

## УПРАВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДВУХТОПЛИВНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ МЕТАНА И ОКСИ УГЛЕРОДА С ВОДОРОДОМ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

*Фомин П.А., Тетервова И.В.*

*Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск*

**Ключевые слова:** детонация, двухтопливная смесь, метан, окись углерода, водород, детонационная ячейка, начальная температура.

**Аннотация.** Рассмотрен метод управления параметрами и структурой детонации двухтопливных газовых смесей посредством изменения начальной температуры. Рассчитана зависимость размера детонационной ячейки от начальной температуры при вариации относительной концентрации горючих компонент. Расчетные значения отличаются от экспериментальных в несколько раз, что обусловлено выбором модели и является допустимым.

## CONTROL OF DETONATION CHARACTERISTICS OF TWO-FUEL GAS MIXTURES OF METHANE AND CARBON MONOXIDE WITH HYDROGEN BY CHANGING THE INITIAL TEMPERATURE

*Fomin P.A., Tetervova I.V.*

*Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk*

**Keywords:** detonation, two-fuel mixture, methane, hydrogen, detonation cell, initial temperature.

**Abstract.** A method for detonation parameters and structure control of dual-fuel gas mixtures of methane and carbon oxide with hydrogen by changing the initial temperature is considered. The dependence of the detonation cell size on the initial temperature with a variation in the relative concentration of combustible components is calculated. The calculated values differ from the experimental ones several times, which is due to the choice of the model and is acceptable.

Детонационное сгорание газов используется в ряде важных технических устройств и технологий: двигателях на вращающейся детонации, установках по детонационно-газовому нанесению порошковых покрытий и оборудовании по утилизации органических отходов ультраперегретым в детонационной волне паром. В качестве перспективных горючих для этих целей рассматриваются метан и окись углерода. Они дешевы и относительно пожаро- и взрывобезопасны, а продукты детонационного сгорания их стехиометрических смесей с воздухом не представляют серьезной угрозы с точки зрения загрязнения окружающей среды. В то же время метан и окись углерода характеризуются низкой детонационной чувствительностью (имеют большой поперечный размер детонационной ячейки  $a_0$ ), что влечет за собой трудности инициирования детонационной волны и вынуждает использовать большие размеры камер, в которых осуществляется детонационное сгорание. Большой размер ячейки может приводить к увеличению геометрических размеров детонационных двигателей и установок по детонационному напылению и проблемам инициирования детонационной волны. Для решения данной проблемы метан и окись углерода разбавляются легко детонируемым водородом, что позволяет существенно

уменьшать размер детонационной ячейки и оптимизировать параметры технических устройств.

В настоящей работе рассмотрен еще один способ управления детонационными характеристиками рассматриваемых двухтопливных смесей. Он заключается в изменении начальной температуры газа. Сделаны оценки зависимости  $a_0$  от начальной температуры  $T_0$  в стехиометрических смесях  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-воздух}$  и  $\text{CO-H}_2\text{-воздух}$  при различных соотношениях между горючими. Отметим, что сам по себе факт влияния  $T_0$  на параметры газовой детонации известен очень давно. В то же время вариация начальной температуры в качестве возможного способа управления детонационными характеристиками рассматриваемых бинарных смесей ранее не рассматривалась.

Для оценки  $a_0$  использована модель детонационной ячейки [1]. Согласно этой модели  $a_0$  определяется энергией активации периода индукции, скоростью одномерной стационарной детонации Чепмена-Жуге (Ч.-Ж.), температурой и величиной периода индукции за ее передним ударным фронтом:

$$a_0 = 1.4 \frac{E_\Sigma}{RT_{SW}} D \tau_{SW},$$

где  $D$  – скорость детонации Ч.-Ж., индекс  $SW$  соответствует параметрам в пике Неймана,  $T$  – температура,  $\tau$  – период индукции,  $E_\Sigma$  – энергия активации в аррениусовской формуле для расчета  $\tau$ ,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Величина  $\tau$  для смесей  $\xi\text{H}_2 + (1 - \xi)\text{CH}_4 + (2 - 1.5\xi)(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2)$  и  $\xi\text{H}_2 + (1 - \xi)\text{CO} + 0.5(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2)$  рассчитывалась по формулам, аналогичным [2]:

$$\tau = \tau_{\text{H}_2}^\xi \tau_j^{1-\xi},$$

где  $j$  соответствует  $\text{CH}_4$  или  $\text{CO}$ . Периоды индукции в однотопливных смесях водорода, метана и окиси углерода с воздухом имеют одинаковый по структуре вид [3, 4]:

$$\tau_i = A_i e^{E_i/RT} \frac{1}{[\text{O}_2]},$$

где  $i$  относится к  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$ ,  $[\text{O}_2]$  – концентрация кислорода в смеси.

Параметры детонации Ч.-Ж. рассчитывались по компьютерному коду [5].

На первой серии графиков на рисунке 1 представлен расчет зависимости размера детонационной ячейки в стехиометрической смеси метана и водорода с воздухом от начальной температуры при различных соотношениях между горючими:  $\text{CH}_4 + 2.5\text{O}_2$  (рис. 1,а),  $0.2\text{H}_2 + 0.8\text{CH}_4 + 1.7(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2)$  (рис. 1,б),  $0.8\text{H}_2 + 0.2\text{CH}_4 + 0.8(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2)$  (рис. 1,с),  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$  (рис. 1,д). Во второй серии графиков на рисунке 1 представлен расчет зависимости размера детонационной ячейки в стехиометрической смеси метана и водорода с воздухом от начальной температуры при различных соотношениях между горючими:  $0.95\text{CO} + 0.05\text{O}_2 + 0.5(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2)$  (рис. 1,е),  $0.3\text{H}_2 + 0.7\text{CO} + 0.5(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2)$  (рис. 1,ф),  $0.8\text{H}_2 + 0.2\text{CO} + 0.5(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2)$  (рис. 1,г).

Начальная температура в расчетах не превышала температуру самовоспламенения отдельных компонент. Жирные окружности – экспериментальные данные [6], точки – настоящий расчет. Экспериментальные данные по зависимости  $a_0$  от  $T_0$  в литературе отсутствуют.

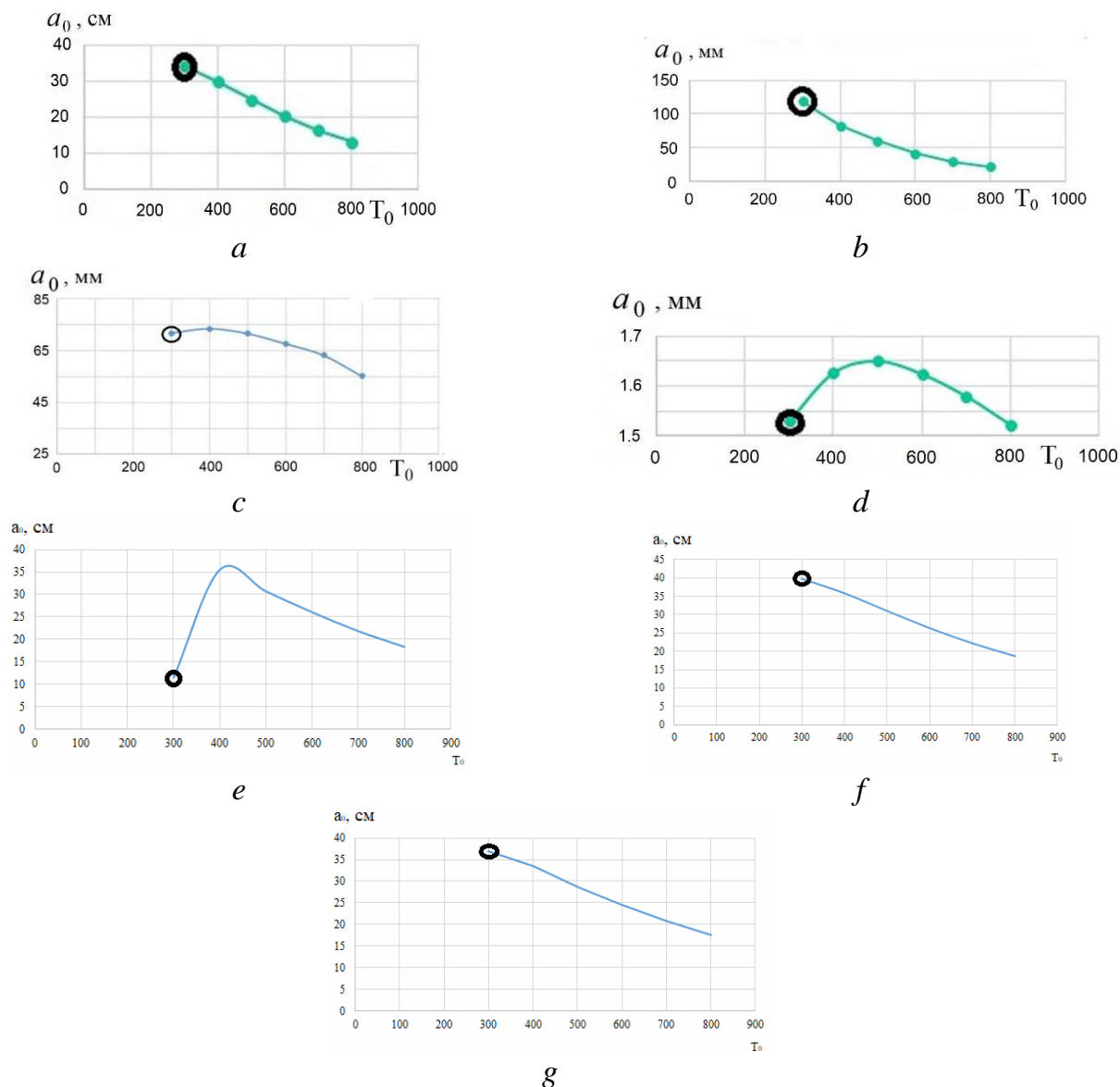


Рис. 1. Зависимость размера ячейки от начальной температуры в различных соотношениях горючего

Экспериментальные данные по зависимости  $a_0$  от  $T_0$  для рассматриваемых двухтопливных смесей в литературе отсутствуют. Из рисунка видно, что при увеличении концентрации водорода в смеси монотонное уменьшение размера ячейки при росте  $T_0$  (рис. 1, *a, b*) сменяется U-образной зависимостью, выпуклой вверх (рис. 1, *c*). Величина  $a_0$  в расчетах, соответствующих рисункам 1, *a, b*, уменьшается на порядок, что соответствует уменьшению энергии прямого инициирования детонационной волны, пропорциональной кубу размера ячейки [1], на три порядка. U-образная зависимость  $a_0$  от  $T_0$  при значительной концентрации водорода (рис. 1, *c, d*) особой практической роли не играет, поскольку для технических устройств, использующих детонационное сгорание метана, актуальны лишь небольшие добавки водорода.

### Список литературы

1. Николаев Ю.А., Васильев А.А., Ульяницкий В.Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 22-54.

2. Cheng R.K., Oppenheim A.K. Autoignition in methane-hydrogen mixtures // *Combustion and Flame*. 1984, vol. 58, pp. 125-139.
3. Троцюк А.В., Фомин П.А. Моделирование ячеистой структуры детонационной волны в стехиометрической двухтопливной смеси синтез-газа с окислителем // *Горение и взрыв*. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 47-56.
4. Fomin P.A., Trotsyuk A.V., Vasil'ev A.A. Approximate model of chemical reaction kinetics for detonation processes in mixture of CH<sub>4</sub> with Air // *Combustion Science and Technology*. 2014, vol. 186, no. 10-11, pp. 1716-1735.
5. The NASA Computer program CEARUN (Chemical Equilibrium with Applications) [Electronic resource]. – Access mode: <https://cearun.grc.nasa.gov/index.html>.
6. Bozier O., Sorin R., Virot F., Desbordes D. Detonability of binary H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>-Air mixtures // 3<sup>rd</sup> International Colloquium on Hydrogen Safety, Ajaccio, France, 2009, paper id 188.

Сведения об авторах:

*Фомин Павел Аркадьевич* – д.ф.-м.н., профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии;

*Тетервова Ирина Вадимовна* – студентка.