

# Cylindrical Cellular Detonation in a Hydrogen-Air Mixture with Ozone and Argon Additives

T. A. Zhuravskaya<sup>1</sup>, V. A. Levin<sup>1,2</sup>

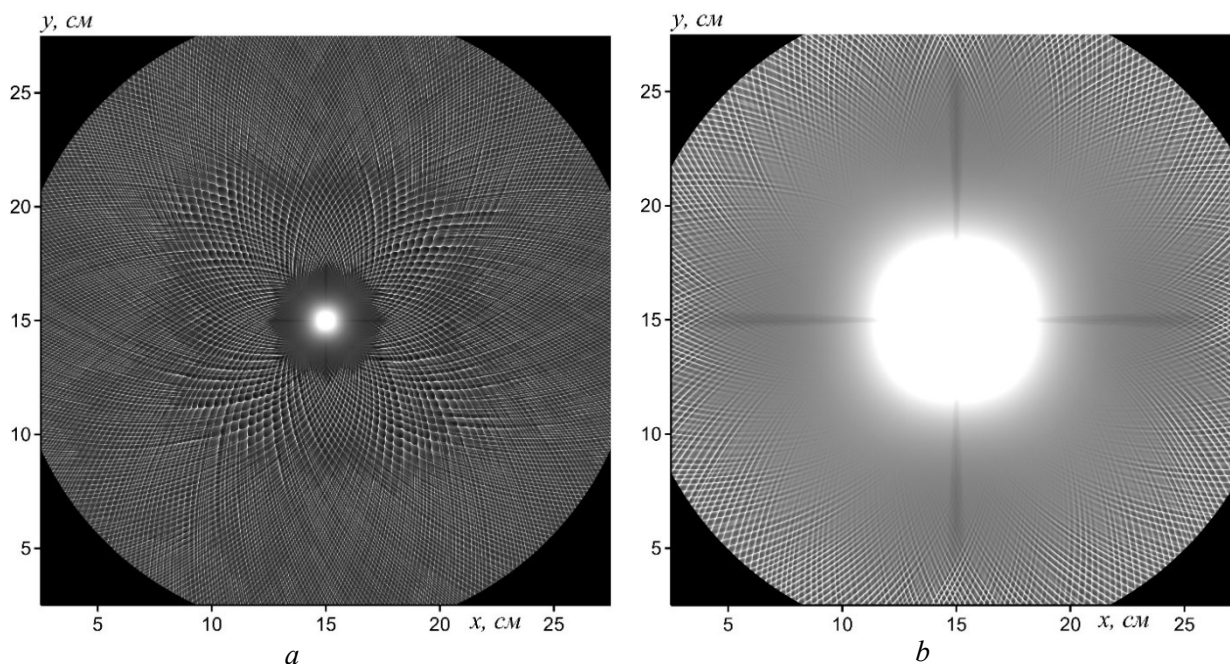
<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics,  
Moscow, 119192, Russia*

<sup>2</sup> *Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, 630090, Russia*  
zhuravskaya@imec.msu.ru

## Abstract

Using a detailed kinetic mechanism of chemical interaction, the effect of ozone and argon additives to a stoichiometric hydrogen-air mixture on the parameters of a diverging cylindrical detonation wave was studied with the aim of detonation combustion control. It was found that the molar fractions of these additives can be selected so that the transverse size of the cell of cylindrical detonation in the resulting mixture remains close to the average transverse size of the detonation cell in a pure mixture, while the temperature of the detonation products is significantly reduced. Influence of the gas mixture rotation on the propagation of a cylindrical wave was investigated. It was established that ozone and argon additives at the selected concentrations increase the stability of a divergent cylindrical detonation to disturbances caused by the rotation of the combustible mixture.

Keywords: divergent cylindrical detonation, hydrogen-air mixture, ozone, argon, rotating combustible mixture.



Histories of maximum pressure of cellular cylindrical detonation propagating in a quiescent mixture: *a* – pure stoichiometric hydrogen-air mixture; *b* – stoichiometric hydrogen-air mixture with ozone and argon additives at selected concentrations (2.5 % O<sub>3</sub> and 70 % Ar)

УДК 534.222.2

# Цилиндрическая ячеистая детонация в водородно-воздушной смеси с добавками озона и аргона

Т. А. Журавская<sup>1</sup>, В. А. Левин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики,  
Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
Россия, Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 1  
zhuravskaya@imec.msu.ru

## Аннотация

Используя детальный кинетический механизм химического взаимодействия, численно исследовано влияние добавок озона и аргона в стехиометрическую водородно-воздушную смесь на параметры расходящейся цилиндрической волны детонации с целью управления детонационным горением. Установлено, что мольные доли вносимых добавок могут быть подобраны так, что поперечный размер ячейки цилиндрической детонации в полученной смеси будет близок к среднему поперечному размеру детонационной ячейки в чистой смеси, при этом температура продуктов детонации будет существенно снижена. Рассмотрено влияние вращения смеси на распространение цилиндрической волны. Обнаружено, что внесение добавок озона и аргона в подобранных концентрациях повышает устойчивость расходящейся цилиндрической детонации к возмущениям, вызванным вращением горючей смеси.

Ключевые слова: расходящаяся цилиндрическая детонация, водородно-воздушная смесь, озон, аргон, вращающаяся горючая смесь.

## 1. Введение

Активное развитие водородной энергетики определяет необходимость управления детонационным горением водородосодержащих смесей. Изменение состава горючей газовой смеси за счет внесения различных добавок или предварительного преобразования ее компонентов является одним из основных способов управления детонацией.

Так, исследования показали, что для разрушения распространяющейся волны можно использовать завесы из нереагирующих частиц пыли [1]. С другой стороны, было установлено, что добавление инертных частиц в водородно-воздушную смесь, поступающую в канал с пережатием со сверхзвуковой скоростью, может использоваться для стабилизации в потоке детонационной волны и управления ее положением с целью повышения эффективности детонационного сжигания газа [2–4]. В [5, 6] численно установлена возможность предотвращения гашения детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси в каналах с препятствиями посредством предварительной диссоциации небольшого количества молекулярного водорода и кислорода на атомы, приводящей к существенному уменьшению размера детонационной ячейки при незначительном увеличении скорости распространения волны [3–6]. Обнаруженное в численных расчетах изменение структуры детонации в результате указанной предварительной диссоциации подтверждается результатами экспериментального исследования прохождения сформированной ячеистой детонационной волны через область плазмы, содержащей наряду с другими радикалами атомарный кислород [7]. Как в

эксперименте [8], так и при численном моделировании [9] было получено, что измельчение ячеистой структуры детонации при незначительном изменении скорости волны наблюдается также при внесении в горючую газовую смесь малого количества озона  $O_3$ , который быстро разлагается за лидирующей ударной волной с образованием атомарного кислорода. При этом введенный в небольшом количестве озон не меняет значимо термодинамические свойства смеси.

Для успешного использования детонации в различных энергетических установках необходимо решить сложную проблему охлаждения стенок детонационной камеры. Понижение температуры продуктов горения существенно упрощает эту задачу. Простым способом, снижающим температуру за детонационной волной, является, например, внесение в горючую смесь достаточного количества инертного разбавителя (например, аргона) благодаря его ингибирующему действию. Однако при этом наблюдается значительный рост детонационной ячейки [10], что нежелательно, поскольку размер ячейки является фундаментальной характеристикой детонационной способности смеси. В [11, 12] было установлено, что в стехиометрической водородно-воздушной смеси к существенному снижению температуры в плоской волне детонации без значимого изменения размера детонационной ячейки приводит одновременное внесение в смесь озона и аргона в определенных концентрациях. Кроме того, обнаружено, что детонационная волна в смеси с добавками в подобранных концентрациях более устойчива к возмущениям, вызванным расположенными в плоском канале множественными препятствиями (барьерами), чем в начальной смеси.

В данной работе в рамках детальной кинетики химического взаимодействия численно исследуется влияние добавок озона и аргона в покоящуюся стехиометрическую водородно-воздушную смесь на параметры расходящейся ячеистой цилиндрической волны детонации с целью снижения температуры продуктов горения без существенного увеличения размера детонационной ячейки. Изучается влияние указанных добавок на устойчивость расходящейся цилиндрической волны к возмущениям, вызванным вращением горючей смеси.

## 2. Математическая постановка задачи

Рассматривается распространение цилиндрической детонационной волны в покоящейся при нормальных начальных условиях ( $T_0 = 298 \text{ K}$ ,  $p_0 = 1 \text{ атм}$ ) или вращающейся горючей смеси в узком зазоре между двумя параллельными плоскими пластинами. Для инициирования детонации используется мгновенный однородный сверхкритический (достаточный для прямого инициирования детонации) подвод энергии  $E_0$  в области, имеющей форму круга с центром в точке  $(x_0, y_0)$  и радиусом  $r_0$ . Исследуется детонационное горение чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси, которая моделируется как смесь газов  $H_2$ ,  $O_2$  и  $N_2$  в молярном соотношении 42:21:79 соответственно, и стехиометрической водородно-воздушной смеси с добавками озона  $O_3$  и аргона  $Ar$ .

Система уравнений, описывающих плоское двумерное нестационарное течение невязкой многокомпонентной реагирующей газовой смеси, имеет вид

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

$$\frac{\partial(\rho n_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u n_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v n_i)}{\partial y} = \omega_i, i = 1, \dots, M.$$

Здесь  $x$  и  $y$  – декартовы координаты;  $u$  и  $v$  – соответствующие компоненты скорости;  $t$  – время;  $\rho$ ,  $p$  и  $h$  – плотность, давление и удельная энтальпия смеси;  $n_i$  и  $\omega_i$  – удельная концентрация и скорость образования  $i$ -го компонента смеси;  $M$  – полное количество компонентов. Уравнения состояния горючей смеси, рассматриваемой как совершенный газ, суть

$$p = \rho R_0 T \sum_{i=1}^M n_i, \quad h = \sum_{i=1}^M n_i h_i(T).$$

Здесь  $T$  – температура;  $R_0$  – универсальная газовая постоянная. Зависимости парциальных энтальпий от температуры  $h_i(T)$  определяются по приведенным энергиям Гиббса соответствующих компонентов смеси [13]. Для описания химического взаимодействия используется предложенный в [14] детальный кинетический механизм окисления водорода, состоящий из 26 обратимых реакций. Корректность используемой математической модели для расчета детонационного горения чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси и смеси с добавками подтверждена результатами валидации, которые подробно обсуждаются в [15].

В начальный момент времени ( $t = 0$ ) в случае вращения смеси вне области энергоподвода  $\{(x, y): \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} > r_0\}$  реализуется вращающееся течение, подобное вихрю Бюргера [16]. Параметры газа являются функциями расстояния  $r$  до центра энергоподвода  $(x_0, y_0)$ , т.е.  $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ . Радиальная составляющая скорости равна нулю; зависимость ее тангенциальной компоненты  $w$  от  $r$  задается следующим образом:

$$w(r) = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left( 1 - \exp\left(-\left(\frac{r}{r_c}\right)^2\right) \right),$$

где  $\Gamma$  – циркуляция вихря;  $r_c$  – радиус ядра вихря.

Состав смеси не зависит от  $r$ :  $n_i \equiv n_{i0}$  ( $i = 1, \dots, M$ ), здесь  $n_{i0}$  – начальная удельная концентрация  $i$ -го компонента смеси.

При  $r \rightarrow \infty$ :  $w(r) \rightarrow 0$ ,  $T \rightarrow T_0$ ,  $p \rightarrow p_0$ ,  $\rho \rightarrow \rho_0$ , где  $\rho_0 = p_0 / (R_0 T_0 \sum_{i=1}^M n_{i0})$ .

Зависимость  $T(r)$  определяется из условия постоянства полного теплосодержания

$$\sum_{i=1}^M n_{i0} h_i(T_0) = \sum_{i=1}^M n_{i0} h_i(T) + \frac{w^2}{2};$$

зависимости  $\rho(r)$  и  $p(r)$  удовлетворяют уравнениям

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \sum_{i=1}^M n_{i0}},$$

$$r \frac{dp}{dr} - \rho w^2 = 0.$$

После определения  $p(r)$  методом Рунге – Кутты из приведенных выше формул легко находятся все газодинамические величины в области вихря, задающего вращение газовой смеси.

При  $t = 0$  внутри области энергоподвода  $\{(x, y): \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \leq r_0\}$

$$u(x, y) = 0; v(x, y) = 0; n_i = n_{i0}; \rho = \rho_1 = p(r)|_{r=r_0} / (R_0 T_0 \sum_{i=1}^M n_{i0});$$

температура  $T$  определяется подведенной энергией  $E_0$

$$\sum_{i=1}^M n_{i0} h_i(T_0) - R_0 T_0 \sum_{i=1}^M n_{i0} + \frac{E_0}{\rho_1 \pi r_0^2} = \sum_{i=1}^M n_{i0} h_i(T) - R_0 T \sum_{i=1}^M n_{i0};$$

давление задается уравнением состояния

$$p = \rho_1 R_0 T \sum_{i=1}^M n_{i0}.$$

В случае отсутствия вращения газовой смеси энергия  $E_0$  подводится в момент времени  $t = 0$  в покоящуюся при нормальных условиях ( $T_0 = 298$  К,  $p_0 = 1$  атм) горючую смесь.

Для решения уравнений газовой динамики использовалась явная разностная схема второго порядка аппроксимации на основе схемы Годунова [17, 18]: для обеспечения второго порядка точности по пространству выполнялась кусочно-линейная реконструкция решения по «осредненным» сеточным величинам с ограничителем MINMOD; второй порядок точности по времени достигался с помощью алгоритма типа предиктор-корректор. Для численного моделирования использовался оригинальный программный модуль, в котором реализовано гибридное распараллеливание расчетов MPI/OpenMP.

Расчеты, результаты которых обсуждаются ниже, проведены на сетке с шагом разбиения, обеспечивающим корректное разрешение структуры детонационной волны для всех рассмотренных в работе смесей (отношение ширины зоны индукции, определенной при рассмотрении модели детонации Зельдовича–Неймана–Деринга (ЗНД модели), к размеру расчетной ячейки близко к 10).

### 3. Результаты расчетов

#### 3.1. Распространение цилиндрической волны детонации в покоящейся смеси

Рассмотрено распространение расходящейся цилиндрической волны детонации в покоящейся чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси. Для ее инициирования использовался сверхкритический подвод энергии в круге радиуса  $r_0 = 2.5$  мм. Формирующаяся расходящаяся цилиндрическая волна имеет нерегулярную ячеистую структуру. Полученные в результате расчета траектории тройных точек (точек сопряжения поперечных волн с передним фронтом) и содержащая фронт волны часть поля давления в момент времени  $t = 0.07$  мс, иллюстрирующие ячеистую структуру расходящейся детонации, представлены на рис. 1. Полученные в расчете траектории тройных точек (для этого определялось максимальное значение давления в каждой расчетной ячейке за все время расчета) – это численный аналог траекторий тройных точек расходящейся детонации, фиксируемых в эксперименте, например, с помощью фотоаппарата с открытым затвором [19, 20]. Расчет воспроизводит наблюдаемое в эксперименте формирование новых поперечных волн и увеличение количества детонационных ячеек в расходящейся волне (рис. 1). Нерегулярность полученной в расчете ячеистой структуры согласуется с результатами экспериментального исследования детонационного горения разбавленных азотом водородно-кислородных смесей [21]. Скорость расходящейся цилиндрической волны  $D \cong 1930$  м/с. Дефицит скорости по сравнению со скоростью детонации Чепмена–Жуге  $D_{CJ}$ , определенной при рассмотрении ЗНД модели детонации, (табл. 1) составляет примерно 2 %.

Таблица 1

**Параметры детонации Чепмена–Жуге в чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси и в смеси с добавками озона и аргона**

| смесь                                                                             | $D_{CJ}$ , м/с | $T_{CJ}$ , К |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------|
| H <sub>2</sub> – воздух (42H <sub>2</sub> – 21O <sub>2</sub> – 79N <sub>2</sub> ) | 1975           | 2961         |
| H <sub>2</sub> – воздух – 0.6%O <sub>3</sub> – 70%Ar                              | 1329           | 1992         |
| H <sub>2</sub> – воздух – 1%O <sub>3</sub> – 70%Ar                                | 1333           | 2004         |
| H <sub>2</sub> – воздух – 2.5%O <sub>3</sub> – 70%Ar                              | 1349           | 2053         |

Влияние добавок озона и аргона в стехиометрическую водородно-воздушную смесь при нормальных условиях на параметры самоподдерживающейся ячейистой детонационной волны, распространяющейся в плоском канале, подробно исследовано в [11, 12]. Установлено, что молярные доли добавок могут быть подобраны так, что поперечный размер детонационной ячейки волны, распространяющейся в смеси с добавками, близок к среднему поперечному размеру ячейки в чистой смеси, при этом температура продуктов детонации существенно снижена. Так, в случае внесения в смесь 0.6 %  $O_3$  и 70 %  $Ar$  формируется детонационная волна, размер ячейки которой немного превышает средний размер детонационной ячейки в чистой смеси, а увеличение доли озона до 1 % приводит к формированию волны детонации с более мелкой (по сравнению с чистой смесью) ячейистой структурой [11, 12]. При этом температура продуктов горения незначительно меняется при увеличении доли озона и близка к 2000 К (см. табл. 1). Таким образом, использование добавок в указанных концентрациях позволяет снизить температуру за волной более чем на 30 % (см. табл. 1).

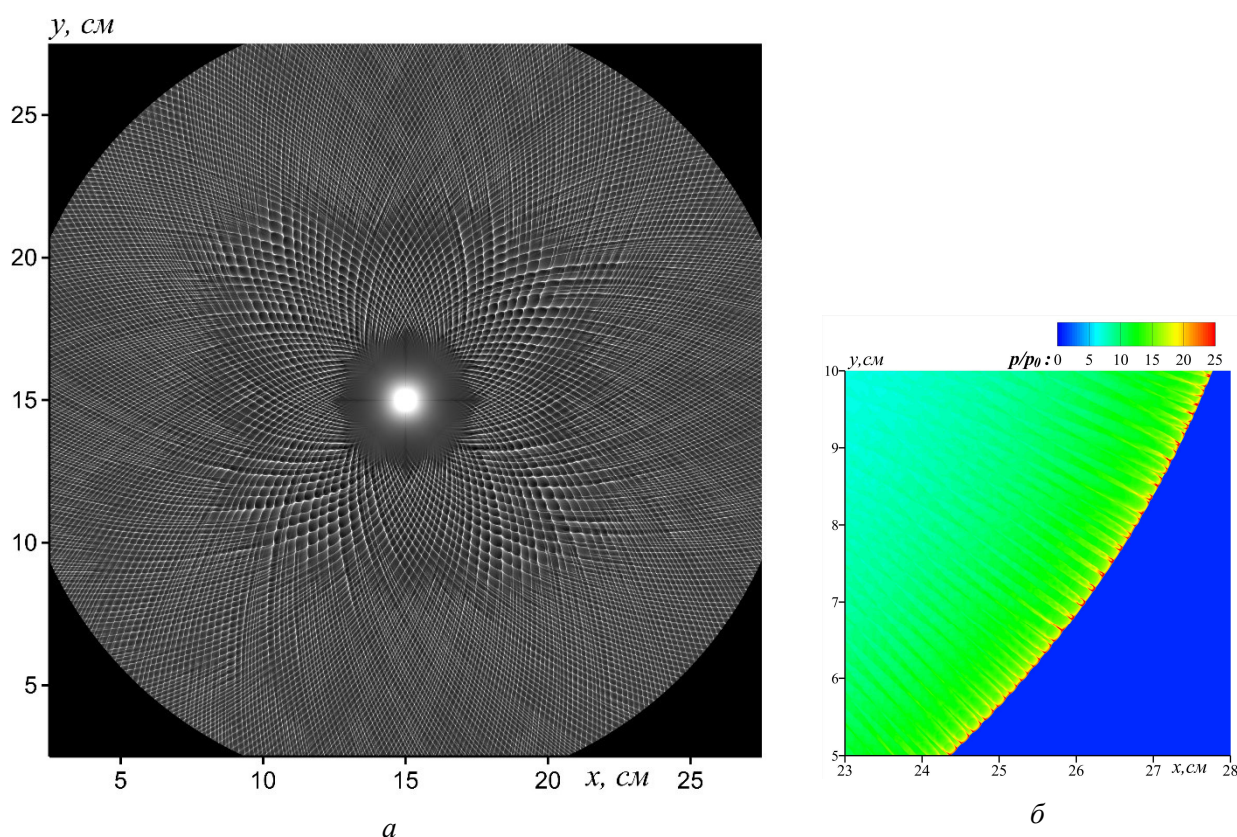


Рис. 1. Расходящаяся цилиндрическая волна в покоящейся чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси: *а* – траектории тройных точек; *б* – часть поля давления в момент времени  $t = 0.07$  мс

Иницирование цилиндрической детонации в стехиометрической водородно-воздушной смеси с добавками  $O_3$  и  $Ar$  осуществлялось энергоподводом в круге радиуса  $r_0 = 10$  мм. Рассмотрено распространение цилиндрической волны в покоящейся смеси с добавками озона и аргона в указанных выше концентрациях, обеспечивающих поперечный размер ячейистой структуры плоской волны близкий к среднему размеру детонационной ячейки в чистой смеси. Расчеты показали, что размер ячейки цилиндрической детонации в этих случаях существенно превосходит размер ячейки волны в смеси без добавок. Однако для уменьшения размера ячейки достаточно увеличить количество внесенного в смесь озона [8, 9]. Расчеты показали, что увеличение доли озона до 2.5 % при прочих равных условиях позволяет получить цилиндрическую волну с ячейистой структурой, размер которой близок к структуре цилиндрической детонации в чистой смеси (рис. 2); при этом температура продуктов горения

близка к 2000 К (см. табл. 1). Как и в случае плоской волны цилиндрическая детонация в смеси с добавками  $O_3$  и  $Ar$  имеет регулярную ячеистую структуру. Скорость цилиндрической волны в  $H_2$ -воздух-2.5% $O_3$ -70% $Ar$  смеси  $D \cong 1270$  м/с. Дефицит скорости по сравнению со скоростью детонации Чепмена – Жуге (см. табл. 1) составляет  $\approx 6\%$ . Такое снижение скорости распространения цилиндрической волны, по-видимому, обусловлено ее регулярной ячеистой структурой [22].

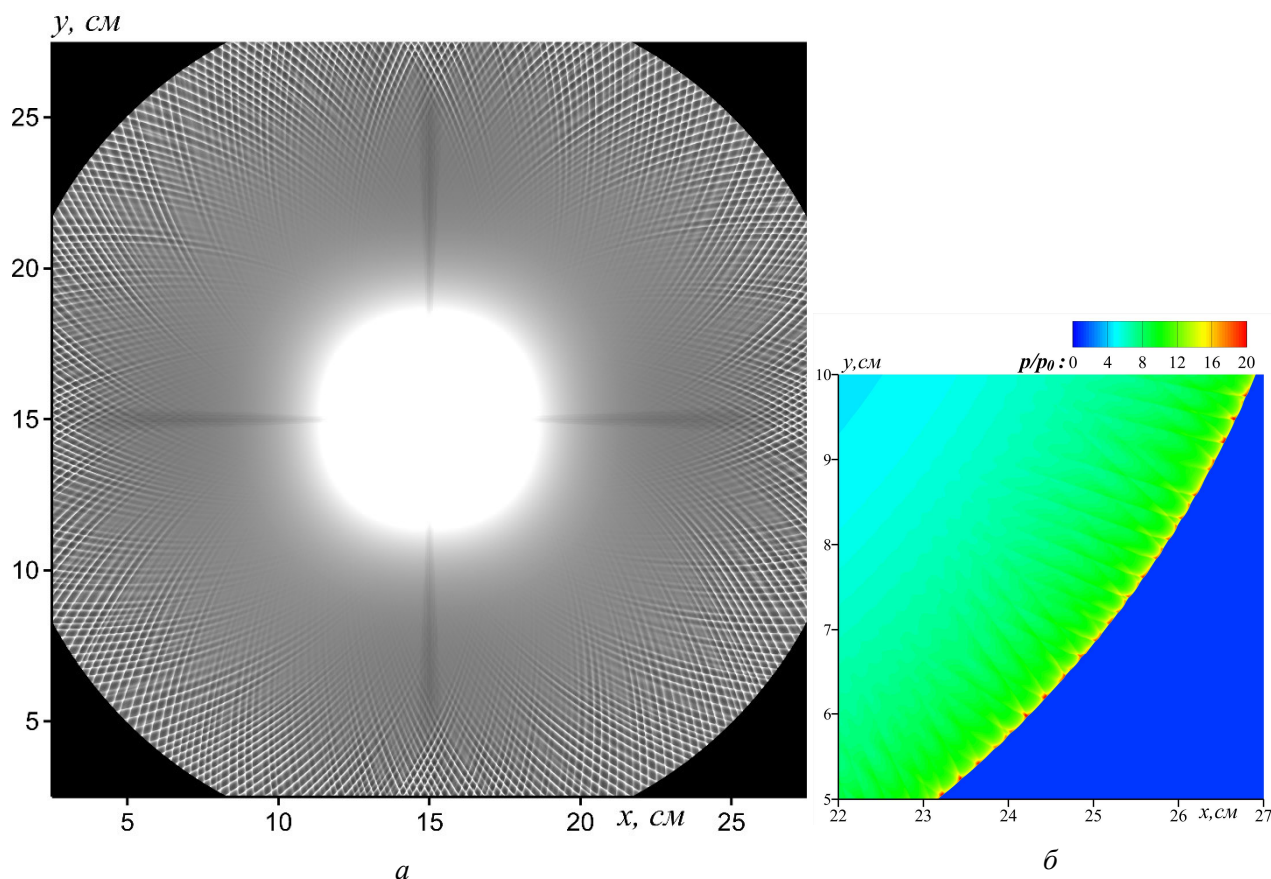


Рис. 2. Расходящаяся цилиндрическая волна в покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смеси с добавками 2.5 %  $O_3$  и 70 %  $Ar$ : *a* – траектории тройных точек; *б* – часть поля давления в момент времени  $t = 0.09$  мс

### 3.2. Распространение цилиндрической детонации во вращающейся смеси

Для оценки влияния вращения чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси на распространяющуюся в ней цилиндрическую волну детонации проведена серия расчетов для различных значений циркуляции вихря  $\Gamma$  и радиуса его ядра  $r_c$ , определяющих параметры газовой смеси перед волной. Графики зависимостей давления и тангенциальной составляющей скорости в начальный момент времени вне области энергоподвода (при  $r > r_0$ ) для некоторых рассмотренных значений параметров вихря представлены на рис. 3.

Рассмотрено влияние циркуляции вихря на детонационное горение смеси при прочих равных условиях. Получено, что существует критическое значение циркуляции –  $\Gamma^*$ , зависящее от радиуса ядра вихря, такое, что при  $\Gamma > \Gamma^*$  распространяющаяся во вращающемся газе детонационная волна подавляется. Увеличение разрушающей способности вихря с ростом циркуляции при прочих равных условиях определяется уменьшением давления и плотности при существенном увеличении тангенциальной составляющей скорости перед расходящейся волной (рис. 3). Так, в случае  $r_c = 0.02$  м при небольшой циркуляции ( $\Gamma = 10$  м<sup>2</sup>/с) влияние вращения смеси на волну детонации незначительное (рис. 4, *a*). Однако увеличение циркуляции до  $\Gamma = 25$  м<sup>2</sup>/с приводит к частичному разрушению детонации с последующим ее

реиницированием, в результате происходит деформация цилиндрического фронта (рис. 4, б). Увеличение циркуляции до  $\Gamma = 40 \text{ м}^2/\text{с}$  полностью подавляет детонационную волну.

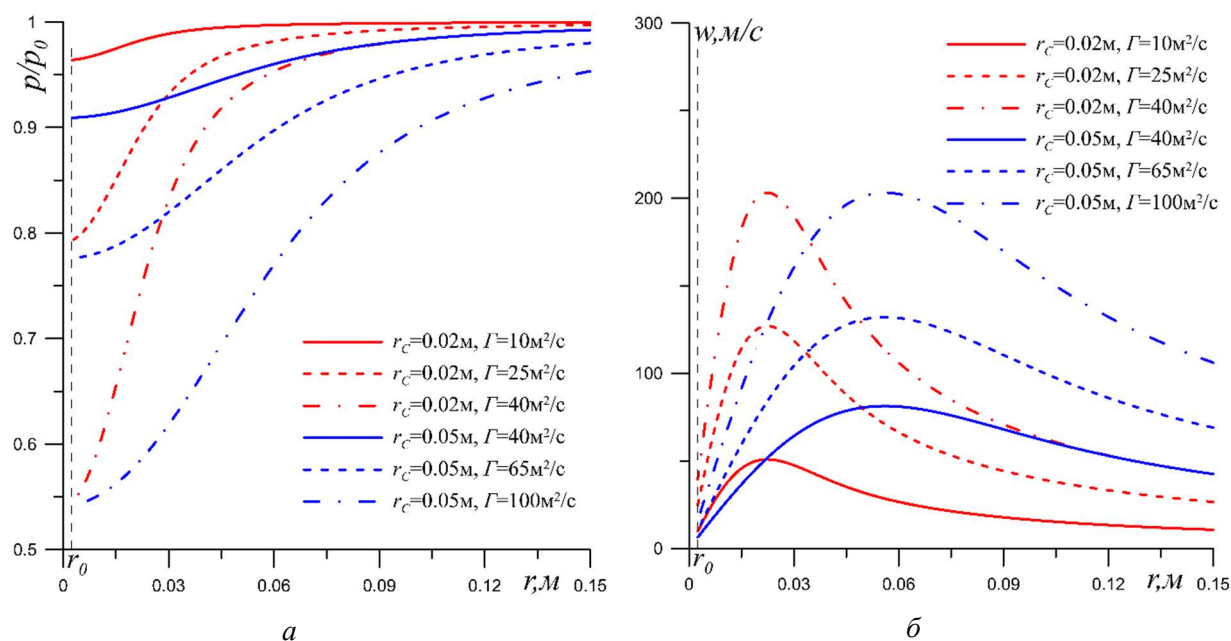


Рис. 3. Графики зависимостей давления (а) и тангенциальной составляющей скорости (б) от расстояния  $r$  до центра области энергоподвода ( $r > r_0$ ) при  $t = 0$  во вращающейся чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси

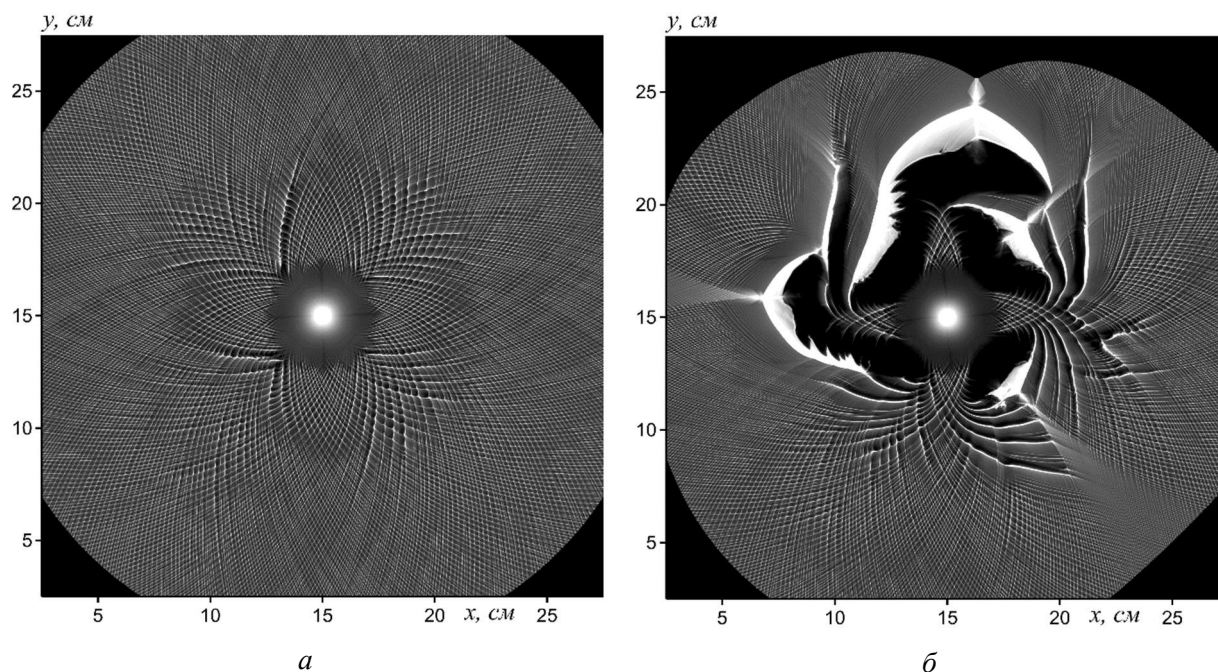


Рис. 4. Цилиндрическая детонация во вращающейся чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси при радиусе ядра вихря  $r_c = 0.02 \text{ м}$ : а – циркуляция вихря  $\Gamma = 10 \text{ м}^2/\text{с}$ ; б –  $\Gamma = 25 \text{ м}^2/\text{с}$

Расчеты показали, что увеличение радиуса ядра при прочих постоянных параметрах приводит к снижению разрушающего воздействия вихря на детонационную волну. Так, вихрь с циркуляцией  $\Gamma = 40 \text{ м}^2/\text{с}$ , подавляющий детонацию в случае  $r_c = 0.02 \text{ м}$ , не

разрушает волну при радиусе ядра  $r_c = 0.05$  м (рис. 5, а). Для гашения детонационного горения в этом случае следует увеличить циркуляцию, например, до  $\Gamma = 65$  м<sup>2</sup>/с (рис. 5, б).

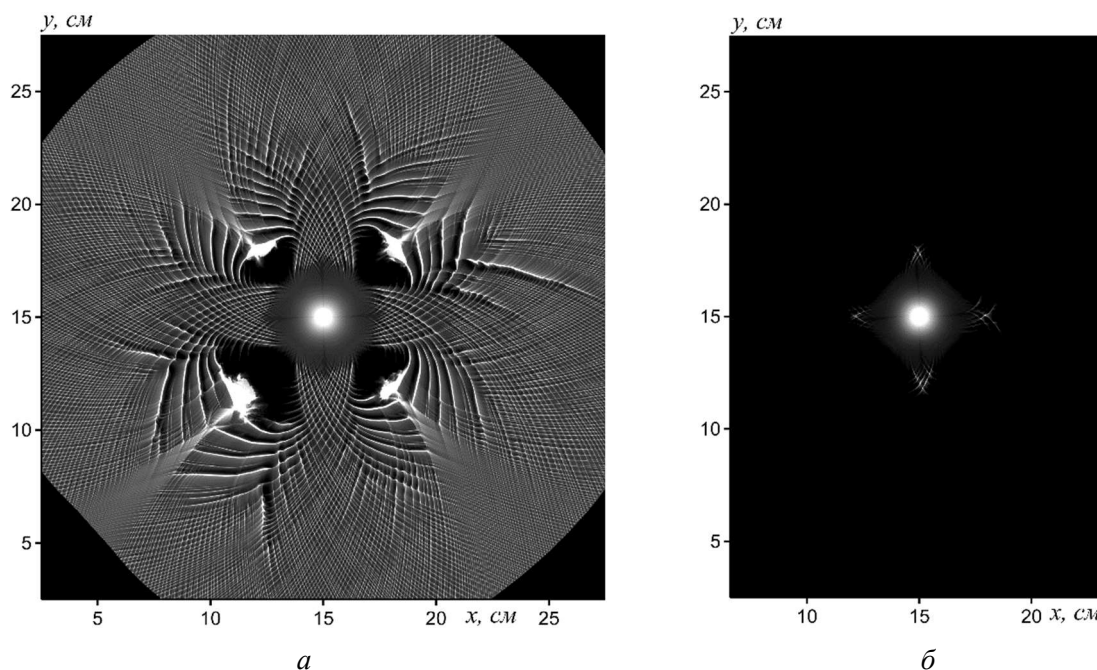


Рис. 5. Цилиндрическая детонация во вращающейся чистой стехиометрической водородно-воздушной смеси при радиусе ядра вихря  $r_c = 0.05$  м: а –  $\Gamma = 40$  м<sup>2</sup>/с (сохранение детонации); б –  $\Gamma = 65$  м<sup>2</sup>/с (подавление детонации)

Внесение добавок озона и аргона в подобранных концентрациях в горючую смесь приводит к более сильному падению давления и температуры в вихре перед фронтом расходящейся волны по сравнению с чистой смесью при тех же значениях циркуляции вихря и радиусе его ядра. Однако наличие добавок повышает устойчивость волны к вращению горючей смеси. Так, при распространении в вихрях с параметрами  $r_c = 0.02$  м,  $\Gamma = 40$  м<sup>2</sup>/с и  $r_c = 0.05$  м,  $\Gamma = 65$  м<sup>2</sup>/с, обеспечивающими гашение детонационного горения в чистой смеси, цилиндрическая волна детонации в смеси с добавками сохраняется (рис. 6).

#### 4. Заключение

Используя детальный кинетический механизм химического взаимодействия, численно исследовано влияние добавок озона и аргона в качестве инертного разбавителя в стехиометрическую водородно-воздушную смесь на параметры расходящейся цилиндрической волны детонации с целью управления детонационным горением.

Установлено, что молярные доли вносимых добавок  $O_3$  и  $Ar$  могут быть подобраны так, что поперечный размер ячейки цилиндрической волны детонации в полученной смеси будет близок к среднему поперечному размеру ячейки в чистой смеси, при этом температура продуктов детонации будет снижена более чем на 30 %.

Рассмотрено распространение цилиндрической детонации во вращающейся горючей смеси. Для моделирования вращения газа использовалось течение, подобное вихрю Бюргера с нулевой радиальной компонентой скорости. Получено, что увеличение циркуляции вихря или уменьшение радиуса его ядра усиливают разрушающее воздействие вихря на волну. Установлено, что внесение добавок озона и аргона в подобранных концентрациях повышают устойчивость расходящейся цилиндрической детонации к вращению горючей смеси.

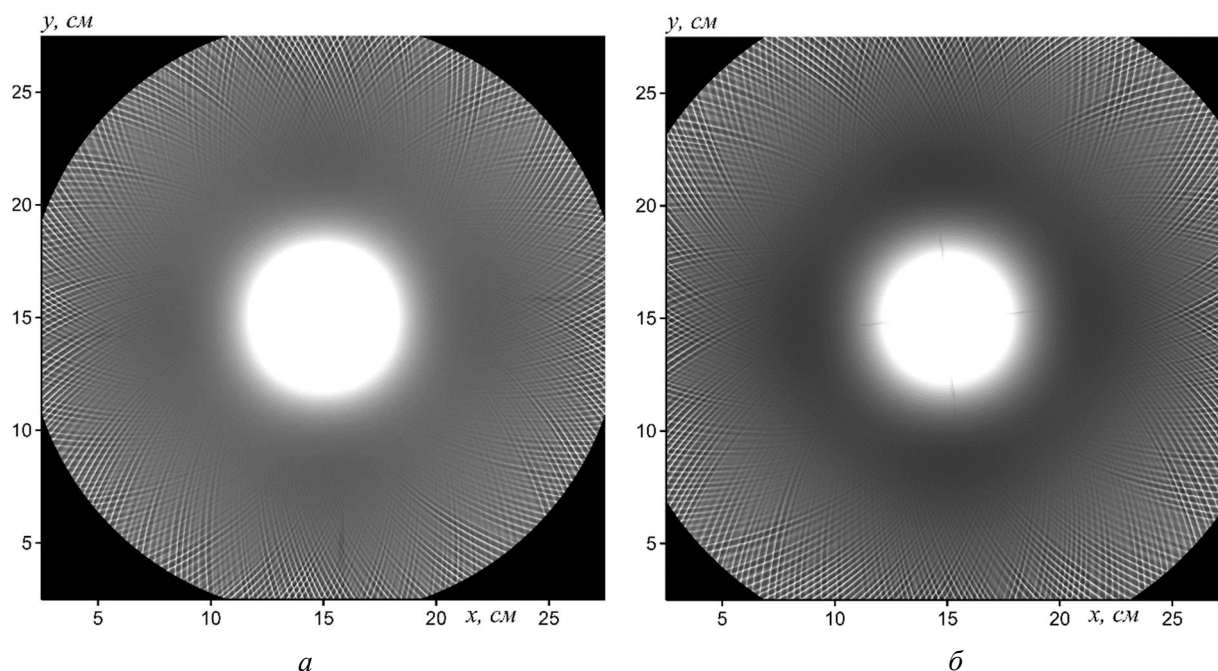


Рис. 6. Цилиндрическая детонация во вращающейся смеси с добавками 2.5 %  $O_3$  и 70 %  $Ar$ :  
 $a - r_c = 0.02$  м,  $\Gamma = 40$  м<sup>2</sup>/с;  $b - r_c = 0.05$  м,  $\Gamma = 65$  м<sup>2</sup>/с

## Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024) на оборудовании Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [23].

## Литература

1. Васильев А.А., Пинаев А.В., Трубицын А.А., Грачёв А.Ю., Троцюк А.В., Фомин П.А., Трилис А. В. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53, № 1. С. 11–18. <https://doi.org/10.15372/FGV20170102>
2. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление положением стабилизированной детонационной волны в сверхзвуковом потоке газовой смеси в плоском канале // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 6. С. 78–85. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.06.44407.16560>
3. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением в высокоскоростном потоке газовой смеси // Труды Математического института им. В.А. Стеклова. 2018. Т. 300. С. 123–134.
4. Levin V.A., Zhuravskaya T.A. The Methods of Control of Stabilized Detonation Location in a Supersonic Gas Flow in a Plane Channel // Combustion Science and Technology. 2023. Vol. 195, Iss. 7. Pp. 1–13. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1557641>
5. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением посредством предварительной подготовки газовой смеси // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46, вып. 4. С. 40–44. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.04.49050.18074>
6. Журавская Т.А., Левин В.А. Управление детонационной волной в канале с препятствиями посредством предварительной подготовки газовой смеси // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2020. № 4. С. 59–68.
7. Cherif M.A., Shcherbanev S.A., Starikovskaia S.M. et al. Effect of non-equilibrium plasma on decreasing the detonation cell size // Combustion and Flame. 2020. Vol. 217. Pp. 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.03.014>

8. Crane J., Shi X., Singh A.V., Tao Y., Wang H. Isolating the effect of induction length on detonation structure: Hydrogen–oxygen detonation promoted by ozone // *Combustion and Flame*. 2019. Vol. 200. Pp. 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.11.008>
9. Левин В.А., Журавская Т.А. Детонационное горение газовой смеси в плоском канале с множественными барьерами // *Горение и плазмохимия*. 2022. Т. 20, № 2. С. 93–101. <https://doi.org/10.18321/cpc533>
10. Shepherd J.E. Detonation in gases // *Proceeding of the Combustion Institute*. 2009. Vol. 32, Iss. 1. Pp. 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.08.006>
11. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением водородно-воздушной смеси посредством внесения аргона и озона // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2021. Т. 501. С. 48–53.
12. Левин В.А., Журавская Т.А. Детонационное горение водородно-воздушной смеси с добавками аргона и озона // *Инженерно-физический журнал*. 2023. Т. 96, № 7. С. 1792–1802
13. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Под ред. В.П. Глушко и др. Т. I. М.: Наука, 1978. 495 с.
14. Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Sharipov A.S., Titova N.S., Starik A.M. Evaluation of Prediction Ability of Detailed Reaction Mechanisms in the Combustion Performance in Hydrogen/Air Supersonic Flows // *Combustion Science and Technology*. 2013. Vol. 185, Iss. 1. Pp. 62–94. <https://doi.org/10.1080/00102202.2012.709562>
15. Журавская Т.А., Левин В.А. Влияние добавок озона / пероксида водорода и гелия на детонационное горение водородно-воздушной смеси // *Физика горения и взрыва*. 2026. Т. 62, № 2. С. 42–52. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80666451>
16. Зудов В.Н. Взаимодействие продольного вихря с прямым скачком уплотнения // *ПМТФ*. 2011. Т. 50, № 5. С. 68–79.
17. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
18. Родионов А.В. Монотонная схема второго порядка аппроксимации для сквозного расчёта неравновесных течений // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1987. Т. 27, № 4. С. 585–593.
19. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. М.: ГИФМЛ, 1963. 176 с.
20. Lee J.H.S. *The Detonation Phenomenon*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 388 p.
21. Pintgen F., Eckett C.A., Austin J.M., Shepherd J.E. Direct observations of reaction zone structure in propagating detonations // *Combustion and Flame*. 2003. Vol. 133(3). Pp. 211–229. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00458-3](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00458-3)
22. Han W., Kong W., Law C.K. Propagation and failure mechanism of cylindrical detonation in free space // *Combustion and Flame*. 2018. Vol. 192. Pp. 295–313. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.01.049>
23. Voevodin V.I., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin V.I., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. 2019. Vol. 6, no. 2. Pp. 4–11. <https://doi.org/10.14529/jsfi190201>

## References

1. Vasil'ev A.A., Pinaev A.V., Trubitsyn A.A., Grachev A.Yu., Trotsyuk A.V., Fomin P.A., Trilis A.V., *Combust. Explos. Shock Waves*, 2017, vol. 53, pp. 8–14. <https://doi.org/10.1134/S0010508217010026>
2. Levin V.A., Zhuravskaya T.A., *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, no. 3, pp. 316–319. <https://doi.org/10.1134/S1063785017030191>

3. Levin V.A., Zhuravskaya T.A., *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 2018, vol. 300, pp. 114–125. <https://doi.org/10.1134/S0081543818010091>
4. Levin V.A., Zhuravskaya T.A., *Combustion Science and Technology*, 2023, vol. 195, no. 7, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1557641>
5. Levin V.A., Zhuravskaya T.A., *Tech. Phys. Lett.*, 2020, vol. 46, no. 2, pp. 189–192. <https://doi.org/10.1134/S1063785020020248>
6. Zhuravskaya T.A., Levin V.A., *Fluid Dyn.*, 2020, vol. 55, pp. 488–497. <https://doi.org/10.1134/S0015462820040138>
7. Cherif M.A., Shcherbanev S.A., Starikovskaia S.M., Vidal P., *Combustion and Flame*, 2020, vol. 217, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.03.014>
8. Crane J., Shi X., Singh A.V., Tao Y., Wang H., *Combustion and Flame*, 2019, vol. 200, pp. 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.11.008>
9. Levin V.A., Zhuravskaya T.A., *Combustion and Plasma Chemistry*, 2022, vol. 20, no. 2, pp. 93–101. <https://doi.org/10.18321/cpc533>
10. Shepherd J.E., *Proceeding of the Combustion Institute*, 2009, vol. 32, no. 1, pp. 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.08.006>
11. Levin V.A., Zhuravskaya T.A., *Doklady Physics*, 2021, vol. 66, pp. 320–324. <https://doi.org/10.1134/S1028335821110057>
12. Levin V. A., Zhuravskaya T. A., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023, vol. 96, pp. 1759–1768. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02846-2>
13. *Thermodynamic Properties of Individual Substances*, Ed. by L.V. Gurvich and I.V. Veyts, vol. 1, Part 2. New York: Hemisphere, 1989.
14. Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Sharipov A.S., Titova N.S., Starik A.M., *Combustion Science and Technology*, 2013, vol. 185, no. 1, pp. 62–94. <https://doi.org/10.1080/00102202.2012.709562>
15. Zhuravskaya T. A., Levin V. A., *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2026, vol. 62, no. 2, pp. 223–231. <https://doi.org/10.1134/S0010508226700048>
16. Zudov V.N. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2011, vol. 52, pp. 734–743. <https://doi.org/10.1134/S0021894411050075>
17. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Kraiko A.N., Prokopov G.P., *Numerical Solution of Multidimensional Problems of Gas Dynamics*, Moscow: Nauka, 1976. 400 p. [in Russian].
18. Rodionov A.V., *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1987, vol. 27, no. 2, pp. 175–180. [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(87\)90174-1](https://doi.org/10.1016/0041-5553(87)90174-1)
19. Soloukhin R.I., *Shock Waves and Detonations in Gases*, Baltimore: Mono Book, 1966.
20. Lee J.H.S., *The Detonation Phenomenon*, Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 388 p.
21. Pintgen F., Eckett C.A., Austin J.M., Shepherd J.E., *Combustion and Flame*, 2003, vol. 133, no. 3, pp. 211–229. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00458-3](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00458-3)
22. Han W., Kong W., Law C.K., *Combustion and Flame*, 2018, vol. 192, pp. 295–313. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.01.049>
23. Voevodin V.I., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin V.I., Zhumatiy S., *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 4–11. <https://doi.org/10.14529/jsfi190201>

Статья поступила в редакцию 27 июля 2026 г.