl. RAS*, 2018, vol. 481, no. 3. pp. 277–281. [in Russian].
10. Yegoryan A. D., Kraiko A. N., Comparison of Air-Breathing Engines with Slow and Detonation Combustion, *Fluid Dynamics*, 2020, vol. 55, no. 2, <https://doi.org/10.1134/S0015462820020020>.
11. Mader Ch. L., *Numerical modeling of detonations*, Moscow: Mir, 1985, 384 p. [in Russian].
12. Oran E. S., Weber J. W., Stefaniev E. I., Lefebvre M. H. and Anderson J. D., A Numerical Study of a Two-Dimensional H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Ar Detonation Using a Detailed Chemical Reaction Model, *Combustion and Flame*, 1998, vol. 113, pp. 147–163. DOI:10.1016/S0010-2180(97)00218-6
13. Kirillov I. A., Osinina E. V., Panasenko A. V., Strelkova M. V., Modeling of formation a detonation with use detailed chemical kinetic, *Mathematical modeling*, 2005, vol. 17, no. 11, pp. 93–102.
14. Seleznev R. K., Surzhikov S. T., Unsteady Thermo-Gasdynamic Processes in Axisymmetric Scramjet Combustion Chamber with Periodical Input of Cold Air, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2015, vol. 16, no. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/499/> [in Russian].
15. Murzov S. A., Sergeev O. V., Zhakhovsky V. V., Detonation molecular dynamics simulation and chemical kinetics in a condensed AB model explosive, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2015, vol. 16, no. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-4/articles/564/> [in Russian].
16. Zubin M. A., Tunik Yu. V., About stabilization of hydrogen detonative combustion in a convergent-divergent nozzle, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2015, vol. 16, no. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/579/> [in Russian].

17. Tunik Yu. V., Kozlov P. V., Mayorov V. O., Thickness of the Stationary Detonation Wave in a Mixture of Oxyhydrogen Gas with Nitrogen, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2018, vol. 19, no. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-3/articles/768/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.19.3.768> [in Russian].
18. Tunik Yu. V., Numerical Simulation of Hydrogen Detonative Combustion in a Convergent-Divergent Nozzle with a Central Body, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2019, vol. 20, no. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/816/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.20.1.816> [in Russian].
19. Marinov N., Westbrook C. K., Pitz W. J., Detailed and global chemical kinetic model for hydrogen, *Transport phenomena in combustion*, Taylor & Francis US, 1996, vol. 1, p. 118.
20. Mac-Cormak R. W., The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering, AIAA Paper 1969-354, <https://doi.org/10.2514/6.1969-354>

Статья поступила в редакцию 16 марта 2023 г.