

*П. А. Фомин<sup>1\*</sup>, И. В. Тетервова<sup>1</sup>*

## **Изменение размера детонационной ячейки в бинарной метано-водородной смеси при вариации начальной температуры**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: kaf.suit@ssga.ru

**Аннотация.** Проанализирован способ управления размером детонационной ячейки бинарной метано-водородной смеси посредством вариации начальной температуры. Показано, что качественная зависимость размера детонационной ячейки от начальной температуры меняется при изменении относительной доли горючих компонент. Пусть концентрация водорода в смеси растет. Тогда монотонное уменьшение размера ячейки при росте начальной температуры сменяется *U*-образной зависимостью, выпуклой вверх. Подобный эффект может быть полезен при оптимизации параметров технических устройств, основанных на детонационном сжигании метано-водородной смеси и оценке возможности транспортирования газообразного водорода по существующей газотранспортной системе в качестве небольших добавок к природному газу.

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

*P. A. Fomin<sup>1\*</sup>, I. V. Tetervova<sup>1</sup>*

## **Influence of Initial Temperature on the Detonation Cell Size of a Two-Fuel Gas Mixture of Methane and Hydrogen**

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: kaf.suit@ssga.ru

**Abstract.** A method for control of detonation cell size of methane/hydrogen/air mixture by initial temperature variation is considered. A change of the ratio between two flammable components leads to the qualitative change of the influence of initial temperature on detonation cell size. Let the concentration of hydrogen in the mixture increase. Then the monotonic decrease in cell size with increasing initial temperature is replaced by a *U*-shaped dependence, convex upward. This effect should be taken into account when optimizing the parameters of technical devices, based on the detonation combustion of a methane-hydrogen mixture, and assessing the feasibility of hydrogen gas transportation through the existing gas pipes system as small additives to natural gas.

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

### ***Введение***

В последние годы существенно вырос интерес к исследованию детонации двухтопливной (бинарной) метано-водородной газовой смеси. Это связано с перспективой использования сгорания метана в двигателях на вращающейся детонации, в технологии детонационно-газового напыления, и изучением возможно-

сти транспортировки водорода по существующей газопроводной системе совместно с природным газом. Природный газ доступен, экологичен с точки зрения продуктов детонации, удобен при транспортировке и хранении, обладает достаточно большой удельной теплотворной способностью и высокими параметрами детонационной волны (скоростью детонации и спутного потока, давлением, температурой, динамическим напором и т.д.). К сожалению, большой поперечный размер детонационной ячейки  $a_0$  в метане может значительно усложнять инициирование детонационной волны, увеличивать размеры и утяжелять детонационные двигатели и оборудование по газодетонационному нанесению порошковых покрытий. Размер детонационной ячейки у водорода на порядок меньше, чем у метана. Соответственно, увеличение концентрации водорода в бинарной метано-водородной смеси позволяет уменьшать  $a_0$ , изменять параметры детонационной волны и оптимизировать характеристики соответствующих технических устройств. С другой стороны, малый размер детонационной ячейки и, соответственно, высокая взрывоопасность, делают проблематичным доставку чистого водорода по отдельной (не связанной с природным газом) газопроводной системе, не говоря уже о соответствующих материальных затратах на ее создание. Поэтому изучается вопрос о возможности транспортировки водорода по газопроводам в качестве добавок к природному газу, объем которых не приводит к значительному уменьшению  $a_0$ .

Начальная температура газа  $T_0$  также оказывает влияние на детонационные характеристики газовых смесей. В этой связи представляет интерес сделать оценки зависимости  $a_0$  от  $T_0$  в стехиометрической метано-водородной смеси при вариации соотношения между реагирующими компонентами. Подобного рода оценки могут быть полезны при расчетах параметров технических устройств, основанных на детонации метана. Влияние  $T_0$  на параметры газовой детонации и  $a_0$  исследовалось и ранее. Но в отношении бинарной метано-водородной смеси этот вопрос не поднимался.

### ***Методы и материалы***

Размер ячейки в смеси  $\xi\text{H}_2 + (1 - \xi)\text{CH}_4 + (2 - 1,5\xi)(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2)$  рассчитывался по формуле [1]:

$$a_0 = 1,4 \frac{E_\Sigma}{RT_{SW}} D \tau_{SW},$$

где  $D$  – скорость детонационной волны, индекс  $SW$  означает параметры за передним ударным фронтом,  $T$  – температура газа,  $\tau_\Sigma$  – период индукции в смеси,  $E_\Sigma$  – энергия активации,  $R$  – универсальная газовая постоянная. Согласно [2]:

$$\tau_\Sigma = \tau_{\text{H}_2}^\xi \tau_{\text{CH}_4}^{1-\xi},$$

где периоды индукции в однотопливных смесях водород- и метан-воздух равны:

$$\tau_{\text{H}_2} = A_{\text{H}_2} e^{E_{\text{H}_2}/RT} \frac{1}{[\text{O}_2]}, \quad \tau_{\text{CH}_4} = A_{\text{CH}_4} e^{E_{\text{CH}_4}/RT} \frac{1}{[\text{O}_2]}.$$

Здесь  $[\text{O}_2]$  – концентрация кислорода в смеси,  $A_{\text{CH}_4}$ ,  $E_{\text{CH}_4}$ ,  $A_{\text{H}_2}$ , и  $E_{\text{H}_2}$  – аррениусовские константы.

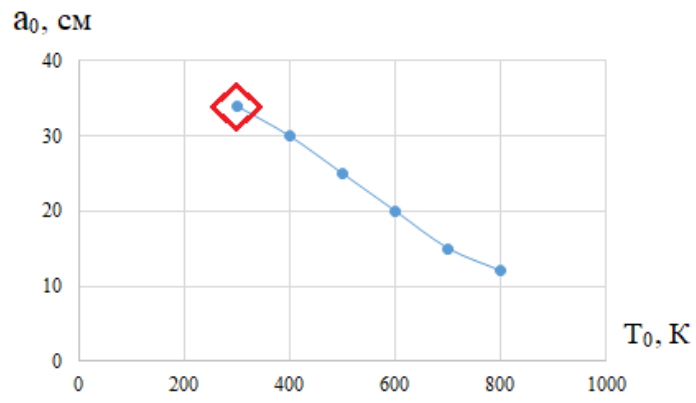
### **Результаты**

На рис. 1 показаны результаты расчета  $a_0$  при вариации  $T_0$ . Смеси:  $\text{CH}_4 + 2,5\text{O}_2$  (a),  $0,2\text{H}_2 + 0,8\text{CH}_4 + 1,7(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2)$  (b),  $0,8\text{H}_2 + 0,2\text{CH}_4 + 0,8(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2)$  (c),  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3,76\text{N}_2$  (d). Самовоспламенение отдельных компонент при рассматриваемых  $T_0$  невозможно. Замкнутой кривой выделен эксперимент [3]. Отметим, что экспериментальных работ по определению зависимости  $a_0$  от  $T_0$  в рассматриваемых смесях нет. Если доля  $\text{H}_2$  растет, то монотонное уменьшение  $a_0$  при увеличении  $T_0$  (рис. 1 a, b) сменяется выпуклой вверх U-образной зависимостью (рис. 1 c). Величина  $a_0$  на рис. 1 a, b уменьшается на порядок. Соответственно, энергия прямого инициирования детонационной волны падает на три порядка [1]. Подобный эффект необходимо принимать во внимание при оптимизации параметров технических устройств, основанных на детонационном сжигании метано-водородной смеси. U-образная зависимость  $a_0$  от  $T_0$  при больших концентрациях  $\text{H}_2$  (рис. 1 c, d) особого практического смысла не имеет. Действительно, для установок, основанных на детонации  $\text{CH}_4$ , имеют смысл лишь небольшие добавки  $\text{H}_2$  для уменьшения размера ячейки и соответствующего увеличения детонационной чувствительности. Температура воздуха в атмосфере может меняться в относительно небольших пределах. Тем не менее, как это следует из рис. 1, подобное изменение необходимо принимать во внимание при оценке возможности транспортировки водорода в качестве небольших добавок к природному газу по имеющимся газопроводам.

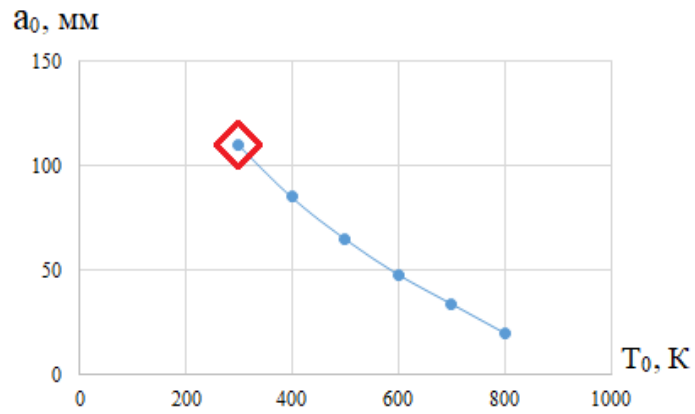
Из приведенных графиков следует, что существенного изменения размера ячейки при повышении температуры на 10-20 градусов относительно  $20^\circ\text{C}$  не происходит. Поэтому детонационная опасность транспортировки водорода по существующей газотранспортной системе от температуры окружающей среды можно во внимание не принимать.

### **Заключение**

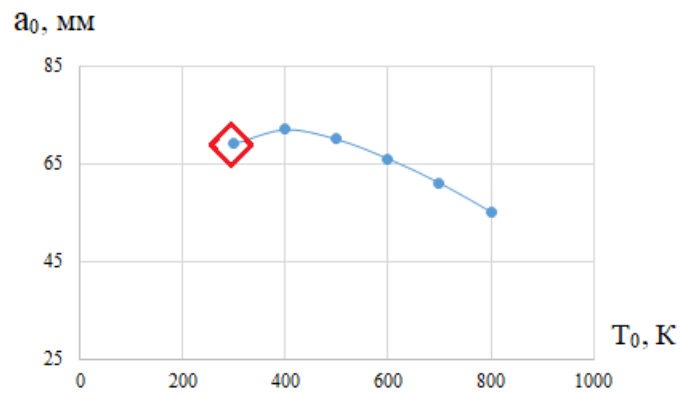
Используемая в данной работе модель [1] допускает различие между экспериментальным и рассчитанным размером ячейки в несколько раз. Для более точного количественного рассмотрения влияния  $T_0$  на  $a_0$  необходим численный неоднородный расчет структуры детонационной волны с учетом химической кинетики и движения сплошной среды и верификация расчетов на соответствующих экспериментах по измерению размера ячейки.



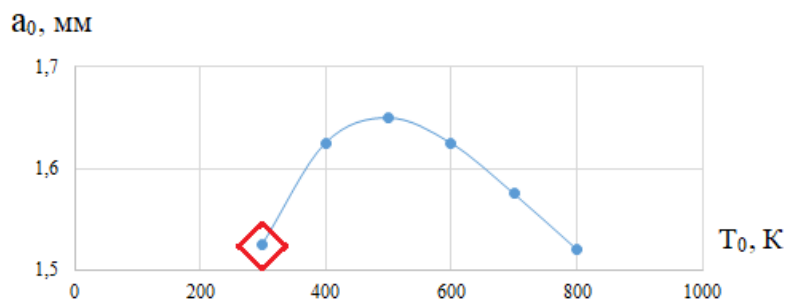
a



b



c



d

Рис. 1. Размер ячейки как функция  $T_0$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. – V. 58. – P. 125–139.
3. Bozier O., Sorin R., Virof 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.

© П. А. Фомин, И. В. Тетервова, 2024