

---

---

**ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ  
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

---

---

УДК 544.454.3

*Светлой памяти А.А. Борисова посвящается*

**КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ ПЛОСКОЙ  
ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ**

© 2019 г. В. Н. Михалкин<sup>1</sup>, С. П. Медведев<sup>1</sup>, А. Е. Маилков<sup>1</sup>, С. В. Хомик<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия*

*\*E-mail: sergei.khomik@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.03.2019;

после доработки 15.03.2019;

принята в печать 20.03.2019

Экспериментально определены критические условия трансформации плоской детонационной волны в цилиндрическую. Для кислородных смесей водорода и метана установлены геометрические условия инициирования детонации в цилиндрическом зазоре при различных диаметрах выхода плоской детонационной волны. Для выявления особенностей наблюдаемых взрывных процессов проведен анализ результатов двухмерного численного моделирования.

*Ключевые слова:* детонация, критические условия инициирования, плоская детонационная волна, цилиндрический зазор.

**DOI:** 10.1134/S0207401X19080107

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование инициирования и распространения детонации в газовых смесях вблизи пределов занимает значительное место в работах многих авторов. Это обусловлено не только необходимостью этих исследований для понимания фундаментальных закономерностей процесса детонации, но и большой практической важностью получаемых данных. Несмотря на широкое развитие численных методов моделирования газодинамических процессов с химическими реакциями, расчеты нестационарных процессов при околопредельных значениях условий возникновения и развития детонации не всегда способны представить реальную картину процесса и позволить сделать правильные выводы о его возможном воздействии на окружающую среду.

В работах проф. А.А. Борисова, его учеников и коллег, выполненных на протяжении последних десятилетий, регулярно приводились данные экспериментального определения околопредельных значений условий, в том числе геометрических, определяющих возникновение и распространение детонации в реакционноспособной смеси газов. Характерной особенностью этих работ являлось непосредственное экспериментальное определение геометрических параметров, и уже потом, если это представлялось возможным, поиск корреляций с размером детонационной ячейки  $\lambda$ . Большое внимание уделялось важным с практи-

ческой точки зрения смесям горючих газов с воздухом при нормальных начальных условиях, исследования которых более трудоемки, как в силу больших масштабов установок, в отличие от кислородных смесей, так и за счет особенностей реагирования, обусловленных наличием большого количества инертного разбавителя. В то же время нельзя отрицать необходимость исследования кислородных смесей для более оперативного получения необходимых закономерностей и последующего распространения полученных выводов на смеси с воздухом. В этих работах:

1) экспериментально определены критические диаметры распространения детонации топливо-воздушных смесей в цилиндрических каналах и зарегистрированы области нестационарных режимов, включая галопирующий, вблизи предела [1]. Там же для труб со спиралью Шелкина получено, что при переходе из шероховатой трубы в гладкую восстановление детонации происходит в более узких пределах, чем пределы детонации в гладкой трубе;

2) в работе [2, стр. 1360] при непосредственном участии акад. Я.Б. Зельдовича показано, что при распространении взрывных процессов в шероховатых трубах возможен квазидетонационный режим "...со скоростью, намного меньшей разрешенного по условиям протекания химических реакций диапазона скоростей детонации в гладких трубах...";

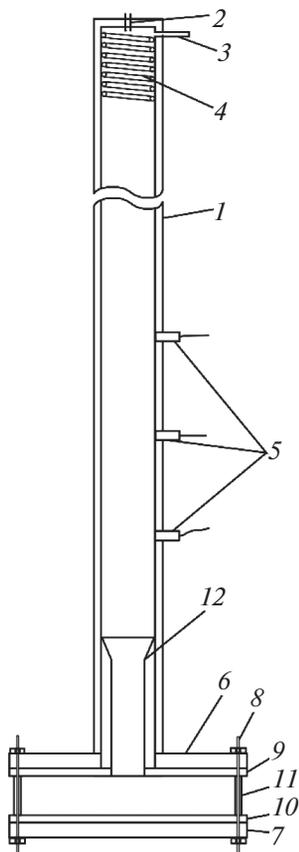


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

3) экспериментально определена минимальная энергия инициирования детонации одномерных каналах различными источниками в [3];

4) создана оригинальная, защищенная авторским свидетельством, методика [4] и с ее помощью определены критические диаметры распространения детонации в свободном газовом заряде [5];

5) получены критические условия распространения детонации по топливовоздушным смесям в плоских каналах [6].

На практике широко встречается и в течение длительного времени исследуется дифракция детонационной волны (ДВ). Этот процесс является нестационарным с химической реакцией происходящей при резком изменении размера или формы заряда газовой смеси, по которому распространяется ДВ. Достаточно полный обзор работ по дифракции ДВ представлен в работе [7]. Реинициирование детонации после выхода из канала в цилиндрический зазор, расположенный перпендикулярно каналу, исследовалось ранее в работах [8–10] на примере смесей ацетилен–кислород при пониженном начальном давлении. В работе [9] отмечено существование оптимального для реинициирования расстояния от среза канала до проти-

воположной ему стенки зазора. В работе [10] установлено, что предельная для распространения цилиндрической детонации высота зазора составляет примерно один поперечный размер детонационной ячейки.

Цель данной работы — экспериментальное определение критических условий, при которых плоская ДВ трансформируется в цилиндрическую. Для этого в работе решается задача по определению геометрических условий инициирования детонации в цилиндрическом зазоре при различных диаметрах выхода плоской ДВ для кислородных смесей водорода и метана. Интерпретация полученных соотношений предельных размеров проведена с использованием результатов численного моделирования в двухмерной постановке.

### МЕТОДИКА И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Установка состоит из стальной трубы (1) внутренним диаметром 32 мм и длиной 2 м, установленной вертикально. У закрытого торца трубы располагаются электроды для инициирования взрывного процесса (2), в стенке трубы у торца с электродами находится ввод газовой коммуникации (3) для подачи горючей смеси из смесителя (на рис. 1 не указан). Для сокращения преддетонационного расстояния у закрытого торца трубы размещена спираль Шелкина (4). Скорость процесса контролируется по времени прохождения ДВ мимо датчиков давления (5). На противоположном торце инициирующей трубы (1) располагается фланец (6) диаметром 200 мм, параллельно которому установлен второй фланец (7). Этот фланец крепится с помощью четырех шпилек (8), на которые надеваются тарированные втулки (11), обеспечивающие параллельность фланцев. Втулки также позволяют изменять расстояние между фланцами (ширину цилиндрического зазора) и фиксировать на фланце (7) покрытые сажей пластины (10) для регистрации следовых отпечатков.

Для изменения диаметра выхода детонации из трубы в зазор в инициирующей трубе устанавливали вставки (12), внутренний диаметр которых составлял 21,5, 15 и 10 мм. Заполнение трубы горючей смесью осуществляли посредством продувки ее десятикратным объемом подготовленной в смесителе по парциальным давлениям компонентов. Исследования проводили при атмосферном давлении и комнатной температуре. Использовали стехиометрические смеси водород–кислород и метан–кислород.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены результаты экспериментов в нормированных на величину критического

диаметра выхода детонации из трубы в объем величинах. На графике по оси ординат представлено отношение диаметра выходного отверстия из инициирующей трубы к критическому диаметру выхода детонации из трубы в объем ( $d/d_{cr}$ ), а по оси абсцисс — отношение расстояния между фланцами, т.е. ширины зазора к критическому диаметру выхода детонации из трубы в объем ( $h/d_{cr}$ ). Также на графике показаны результаты из работ [8, 9] для стехиометрической смеси ацетилен—кислород. Штриховой линией обозначена граница, разделяющая области инициирования детонации в зазоре и затухающего взрывного процесса.

Видно, что существует минимум при значении отношения  $d/d_{cr} \approx 0.5$  и при величине  $h/d_{cr} = 0.5$ . Таким образом, на примере смесей водорода, ацетилена и метана с кислородом показано, что оптимальная для перехода детонации из трубы в перпендикулярно установленный цилиндрический зазор ширина зазора составляет половину критического диаметра выхода детонации из трубы в объем для данной горючей смеси.

На основании уже упоминавшихся результатов [10] и данных по выходу детонации из трубы в объем, в плоскости изображенных на рис. 2 параметров возможно существование, по крайней мере, двух асимптот. Первая располагается вертикально и соответствует минимальной ширине цилиндрического зазора. Полагая, что  $d_{cr} \approx 13 \lambda$ , эта асимптота расположится на расстоянии  $1/13$  от оси ординат. Из рис. 2 видно, что при приближении величины зазора к этой величине справа, диаметр трубы, из которой выходит ДВ, должен увеличиваться. Так же и в ситуации правее точки минимума — при увеличении ширины зазора происходит увеличение диаметра трубы, из которой выходит ДВ, необходимое для инициирования детонации в зазоре. Данное увеличение естественным образом ограничено горизонтальной асимптотой, равной диаметру выхода из трубы в объем. В случае, представленном на рис. 2, это соответствует условию  $d/d_{cr} = 1$ .

В принципе, в плоскости используемых безразмерных параметров существуют три области, разделенные вертикальными прямыми при  $h/d_{cr} = 1/13$  и  $h/d_{cr} = 0.5$ , в которых реализуются различные механизмы инициирования детонации в зазоре. В крайней левой области инициирование невозможно из-за отсутствия условий образования поперечных волн [10]. В крайней правой области при  $h/d_{cr} > 0.5$  инициирование происходит по механизмам, характерным для выхода детонации из трубы в объем в случаях смесей с регулярной и нерегулярной структурами [11]. В третьей области при  $1/13 < h/d_{cr} < 0.5$  с уменьшением величины зазора изменяется картина отражения и дифракции детонационной волны, выходящей из инициирующей трубы, что требует увеличения диаметра

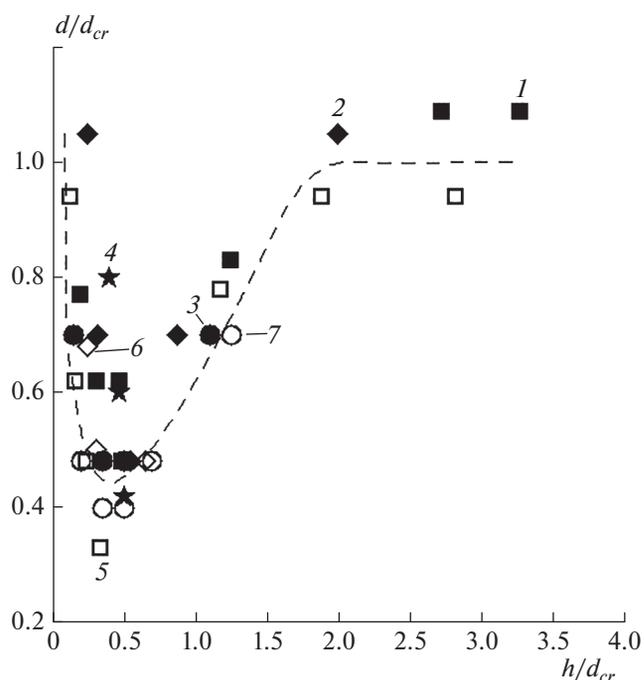


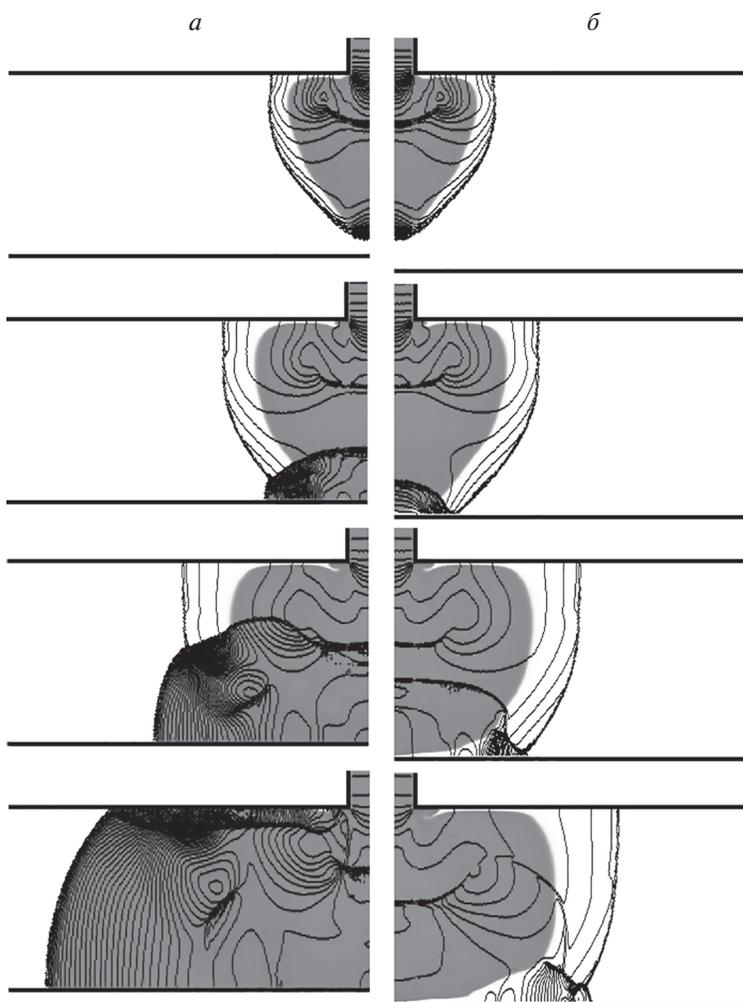
Рис. 2. Зависимость диаметра выхода детонации из трубы в цилиндрический зазор от его ширины: точки 1–4 — переход детонации в зазор, 5–7 — затухающий взрывной процесс; 1, 5 — смесь ацетилен—кислород [9]; 4 — смесь ацетилен—кислород [8]; 2, 6 — смесь водород—кислород; 3, 7 — смесь метан—кислород.

инициирующей трубы больше критического диаметра выхода детонации из трубы в объем для данной смеси.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Численное моделирование трансформации плоской детонационной волны в цилиндрическую позволяет выявить особенности процесса, экспериментальное определение которых затруднено. Максимально приближенные к реальности модели должны адекватно описывать трехмерную структуру фронта детонационной волны и процессы инициирования детонации в сложных геометрических условиях. Несмотря на бурное развитие численных методов, решение поставленной задачи в трехмерной постановке может представлять сложность из-за неоправданно высоких затрат компьютерных мощностей. В работе проведен анализ результатов 2D-моделирования, который при очевидных ограничениях, тем не менее, может принести определенную пользу для выявления механизма трансформации плоской детонационной волны в цилиндрическую.

Численное моделирование выполнено с использованием пакета газодинамических расчетов



**Рис. 3.** Развитие взрывных процессов при различной ширине зазора: *a* – инициирование детонации; *б* – затухающий взрывной процесс. Ось симметрии: *a* – справа, *б* – слева. Время между кадрами – 20 мкс, изолинии давления – через 0.1 МПа, затененные области – продукты сгорания.

GAS DYNAMICS TOOL (GDT) [12]. В GDT с помощью модифицированного метода крупных частиц реализована процедура решения уравнений Навье–Стокса с учетом процессов переноса и тепловыделения в результате химической реакции. Апробация пакета проведена на задачах взаимодействия детонационных и ударных волн с проницаемыми преградами [13, 14] и плоскими каналами [6]. Объектом моделирования была стехиометрическая смесь пропан–кислород. Предполагали, что газ – вязкий и теплопроводный. Скорость реакции окисления описывается зависимостью от температуры аррениусовского вида через относительные массовые концентрации топлива [F] и окислителя [O]:

$$k = A[F]^n[O]^m \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right). \quad (1)$$

Параметры в (1) задавали на основе сравнения с задержкой самовоспламенения исследуемой сме-

си, рассчитанной по детальному реакционному механизму [15, 16]. Для смеси  $C_3H_8 + 5O_2$  при нормальных условиях –  $T_a = 2300$  К,  $A = 2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ ,  $n = 1$ ,  $m = 3.63$ . Моделирование проводили в двухмерной постановке на прямоугольной и неадаптивной сетке с размером ячейки 0.2 мм.

На первом этапе расчетов для исследуемой модельной смеси определены критические условия инициирования детонации при выходе детонационной волны из плоского канала длиной 400 мм в полуограниченный объем. Для инициирования ДВ на левой границе расчетной области задавали одномиллиметровый слой повышенной температуры и давления. Полученная расчетным путем критическая ширина канала (аналог критического диаметра выхода детонации из трубы в объем) составила  $d_{cr} = 19$  мм. На втором этапе расчетов моделировали взрывные явления, возникающие при размещении в расчетной области плоской отража-

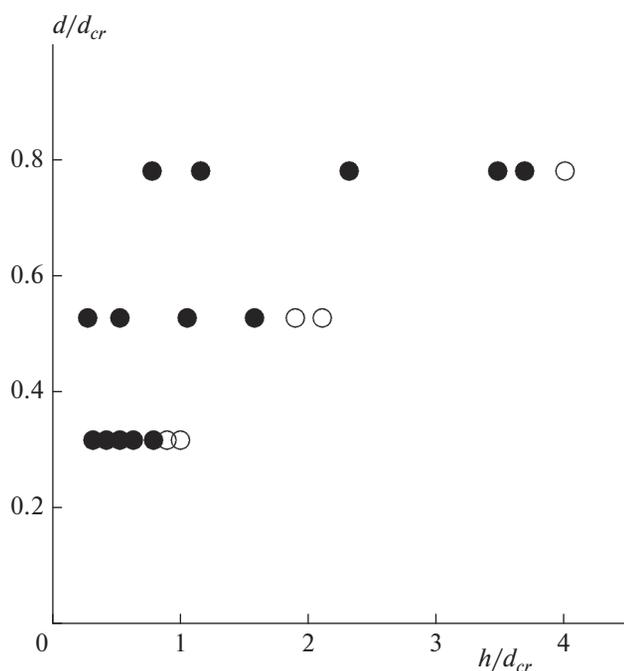


Рис. 4. Результаты расчетов: 1, ● — инициирование детонации в зазоре, 2, ○ — затухающий взрывной процесс.

ющей поверхности на различных расстояниях  $h$  от среза канала. На рис. 3 представлены результаты расчетов в виде изолиний давления совместно с продуктами сгорания при  $d = 14.8$  мм. Расчеты показывают, что при выходе детонации в полуограниченный объем имеет место прогрессирующее разделение фронта ударной волны и зоны горения. При этом, как и следует ожидать, на оси симметрии детонационные параметры волны сохраняются достаточно долго вплоть до достижения расстояния порядка  $4d$ . Как видно, в случае  $h = 70$  мм (рис. 3а) при отражении инициируется детонационная волна, которая распространяется в негоревшей смеси одновременно вдоль и поперек зазора. При увеличении ширины зазора до  $h = 76$  мм (рис. 3б) интенсивность отраженной волны оказывается недостаточной для воспламенения и детонация не инициируется.

На рис. 4 представлена сводка результатов расчетов в координатах аналогичных координатам рис. 2. Несмотря на существенные отличия расчетной плоской геометрии от цилиндрической симметрии в экспериментах, эффект инициирования детонации в зазоре при  $d < d_{cr}$  воспроизводится. Полученные расчетным путем критические для инициирования детонации величины ширины зазора полезно рассмотреть совместно с зависимостями скорости фронта взрывного процесса (ударной или детонационной волны)  $U_S$  от расстояния  $h$  при  $d < d_{cr}$ , как это сделано на рис. 5. Вертикальные пунктирные линии на рис. 5 соот-

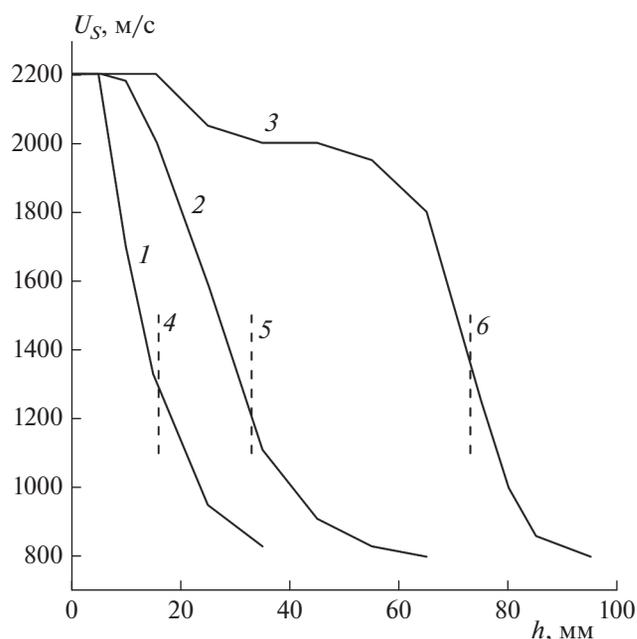


Рис. 5. Расчетное изменение скорости фронта взрывного процесса при выходе ДВ из канала в объем: ширина канала  $d$ , мм: 1 — 6, 2 — 10, 3 — 14.8 мм; критическая ширина зазора, мм: 4 — 16, 5 — 33, 6 — 73.

ветствуют переходу от инициирования детонации в зазоре к затухающему взрывному процессу. Как видно из рис. 5, детонация не инициируется при снижении  $U_S$  до величин порядка 1200–1400 м/с, что соответствует 0.55–0.65 скорости детонации Чепмена–Жуге.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально определена граница, разделяющая области инициирования детонации в зазоре и затухающего взрывного процесса на плоскости нормированных на критический диаметр выхода из трубы в объем диаметра канала и ширины зазора. Показано, что для кислородных смесей водорода, ацетилен и метана эта граница не зависит от вида горючего. Расчетным путем определены критические по скорости фронта взрывного процесса условия инициирования детонации. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов организации процесса импульсно-детонационного горения газовых и гетерогенных систем.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Российской академии наук на 2013–2020 гг. по теме ИХФ РАН № 49.23 (номер государственной регистрации ЦИТИС АААА-А18-118031590088-8).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Лобань С.А., Маилков А.Е., Хомик С.В. // Хим. физика. 1982. № 6. С. 848.
2. Зельдович Я.Б., Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Хомик С.В., Маилков А.Е. // Докл. АН СССР. 1984. Т. 274. № 6. С. 1359.
3. Borisov A.A., Khomik S.V., Mikhalkin V.R., Saneev E.V. // Prog. in Astronautics and Aeronautics Dynamics of Detonations and Explosions: Detonations. N.Y.: AIAA, 1989. V. 133. P. 142.
4. Борисов А.А., Михалкин В.Н., Хомик С.В. Устройство для определения критического диаметра распространения газовой детонации в свободном цилиндрическом заряде: А.с. 1396765. СССР.
5. Борисов А.А., Михалкин В.Н., Хомик С.В. // Докл. АН СССР. 1987. Т. 296. № 1. С. 88.
6. Хомик С.В., Медведев С.П., Борисов А.А., Михалкин В.Н., Максимова О.Г. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 4. С. 48.
7. Васильев А.А., Васильев В.А. // Инж.-физ. журн. 2010. Т. 83. № 6. С. 1111.
8. Murray S.B., Lee J.H. // Combust. Flame. 1983. V. 52. P. 269.
9. Smolinska A., Khasainov B., Virof F., Desbordes D., Presles H.-N. et al. // Proc. 4th European Combust. Meeting. Vienna, Austria. 2009. P. 214.
10. Ng H.D., Wang J., Lee J.H.S. // Proc. 25th ICDERS. Leeds, UK. 2015.
11. Lee J.H.S. The Detonation Phenomenon. Cambridge (NY, США): Cambridge University Press, 2008.
12. Зибаров А.В. Пакет прикладных программ GAS DYNAMICS TOOL и его применение в задачах численного моделирования газодинамических процессов. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Тула: 2000.
13. Медведев С.П., Хомик С.В., Гельфанд Б.Е. // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 12. С. 52.
14. Хомик С.В., Медведев С.П., Вейссьер Б. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2014. № 8. С. 1666.
15. Агафонов Г.Л., Тереза А.М. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 2. С. 49.
16. Tereza A.M., Nazarova N.V., Smirnov V.N. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1147. P. 012043.