

Взаимодействие пламён разбавленных метано – кислородных смесей с препятствиями конической формы

Н.М. Рубцов*, Г.И. Цветков, В.И.Черныш

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетике и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

* nmrubtss@mail.ru

Нештатные ситуации, связанные с воспламенениями в могут привести к потерям человеческих жизней и повреждениям производственных помещений. Одна из проблем взрывобезопасности состоит в том, чтобы устранить или минимизировать последствия случайных воспламенений и взрывов в перерабатывающих отраслях промышленности. Для достижения этой цели необходимо иметь достоверные экспериментальные данные при моделировании взрывов метана в объемах сложной геометрии [1]. Моделирование в малых объемах при сравнительно низких давлениях является весьма желательным для прогнозирования ожидаемых в большом масштабе эффектов и значительно менее затратно. При взрывах газа, имеющих место в перерабатывающих отраслях промышленности, форма препятствий и число и местоположение отверстий них являются параметрами, которые определяют интенсивность таких взрывов. В литературе существует весьма ограниченная информация о роли этих параметров [9].

При моделировании процессов дозвукового турбулентного горения приближение малого числа Маха (акустическое приближение) для уравнений Навье-Стокса в сжимаемой реагирующей среде является удовлетворительной основой для моделирования на качественном уровне [2]. В [2] пламя заранее перемешанной смеси распространяется сначала как ламинарный фронт, который возмущается при проникновении через препятствия и становится турбулентным, распространяющимся с более высокой скоростью.

Мы ранее показали, что пламя разбавленной метано-кислородной смеси не проходит через конфузор с единственным отверстием в центре, при этом пламя свободно проникает через диффузор. При тех же самых условиях предел проникновения метано-кислородного пламени через диффузор много меньше, чем в случае конфузора, поэтому конфузор

представляет собой наиболее эффективное физическое устройство для подавления пламени [2]. Данные по особенностям проникновения пламени через коническое препятствие с центральным отверстием при наличии дополнительных отверстий на образующих конуса, в литературе отсутствуют. Такие отверстия могут позволить сбросить давление, возникающее при приближении фронта пламени к стенке и продлить время эксплуатации конфузора как устройства, подавляющего пламя.

В данной работе установлены особенности распространения пламени через конус с центральным отверстием и отверстиями на образующих, ориентированный как конфузор и как диффузор. Осуществлено качественное численное моделирование наблюдаемых закономерностей на основе уравнений Навье-Стокса в сжимаемой реагирующей среде в приближении малого числа Маха.

Эксперименты проводили со стехиометрическими смесями метана с кислородом, разбавленными углекислым газом CO_2 и аргоном Ar при начальных давлениях 150-200 Торр и начальной температуре 298 К в горизонтально расположенном цилиндрическом кварцевом реакторе 70 см длиной и 14 см в диаметре [2]. Пластиковая воронка $d = 14$ см с центральным отверстием и двумя отверстиями (каждое - 17 мм в диаметре) на образующих конуса (углы раскрытия конусов составляли 45° , 55° и 83° (рис. 1)) была ориентирована как диффузор или как конфузор и помещена в центре реактора. Горючую смесь (15.4% $\text{CH}_4 + 30.8\% \text{O}_2 + 46\% \text{CO}_2 + 7.8\%$) Kг составляли до эксперимента; CO_2 добавляли, чтобы уменьшить скорость фронта пламени и улучшить качество съемки; Ar добавляли, чтобы уменьшить порог инициирования искрового разряда.

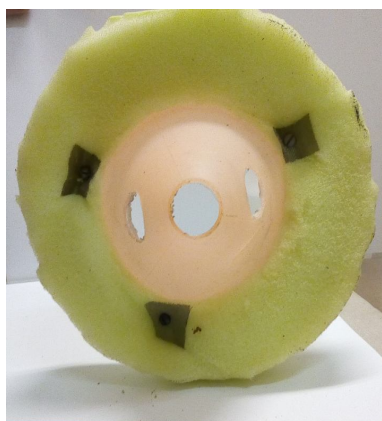


Рис.1. Препятствие конической формы с тремя отверстиями (угол раскрытия 83°).

Реактор заполняли смесью до необходимого давления. Затем осуществляли искровой разряд. Скоростную киносъемку динамики воспламенения осуществляли с боковой стороны реактора [2] с помощью цветной цифровой камеры Casio Exilim F1 Pro (частота кадров 600 с^{-1}). Одновременную регистрацию радикалов CN^* при 431 нм осуществляли с использованием камеры Casio Exilim F1 Pro, снабжённой интерференционным фильтром $430\pm 15\text{ нм}$. Изменение давления при горении регистрировали пьезоэлектрическим датчиком, сигнал которого синхронизировали с искровым разрядом. Акустические колебания регистрировали с использованием чувствительного микрофона Ritmix.

Типичные последовательности видеокадров распространения фронта пламени в горючей смеси при начальном давлении 165 Торр через коническое препятствие, ориентированное как конфузор а), в), г) и как диффузор б), д), е) представлены на рис.2 для углов раскрытия конуса 55° и 83° . Как видно из рис.2, в наших условиях пламя проникает только через центральное отверстие диффузора. При этом пламя проникает только через боковые отверстия конфузора при угле раскрытия конуса 55° (рис. 2а, кадры 21, 22, рис. 2в, кадр 19). Проникновение пламени через конфузор сопровождается резким и громким звуком, при этом дверца безопасности открывается. Распространение пламени через диффузор не сопровождается резким звуковым эффектом.

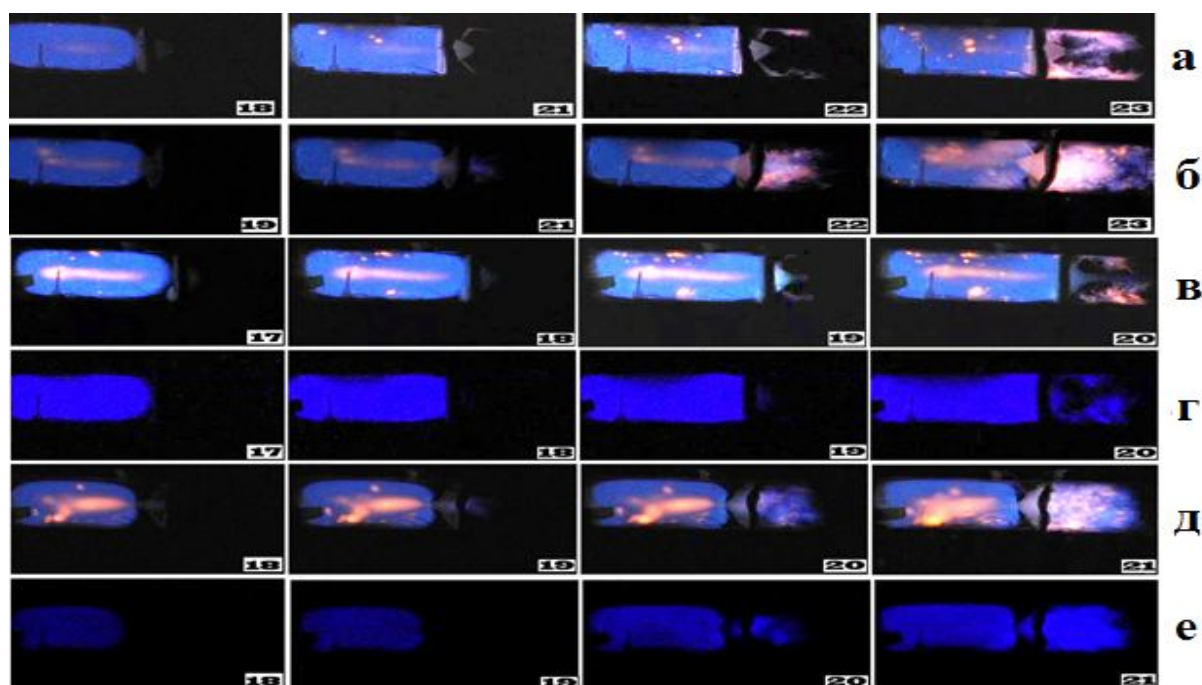


Рис. 2. Видеокадры скоростной киносъёмки распространения фронта пламени через коническое препятствие с центральным отверстием и двумя отверстиями на образующих конуса; а) - конфузор (угол раскрытия конуса 55°), б) - диффузор (угол раскрытия конуса 55°), в) - конфузор (угол раскрытия конуса 83°), г) - конфузор (угол раскрытия конуса 83°), интерференционный фильтр 430 нм помещен перед видеокамерой; д) - диффузор (угол раскрытия конуса 83°), е) - диффузор (угол раскрытия конуса 83°), интерференционный фильтр 430 нм помещен перед камерой. Начальное давление 165 Торр. Число на кадре соответствует порядковому номеру видеокadra после момента инициирования.

На рис.3 представлены зависимости акустической амплитуды от времени при проникновении пламени через конфузор (рис. 3а) и диффузор (рис. 3б). Ряд видеокadров из рис. 2а и рис. 2б приведен на рис.3; центр видеокadra соответствует текущему времени. Отсюда можно заключить, что натуральный эксперимент с конфузуром с углом раскрытия менее 83° в большом масштабе при атмосферном давлении опасен для целостности установки и для жизни персонала.

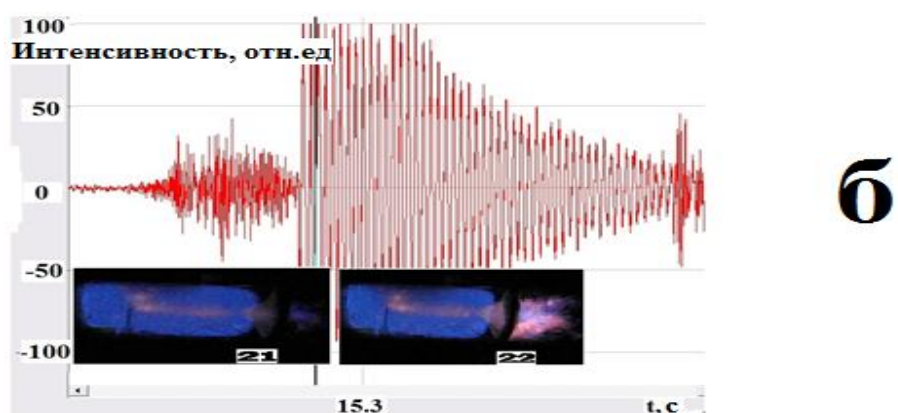
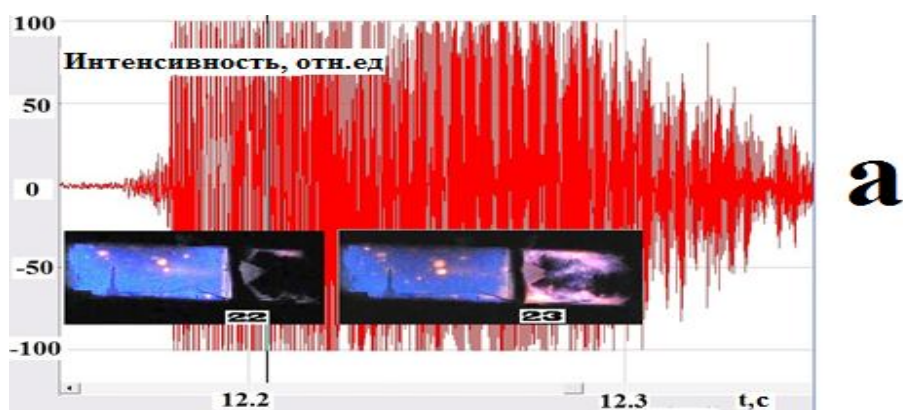


Рис. 3. Зависимости амплитуд акустических колебаний от времени при распространении пламени при начальном давлении 165 Торр; а) конфузор; б) диффузор.

С увеличением угла раскрытия пламя начинает проникать через центральное отверстие диффузора (рис. 2в, кадры 19, 20). Укажем, что диаметры отверстий в коническом препятствии значительно меньше, чем минимальный диаметр проникновения пламени через плоское препятствие с единственным центральным отверстием (20 мм [2]). Поэтому при оценке пожарной безопасности помещения с несколькими проёмами величину минимального размера единственного отверстия использовать не следует, поскольку при увеличении количества отверстий диаметр отверстия, достаточного для проникновения пламени, уменьшается.

При описании распространения пламени в двумерном канале осуществлено численное моделирование с использованием уравнений Навье-Стокса для сжимаемой реагирующей среды в приближении малого числа Маха; система уравнений представлена в [2]. Условие инициирования было взято как $T = 10$ на границе канала; в середине канала находилось препятствие конической формы с двумя дополнительными отверстиями на образующих конуса. Граничными условиями (включая препятствие) были $C_x = 0$, $C_y = 0$, $n = 0$, $u = 0$, $v = 0$, $\rho_x = 0$, $\rho_y = 0$, $T_t = T - T_0$ (индексы x , y , t означают дифференцирование по x , y , t). Химическая реакция была представлена реакцией Аррениуса первого порядка [2].

Результаты численного моделирования процесса проникновения пламени через коническое препятствие в виде конфузора и диффузора приведены на рис. 4.

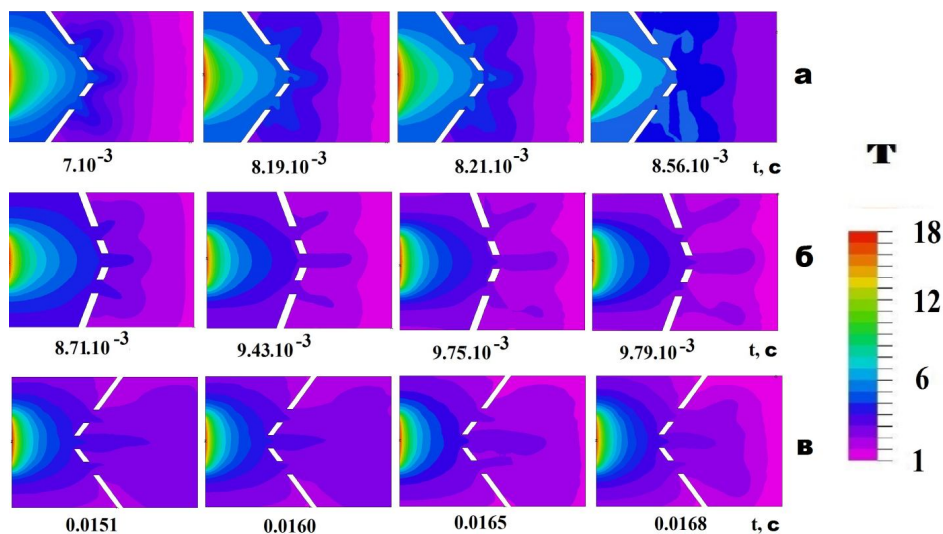


Рис. 4. Результаты численного расчёта процесса проникновения пламени через препятствие конической формы; а) - изменение безразмерной температуры при проникновении пламени через конфузур, угол раскрытия 100° ; б) - изменение безразмерной температуры при распространении пламени через конфузур, угол раскрытия 150° ; в) - изменение безразмерной температуры при распространении пламени через диффузор, угол раскрытия 100° . Шкала безразмерной температуры представлена справа.

Как видно, результаты вычислений находятся в качественном согласии с экспериментами, приведёнными на рис. 2; а именно, пламя проникает через диффузор (рис. 4в); пламя не проникает через центральное отверстие конфузора с углом раскрытия менее 100° (рис. 4а). При большем угле раскрытия (150° , рис. 4б) пламя проникает через все три отверстия в конфузуре в качественном согласии с экспериментом (рис. 2). Отметим, что в случае плоского препятствия с тремя отверстиями (один из них - центральное, угол раскрытия 180°), пламя проникает через каждое из этих трех отверстий [3]. Очевидно, что качественное рассмотрение (единственная реакция вместо полного химического механизма, двухмерное моделирование и т.д.) не позволяет получить точное значение угла раскрытия, при котором пламя начинает проникать через центральное отверстие конфузора. Кроме того, такое качественное отличие от процесса проникновения пламени через плоское препятствие с центральным отверстием указывает на значимую роль взаимодействия акустических колебаний реактора, содержащего коническую полость, с распространяющимся фронтом горения даже в случае дозвукового пламени.

Литература

- [1] Kundu S., Zanganeh, J., Moghtaderi B. J. A review on understanding explosions from methane-air mixture.//Loss Prev. Process Ind. 2016. Vol. 40, P. 507-523.
- [2] http://www.ism.ac.ru/events/isman2018/cd/assets/rubtsov-n.m._1.pdf
- [3] О. А. Васильев, Фокусировка сильной ударной волны при отражении от вогнутых поверхностей// *Матем. моделирование*, 1996, Т.8, С.115–120.