

УДК 536.46

## ВЛИЯНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ВАТЫ НА СКОРОСТЬ ПЛАМЕНИ И ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ ВЗРЫВА В ТРУБЕ

С.-Ц. Янь, Цз.-Л. Юй

Далыньский технологический университет, Далынь 116024, Китай, yujianliang@dlut.edu.cn

Исследуются проблемы снижения скорости пламени, возникающего при взрывах предварительно перемешанных газов, а также уменьшения избыточного давления взрыва. В цилиндрической трубе диаметром  $89 \times 4,5$  мм изучали характеристики процесса распространения пламени по стехиометрической смеси ацетилена и воздуха как в отсутствие, так и в присутствии алюмосиликатной ваты, закрепленной на внутренней поверхности трубы. Результаты измерений показали, что алюмосиликатная вата, характеризующаяся высокой удельной площадью поверхности, снижает приращение скорости пламени на выходе и существенно ослабляет давление взрыва при превышении критической длины пористой вставки.

Ключевые слова: алюмосиликатная вата, скорость пламени, избыточное давление взрыва, подавление взрыва.

### ВВЕДЕНИЕ

Пламя и избыточное давление, возникающие в результате взрыва, представляют собой серьезную угрозу для людей и окружающей среды. В связи с широким промышленным применением взрыва, способы надежного и эффективного снижения скорости пламени и избыточного давления взрыва являются предметом многочисленных исследований [1–6]. Широко известны такие коммерческие огнепреградители для тушения пламени как проволочные сетки и металлокерамика. Недавно были изучены полимерные пены [5] и ячеистая керамика [7, 8]. В настоящее время значительный интерес вызывает использование пористых материалов для подавления пламени. Эффект обусловлен наличием пор в материале. Широкий диапазон их размеров и высокоразвитая удельная площадь поверхности приводят к эффективной теплопередаче [9] и неравновесным реакциям [10].

На протяжении нескольких десятилетий для подавления взрывов использовались изделия из алюминия [11]. Типичным представителем пористого материала и алюминиевого сплава является алюмосиликатная вата, обычно применяемая в качестве изоляции. Но благодаря своей пористости и большой удельной площади она пригодна и для подавления взрывов. Однако в литературе отсутствуют данные

по изучению этого процесса. В настоящей работе изложены результаты экспериментов по исследованию влияния алюмосиликатной ваты на скорость пламени и избыточное давление взрыва.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

#### Экспериментальное оборудование

Эксперименты проводили в установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка включает в себя трубопровод, систему смешения газов, распределительную газовую систему, систему зажигания, измерительное оборудование и систему сбора данных.

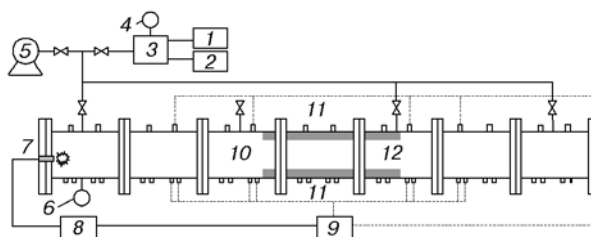


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — баллон с ацетиленом, 2 — баллон со сжатым воздухом, 3 — резервуар смешения ацетилена и воздуха, 4 — комбинированный датчик давления и вакуумметр, 5 — воздушный вакуумный насос, 6 — вакуумметр, 7 — источник зажигания, 8 — пульт управления взрывом, 9 — компьютер и система регистрации данных, 10 — трубопровод, 11 — датчики давления и пламени, 12 — алюмосиликатная вата

Трубопровод состоит из семи труб, соединенных фланцами. Длина каждой трубы 0.3 м, диаметр 89 мм × 4.5 мм. Трубопровод закреплен на опоре, расположенной на высоте 1 м над уровнем земли. Общая длина трубопровода 2.1 м.

Стехиометрическая смесь ацетилена и воздуха подготавливалась методом парциальных давлений в откачанном резервуаре смешения. Газовая смесь подавалась в порожний трубопровод и поджигалась при помощи разряда. Для получения однородной смеси вдув проводился через несколько отверстий. В настоящем эксперименте выбраны четыре точки инжектирования, расположенные на расстояниях 0.15, 0.75, 1.35 и 1.95 м от источника зажигания.

### Измерительные приборы

Использовался пьезоэлектрический датчик давления MD-НФ с максимальным диапазоном 2 МПа и частотой замеров 200 кГц. Предел напряжения сигнала 0 ÷ 5 В. Датчик пламени состоит из фотодиода, находящегося внутри детектора. Последний представляет собой полую стальную трубку диаметром 7 × 1.5 мм, предназначенную для защиты диода и уменьшения размера светового пятна от пламени при прохождении около диода. Рис. 2 иллюстрирует расположение датчиков в каждой трубе.

Перед экспериментом датчики пламени проверяли на пригодность при помощи свечи, которая перемещалась сначала в горизонтальном, затем в вертикальном направлении относительно кромки датчика. Рис. 3 показывает изменение напряжения  $\Delta U$  в зависимости от смещения свечи. Видно, что при увеличении

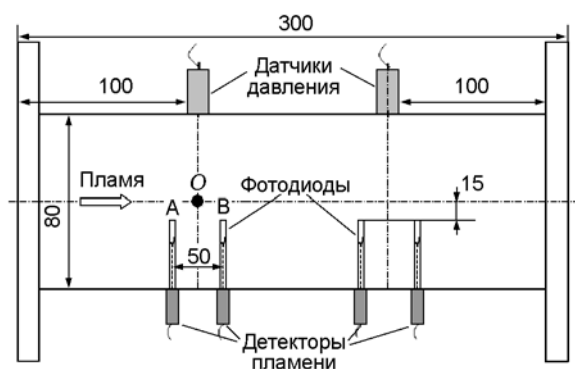


Рис. 2. Расположение датчиков давления и пламени в каждой трубе

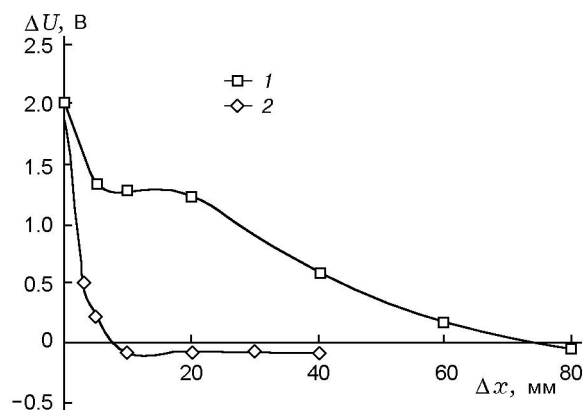


Рис. 3. Сигнал напряжения в зависимости от вертикального (1) и горизонтального (2) смещений

горизонтального смещения  $\Delta x$  от 0 до 5 мм напряжение резко снижается от  $\approx 2$  В до нуля, что указывает на то, что датчик пламени может распознать пламя, только если свет от него проходит непосредственно через диод. Напряжение снижается менее резко при увеличении вертикального смещения. Однако вертикального смещения 15 мм, используемого в экспериментах, достаточно, чтобы фотодиод зафиксировал источник света.

Давление в точке  $O$  (см. рис. 2) измерялось датчиком давления. Скорость пламени в точке  $O$ , вычисляемая по расстоянию и времени прохождения пламени, примерно равна его средней скорости на отрезке  $AB$ . В данном эксперименте для повышения точности выбрано расстояние 50 мм.

Система зажигания представляет собой искровое устройство с энергией каждого пуска 48 Дж, управляемое при помощи компьютера и пульта управления взрывом. Для записи всех сигналов давления и пламени и для управления системой зажигания использовалась карта регистрации данных с 48 выделенными каналами.

### Пористая алюмосиликатная вата

Алюмосиликатная вата изготавливается из оксида алюминия (массовая доля 51 %), диоксида кремния (массовая доля 46 %) и других примесей. Ее физические свойства, декларируемые компанией-поставщиком, следующие: насыпная плотность  $\rho = 240$  кг/м<sup>3</sup>, удельная теплоемкость  $c_p = 0.255$  Дж/(кг · К), коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0.106$  Вт/(м · К), пори-

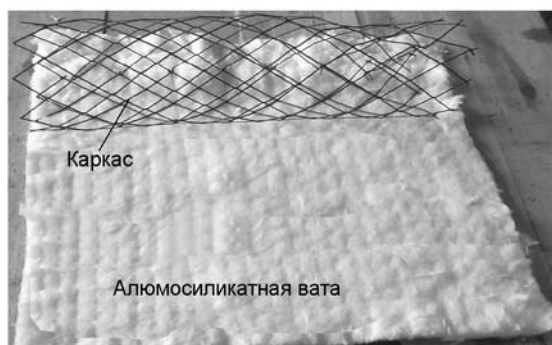


Рис. 4. Алюмосиликатная вата и каркас пористого материала



Рис. 5. Размещение алюмосиликатной ваты в трубопроводе

стость  $\varepsilon = 0.8$ , удельная площадь поверхности  $A = 10 \text{ м}^2/\text{г}$ , средний размер пор  $d = 20 \text{ мкм}$ , диаметр волокон  $d_0 = 2 \div 4 \text{ мкм}$ .

На рис. 4 показана алюмосиликатная вата толщиной 10 мм, используемая в экспериментах. В качестве каркаса для фиксации материала внутри трубы, на внутренней поверхности последней по спирали укладывалась железная проволока. Алюмосиликатную вату перед установкой в трубопровод помещали в каркас и фиксировали нитями, как показано на рис. 5. В опытах она выдерживала температуру до 1273 К.

#### Схема эксперимента

Эксперимент начинался с воспламенения на конце трубы, где находился источник зажигания стехиометрической смеси ацетилена с воздухом с объемной концентрацией 7.7 %; другой конец трубы был открыт. Изучали два сценария: (1) распространение пламени в отсутствие алюмосиликатной ваты; (2) распространение пламени в трубопроводе в присутствии алюмосиликатной ваты. Рис. 6 иллю-

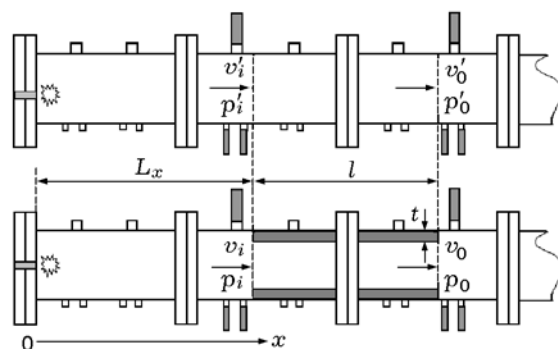


Рис. 6. Схемы двух режимов эксперимента

стрирует схему эксперимента и план расположения алюмосиликатной ваты.

Координата положения пористого материала  $L_x$  и его длина  $l$  в эксперименте варьировались (см. рис. 6)  $L_x = 0.4, 0.7, 1$  и  $1.3 \text{ м}$ ;  $l = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  и  $0.6 \text{ м}$ .

В опытах с алюмосиликатной ватой измерялись на входе скорость пламени  $v_i$  и избыточное давление взрыва  $p_i$ , на выходе — скорость пламени  $v_0$  и избыточное давление  $p_0$ . С целью выявления влияния алюмосиликатной ваты на характеристики подавления взрыва в тех же точках измерялись скорость пламени  $v'_i$  и избыточное давление на входе  $p'_i$ , а также скорость пламени  $v'_0$  и избыточное давление на выходе  $p'_0$  трубы в отсутствие алюмосиликатной ваты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Пламя, распространяющееся в трубопроводе в отсутствие алюмосиликатной ваты

Вначале было исследовано пламя смеси ацетилена и воздуха, распространяющееся после воспламенения по трубопроводу без алюмосиликатной ваты. Рис. 7 иллюстрирует распределение скорости пламени и давления взрыва вдоль трубопровода. Минимальное и максимальное стандартные отклонения измеренных скоростей пламени составляют 5 и 52 м/с, что соответствует точкам  $L_x = 0.4$  и  $1.3 \text{ м}$ . Минимальное и максимальное стандартные отклонения избыточного давления взрыва равны 29 и 54 кПа в точках  $L_x = 1.3$  и  $0.7 \text{ м}$  соответственно. Видно, что скорость пламени возрастает линейно при увеличении расстояния от источника воспламенения. Ускорение пламени, распространяющегося в трубопроводе, очевидно. При этом с увеличением расстояния дав-

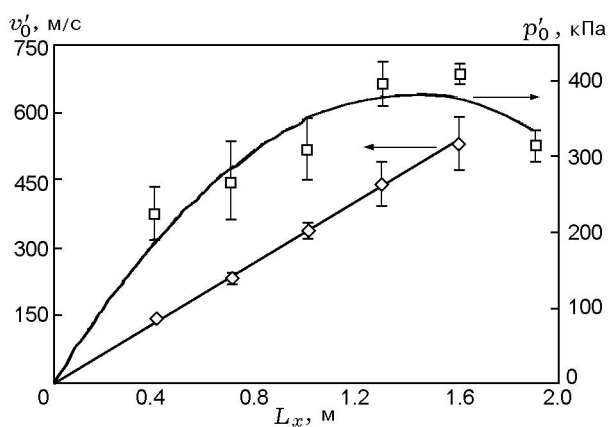


Рис. 7. Распределение скорости пламени и избыточного давления вдоль трубопровода в отсутствие алюмосиликатной ваты

ление сначала растет, а затем уменьшается, точка изгиба расположена на расстоянии  $L_x = 1.6$  м. Уменьшение давления может быть связано с эффектом отвода воздуха на выходе из трубопровода.

### Влияние алюмосиликатной ваты на скорость пламени

Затем исследовалось пламя смеси ацетилена и воздуха, распространяющееся в трубопроводе с алюмосиликатной ватой. Рис. 8 показывает изменение скорости пламени на выходе при различной длине пористого материала в точке  $L_x = 0.4$  м. Для сравнения на рисунке приведены результаты измерения в той же точке трубопровода в отсутствие алюмосиликатной ваты.

Из рис. 8 видно, что с увеличением расстояния скорость пламени на выходе сначала

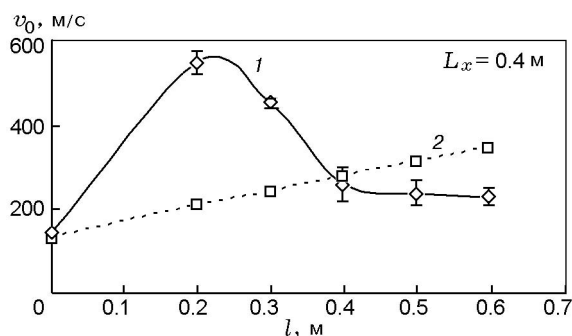


Рис. 8. Скорость пламени на выходе в зависимости от длины пористого материала (1), а также в отсутствие пористого материала (2)

растет, затем падает, точка изгиба  $L_x = 0.2$  м. Сравнивая со скоростью, полученной в отсутствие алюмосиликатной ваты в трубопроводе, можно сказать, что влияние ваты на скорость движения пламени двояко: ускорение и замедление. Ускорение происходит вследствие уменьшения площади поперечного сечения трубопровода и возникновения возмущений от реакции горения. Замедление обусловлено охлаждением и гашением пламени, поскольку большое количество пор разбивает пламя на мелкие фрагменты. При длине пористого материала  $l < 0.4$  м доминирует ускорение. При  $l > 0.4$  м постепенно начинает превалировать замедление. При равном соотношении противодействующих эффектов замедления и ускорения достигается критическая длина, равная  $\approx 0.4$  м при скорости пламени на входе  $v_i = 143$  м/с.

При расположении материала в точке  $L_x = 0.4$  м наименьшая скорость на выходе составляет  $v_0 = 280$  м/с при  $l = 0.6$  м, что больше, чем входная скорость пламени  $v_i = 143$  м/с, но меньше выходной скорости пламени в трубопроводе без алюмосиликатной ваты  $v'_0 = 346$  м/с. Это значит, что алюмосиликатная вата не уменьшает скорость пламени на входе, но может уменьшить ее приращение на выходе, если длина пористого материала превышает критическое значение.

Данные по скорости пламени на выходе в зависимости от длины пористого материала при изменении его положения показаны на

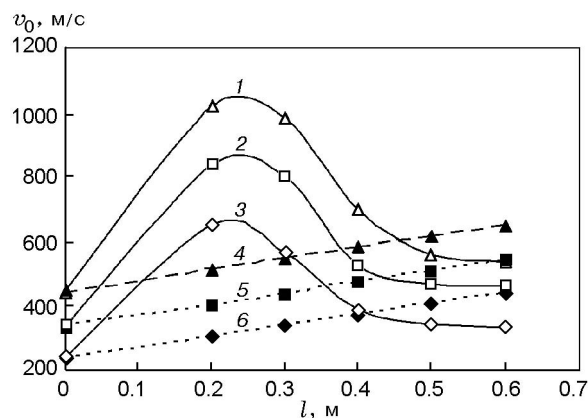


Рис. 9. Скорость пламени на выходе в зависимости от длины пористого материала (1–3) при расположении в точках  $L_x = 0.7$  (1, 4), 1.0 (2, 5) и 1.3 м (3, 6) (4–6 — в отсутствие пористого материала)

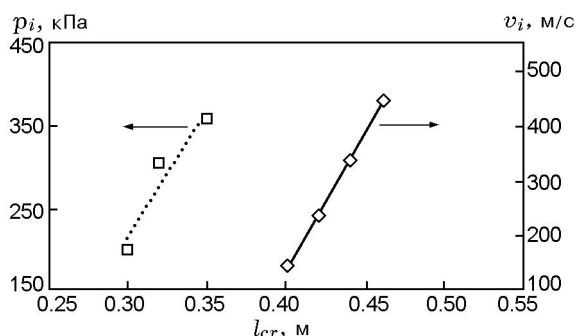


Рис. 10. Зависимость скорости пламени и избыточного давления на входе от критической длины пористого материала

рис. 9. Видно, что и при разных положениях эффекты ускорения и замедления все же наблюдаются, но при этом изменяется критическая длина материала. Поскольку входная скорость пламени зависит от положения материала, сделано заключение, что критическая по скорости длина тесно связана со скоростью пламени на входе. Например, критическая длина составляет  $l_{cr} = 0.41$  м при скорости пламени на входе  $v_i = 238$  м/с,  $l_{cr} = 0.44$  м при  $v_i = 337$  м/с,  $l_{cr} = 0.46$  м при  $v_i = 448$  м/с. Эту взаимосвязь иллюстрирует рис. 10.

### Влияние алюмосиликатной ваты на избыточное давление взрыва

На рис. 11 показано избыточное давление взрыва на выходе из трубы в отсутствие и в присутствии алюмосиликатной ваты, расположенной в точке  $L_x = 0.4$  м. При наличии в трубе алюмосиликатной ваты с увеличением длины пористого материала избыточное давле-

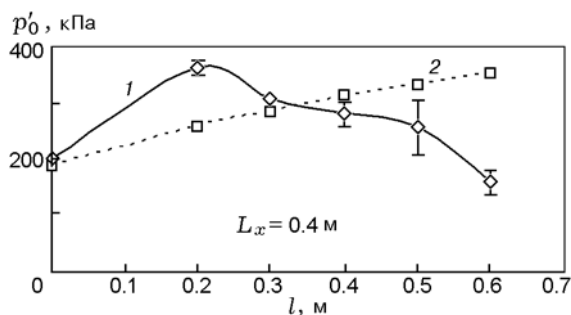


Рис. 11. Избыточное давление взрыва на выходе в зависимости от длины пористого материала (1) ( $L_x = 0.4$  м) и в отсутствие пористого материала (2)

ние на выходе сначала растет, а затем уменьшается, т. е., как и для скорости пламени, проявляются два эффекта. Во-первых, алюмосиликатная вата может увеличить избыточное давление взрыва вследствие уменьшения площади поперечного сечения трубопровода и возникновения турбулентности из-за реакции горения. К тому же алюмосиликатная вата может частично адсорбировать волну сжатия за счет пористости и высокой удельной площади поверхности. В точке  $L_x = 0.4$  м критическая по избыточному давлению длина материала составляет 0.3 м. В отличие от скорости пламени, на расстоянии  $L_x = 0.6$  м избыточное давление на выходе падает до значения, меньшего чем на входе. Можно заключить, что алюмосиликатная вата оказывает более сильное влияние на затухание волны давления, чем на замедление распространения пламени.

На рис. 12 приведена зависимость избыточного давления взрыва на выходе в зависимости от длины пористого материала, расположенного в точках  $L_x = 0.7, 1$  и 1.3 м. При  $L_x = 0.7, 1$  м давление сначала возрастает, а затем убывает. Отличие случая  $L_x = 1.3$  м от предыдущих может быть отнесено за счет эффекта отвода воздуха. Как показано на рис. 7, отвод воздуха на выходе из трубопровода может снизить избыточное давление начиная с  $L_x = 1.3$  м. Тем не менее избыточное давление на выходе ниже, чем на входе при длине пористого материала 0.6 м, при любом расположении материала. Это указывает на влияние алюмосиликатной ваты на снижение избыточного давления.

Обнаружено, что критическая по избыточному давлению длина материала связана с из-

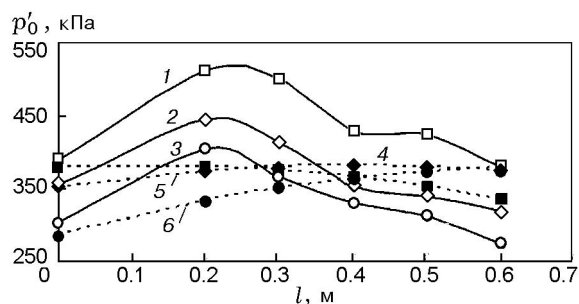


Рис. 12. Избыточное давление взрыва на выходе в зависимости от длины пористого материала (1–3) в точках  $L_x = 0.7$  (3, 6), 1.0 (2, 4) и 1.3 м (1, 5) (4–6 — в отсутствие пористого материала)

быточным давлением  $p_0$  взрыва на входе. Она составляет  $\approx 0.3$  м при  $p_0 = 200$  кПа,  $0.32$  м при  $305$  кПа,  $0.35$  м при  $357$  кПа (см. рис. 10).

### ПОДАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПЛАМЕНИ И ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА ПРИ ПОМОЩИ АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ВАТЫ

Как обсуждалось выше, высокая пористость и удельная площадь поверхности алюмосиликатной ваты обеспечивают большое пространство для реакций горения. При возникновении реакции алюмосиликатная вата разделяет пламя на многочисленные фрагменты и замедляет реакцию горения, препятствуя, таким образом, ускорению распространения пламени.

В [8] отмечается, что пористый материал может подавлять поперечные волны, генерируемые ударными волнами при взрывах газов, которые являются причиной распространения детонационных волн в самоподдерживающемся режиме. В алюмосиликатной вате имеется большое количество пор. При возникновении и распространении ударных волн в пористых материалах их энергия большей частью тратится на упругую и пластическую деформацию алюмосиликатной ваты, что эффективно снижает избыточное давление взрыва.

### ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное исследование распространения пламени стехиометрической смеси ацетилена и воздуха в трубопроводе в присутствии алюмосиликатной ваты. Получены данные для различных длин и положений пористого материала, обсуждены зависимости избыточного давления взрыва и скорости пламени от этих характеристик. Результаты показывают, что благодаря специфическим свойствам структур с высокой удельной площадью поверхности, алюмосиликатная вата может уменьшить прирост скорости пламени на выходе из трубопровода по сравнению с опытами без ваты и заметно снизить избыточное давление взрыва, если длина пористого материала превышает критическое значение. Кроме того, критическая по скорости пламени длина материала зависит от скорости пламени на входе в трубопровод, а критическая по избыточному давлению взрыва длина зависит также от входного избыточного давления взрыва.

Авторы выражают благодарность Государственному фонду естественных наук Китая (проект 50974027). Работа была также поддержана Программой науки и технологии провинции Ляонин.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Babkin V. S., Korzhavin A. A., Bunev V. A. Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media // *Combust. Flame.* — 1991. — V. 87, N 2. — P. 182–190.
2. Edwards K. L., Norris M. J. Materials and constructions used in devices to prevent the spread of flames in pipelines and vessel // *Mater. Design.* — 1999. — V. 20, N 5. — P. 245–252.
3. Mare L. D., Mihalik T. A., Continillo G., Lee J. H. S. Experimental and numerical study of flammability limits of gaseous mixtures in porous media // *Experim. Therm. Fluid. Sci.* — 2000. — V. 21, N 3. — P. 117–123.
4. Bubnovich V., Toledo M. Analytical modeling of filtration combustion in inert porous media // *Appl. Therm. Eng.* — 2007. — V. 27, N 7. — P. 1144–1149.
5. Zalosh R. Deflagration suppression using expanded metal mesh and polymer foams // *J. Loss. Prevent. Proc.* — 2007. — V. 20, N 4–6. — P. 659–663.
6. Hohansen C., Ciccarelli G. Combustion in a horizontal channel partially filled with a porous media // *Shock Waves.* — 2008. — V. 18, N 2. — P. 97–106.
7. Joo H. I., Ciccarelli G. Flame quenching performance of ceramic foam // *Combust. Sci. Technol.* — 2006. — V. 178, N 10–11. — P. 1755–1769.
8. Nie B., He X., Zhang R., Chen W., Zhang J. The roles of foam ceramics in suppression of gas explosion overpressure quenching of flame propagation // *J. Hazard. Mater.* — 2011. — V. 192, N 2. — P. 741–747.
9. Mujeebu M. A., Abdullah M. Z., Bakar M. Z. A., Mohamad A. A., Abdullah M. K. Applications of porous media combustion technology — A review // *Appl. Energy.* — 2009. — V. 86, N 9. — P. 1365–1375.
10. Oliveira A. A. M., Kaviany M. Nonequilibrium in the transport of heat and reactants in combustion in porous media // *Prog. Energy. Combust.* — 2001. — V. 27, N 5. — P. 523–546.
11. Birk A. M. Review of expanded aluminum products for explosion suppression in containers holding flammable liquids and gases // *J. Loss. Prevent. Proc.* — 2008. — V. 21, N 5. — P. 493–505.

Поступила в редакцию 13/1 2012 г.