

## Газодинамические и кинетические особенности проникновения метано-кислородного пламени через одиночные отверстия и мелкоячеистые препятствия.

*Н.М. Рубцов, Б.С. Сеплярский, В.И. Черныш, Г.И. Цветков*  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения  
Российской академии наук

Распространение пламени в трубах и каналах важно для установления критериев безопасной прокачки газов по трубам, обеспечения взрывобезопасности в электроэнергетике, добывающих и нефтехимических отраслях промышленности, а также для обеспечения полноты конверсии газа в двигателях внутреннего сгорания [1]. Авторы [2,3] указали на важную роль акустических волн, генерируемых пламенем и формирующихся волн конечной амплитуды, на форму фронта пламени ФП.

В работе представлены экспериментальные результаты по распространению пламени в цилиндрическом канале с препятствиями. Цель работы состояла в том, чтобы выявить особенности проникновения ФП через одиночные препятствия с одним круглым отверстием и мелкоячеистые препятствия, а также оценить эффективность таких препятствий для подавления горения метана.

Эксперименты проводили со стехиометрическими смесями метана с кислородом, разбавленными  $\text{CO}_2$  и  $\text{K}_2$  при начальных давлениях 100-200 Торр, и 298 К в откачиваемом горизонтальном цилиндрическом кварцевом реакторе длиной 70 см и диаметром 14 см (Рис.1). В середине реактора располагали сеточные сферы или плоские сеточные препятствия из нержавеющей стали. Результаты, полученные с мелкоячеистыми препятствиями, сравнивались с данными опытов по прохождению пламени через плоские препятствия с одиночными центральными отверстиями. Скоростную съемку динамики ФП с помощью цветной скоростной цифровой камеры Casio Exilim F1 Pro (частота кадров  $600 \text{ c}^{-1}$ ).

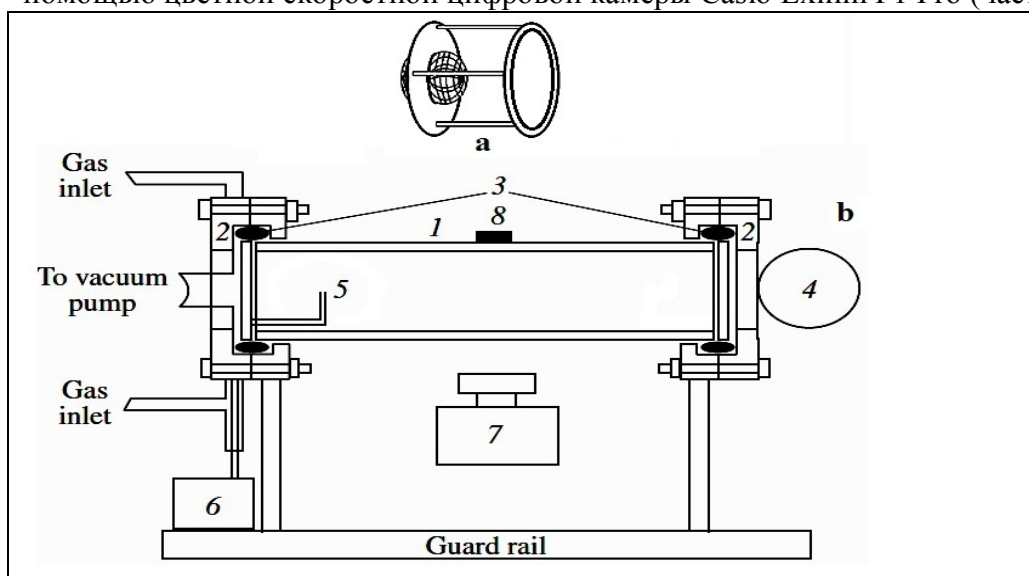


Рис. 1. Экспериментальная установка. а) - сеточная сфера диаметром 4 см в (диаметр проволоки 0.1 мм, размер ячейки  $0.15 \text{ мм}^2$ ), вставленная в плоское препятствие диаметром 14 см.

б) - (1) кварцевый реактор, (2) шлюзы из нержавеющей стали, (3) силиконовая прокладка, (4) дверца безопасности, (5) электроды искрового зажигания, (6) блок питания, (7) скоростная кинокамера, (8) микрофон.

Было обнаружено, что ФП после препятствия не возникает в непосредственной близости от препятствия, первый очаг воспламенения может наблюдаться сравнительно далеко от поверхности препятствия, демонстрируя своеобразный “скачок”; чем меньше диаметр отверстия, тем дальше от препятствия возникает фронт пламени. При использовании препятствия в виде сеточной сферы ФП возникает на наибольшем расстоянии от препятствия. "Скачок" пламени через одиночное препятствие наблюдается при начальных давлениях меньше атмосферного; кроме того, пламя "проскакивает" через препятствие заметно дальше, чем в стехиометрической смеси при 1 атм [4]. Отметим, что накопление свободных радикалов позади препятствия наблюдается экспериментально [4]. Смешивание этих радикалов с непрореагировавшей горючей смесью повышает воспламеняемость смеси. Это означает, что при анализе следует учитывать основные особенности кинетического механизма горения. (Рис.2).

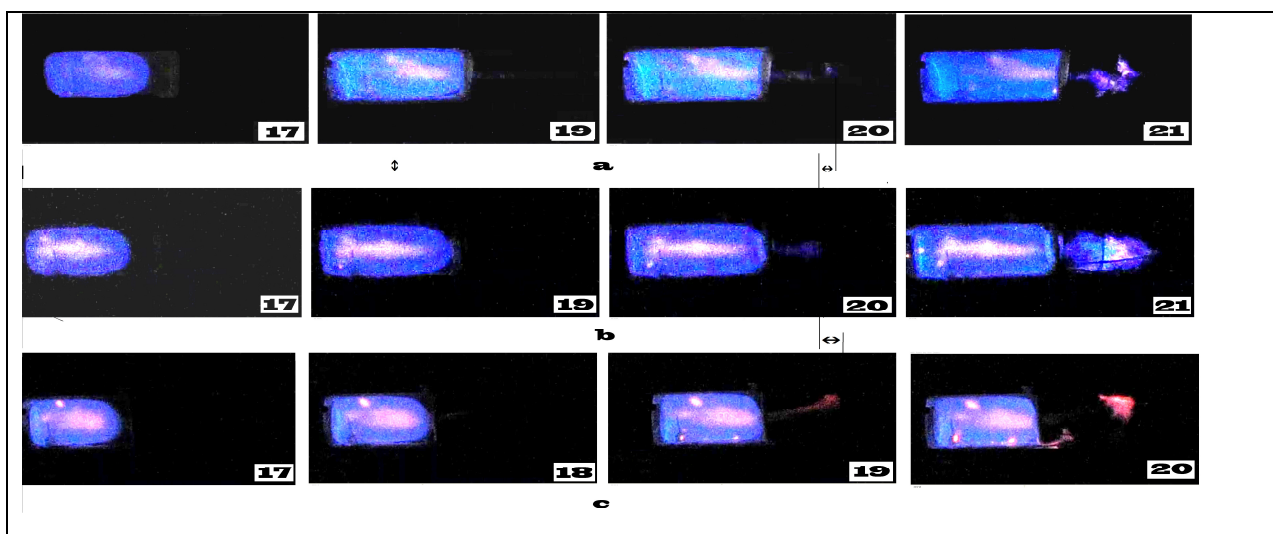
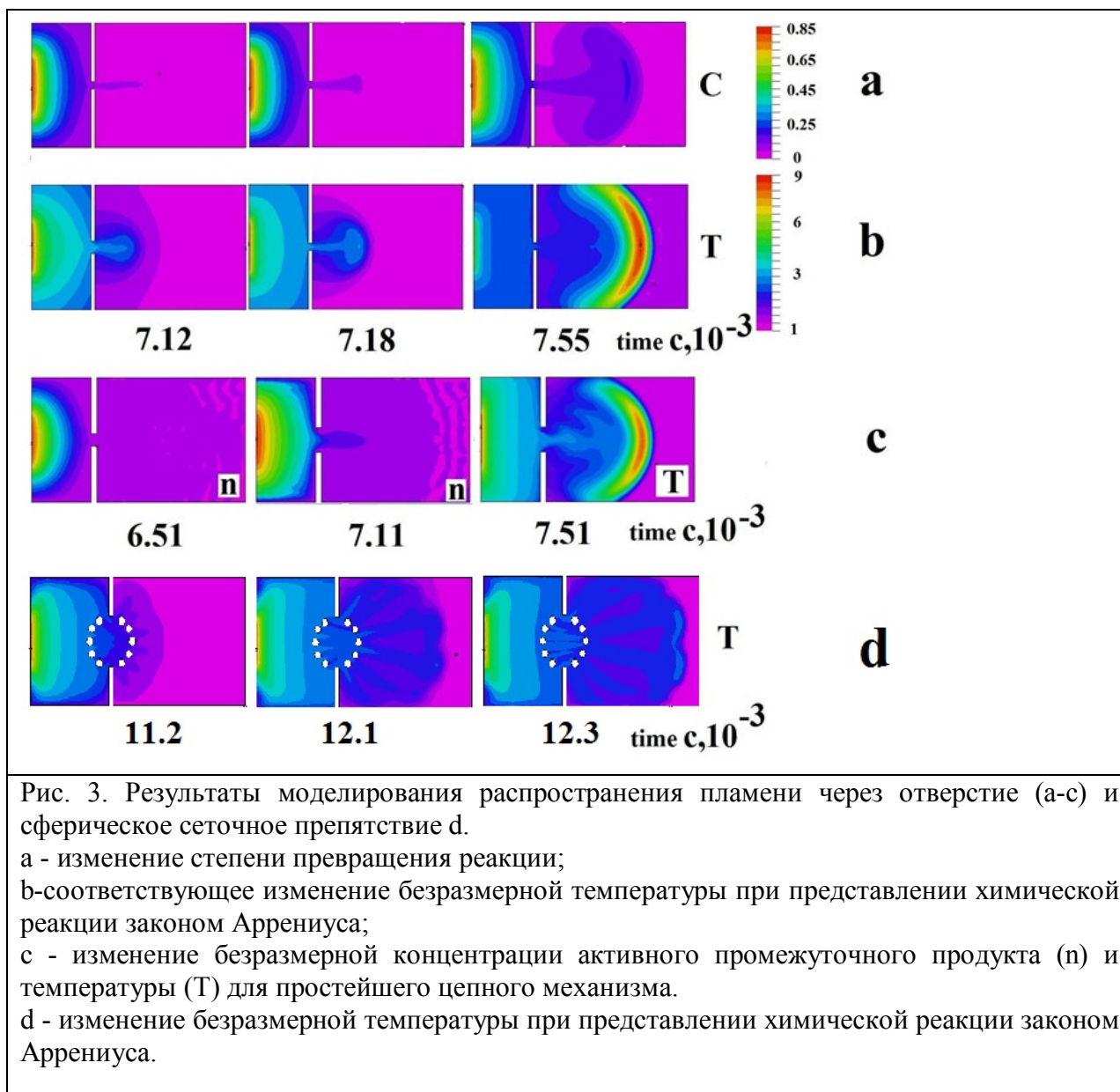


Рис. 2. а - скоростная съемка распространения ФП через круглое отверстие 2.5 см в диаметре в плоском препятствии 14 см в диаметре,  
 б - скоростная съемка распространения ФП через круглое отверстие 4 см в диаметре в плоском препятствии 14 см в диаметре,  
 с - скоростная съемка распространения ФП через сеточную сферу диаметром 4 см (диаметр проволоки 0.1 мм, размер ячейки 0.15 мм<sup>2</sup>) вставленной в плоское препятствие диаметром 14 см, Рис.1а), 15.4% СН<sub>4</sub> + 30.8% О<sub>2</sub> + 46% СО<sub>2</sub> + 7.8% Кг при начальном давлении 170 Торр. Номер кадра отсчитывается от момента инициирования.  
 Стрелками указаны расстояния возникновения фронта пламени после препятствия.

Было выполнено качественное двухмерное численное моделирование прохождения пламени через препятствие с использованием уравнений Навье-Стокса с химической реакцией в приближении малого числа Маха. Рассматривали одиночное плоское препятствие с центральным отверстием и сетку круглой формы, вставленную в плоское препятствие. Было показано, что такой анализ позволяет качественно описать экспериментальные особенности проникновения ФП через одиночное препятствие, а именно, возникновение фронта пламени не в непосредственной близости от препятствия, а в некотором расстоянии позади него. Учёт цепного механизма превращения позволяет описать движение зоны реакции назад к препятствию после проскока пламени. Следовательно, хотя возникновение "скачка" пламени определяется в основном газодинамическими особенностями проникновения горючего газа через препятствие, кинетический механизм горения также заметно влияет на процесс. Закономерности прохождения фронта пламени через сферическую сетку также качественно совпадают с экспериментом: ФП возникает на наибольшем расстоянии (по сравнению с плоским препятствием) (Рис.3).



Проведена оценка эффективности препятствий при подавлении распространения пламени метана. Влияние препятствий выражается двойственным способом. С одной стороны, взаимодействие ФП с препятствием может вызвать развитие неустойчивости пламени, способствуя ускорению ФП. С другой стороны, контакт ФП с поверхностью препятствия может привести к увеличению вклада гетерогенных реакций, в особенности обрыва реакционных цепей [5], а также к увеличению тепловых потерь. Было установлено, что два полусферических мелкоячеистых препятствия действуют как одно плоское. Было показано наличие границы (одно препятствие в условиях нашего эксперимента) между режимами ускорения пламени и его подавления, обусловленного как обрывом цепей, так и тепловыми потерями на поверхности препятствия.

### Выводы

На примере проникновения пламен разбавленных инертными газами смесей метана с кислородом (общее давление до 200 Торр) через одиночные отверстия и мелкоячеистые препятствия установлено, что воспламенение после одиночного препятствия может наблюдаться сравнительно далеко от поверхности препятствия. Показано, что использование сеточной сферы как препятствия приводит к увеличению длины "скачка" пламени за

препятствием по сравнению с круглым отверстием. Показано, что два или более мелкоячеистых препятствия существенно подавляют распространение пламени.

Результаты, полученные при визуализации развития неустойчивости фронта пламени, важны для решения проблем безопасности взрыва для объемов со сложной геометрией.

#### Литература

1. S.Chakraborty, A.Mukhopadhyay, S.Sen, *International J.of Thermal Sciences*, 2008, **47**, 84.
2. G.D. Salamandra, T.V.Bazhenova, I.M.Naboko, *Zhurnal Technicheskoi fiziki*, 1959, **29**, 1354.
3. C. Clanet and G. Searby, *Combustion and flame*. 1996, **105**, 225.
4. M.Jourdan, N. Ardey, F. Mayinger and M.Carcassi, Heat Transfer, Proceedings of 11th IHTC, Kuongju, Korea, 1998, 7, 295.
5. I. M. Naboko, N. M. Rubtsov, B. S. Seplyarskii, G.I.Tsvetkov and V. I. Chernysh, *J. Aeronaut. Aerospace Eng.* 2013, 2:5, <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9792.1000127>.