

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

с приложением на CD-ROM

«Пожарная безопасность. Компании. Продукция. Услуги»

В НОМЕРЕ:

ОФИЦИАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Требования к экспертам и порядок их аттестации. РД ССПБ-3
Требования к порядку ведения государственного реестра участников и объектов Системы сертификации в области пожарной безопасности в Российской Федерации. РД ССПБ-4

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Расчет деформации балок из сталей с повышенными показателями огнестойкости в условиях осевого воздействия
Пожарная опасность навесных фасадных систем
Пожарная опасность алюминиевых композитных панелей
Пожаробезопасность пневмотранспортных установок горючих пылей
Экспресс-методы определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением при пожарах на наружных технологических установках

ОБМЕН ОПЫТОМ, ПРОБЛЕМЫ И СУЖДЕНИЯ

Совместное применение установок пожарной сигнализации и пожаротушения: возможности и преимущества
Тушение пожаров на объектах ОАО «Газпром»
Организация пожарной охраны в Великобритании
Пожарный аудит в Великобритании
Об итальянском законодательстве в области пожарной безопасности
О деятельности добровольных пожарных обществ в российских провинциальных городах в конце XIX – начале XX века

СТАТИСТИКА ПОЖАРОВ

Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 1-м полугодии 2006 г.

ИНФОРМАЦИЯ

Бухгалтерский баланс Фонда пожарной безопасности за 2005 г.

№ 5 2006

УДК 614.841

Н.А. Какуткина, ст. науч. сотр., А.А. Коржавин, и.о. зав. лаб., И.Г. Намятов, науч. сотр. (Институт химической кинетики и горения СО РАН), А.Д. Рычков, главный науч. сотр. (Институт вычислительных технологий СО РАН)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОГОРАНИЯ ЗАСЫПНЫХ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ*

Изложены результаты испытаний опытного образца огнепреградителя на проскок пламени метановоздушной смеси и на прогорание. Проведено численное моделирование процесса прогорания огнепреградителя, выявлены определяющие параметры и установлены параметрические зависимости времени сохранения его работоспособности.

Ил. 9, табл. 1, библиогр.: 21 назв.

Введение

Одним из важнейших приложений тепловой теории гашения пламени [1], [2] является создание промышленных огнепреградителей. Действие огнепреградителей основано на концепции критического диаметра d^* , определяемого из условия [3]:

$$d^* = Pe^* \kappa / S_u,$$

где Pe^* – критическое значение числа Пекле, соответствующее гашению; κ – температуропроводность газовой смеси, S_u – нормальная скорость горения.

Значение Pe^* , оцененное на основе анализа большого массива экспериментальных данных и рекомендуемое для технических расчетов, принимается равным 65 [3]. Эта величина является средним значением. Разброс данных в этом массиве значителен. Для учета этого разброса в практике применения огнепреградителей вводится коэффициент запаса, который больше 1. Уменьшение характерного размера пор, вызванное использованием коэффициента запаса, является причиной значительного увеличения гидравлического сопротивления. На практике это часто приводит к отказу от применения огнепреградителей. Высокие значения коэффициента запаса обусловлены недостатком наших знаний о процессах горения в условиях огнепреградителя. Так, в последние годы было показано, что учет эффектов чисел Льюиса в ламинарных пламенах [4], [5] значительно снижает разброс экспериментальных данных по Pe^* , а это дает основание к снижению коэффициента запаса для ряда смесей.

В зависимости от функционального назначения различают коммуникационные и резервуарные огнепреградители с огнегасящими элементами пористого или канального типа. Резервуарные огнепреградители, созданные с учетом критического диаметра, надежно защищают оборудование от проскока в его объем пламени. Однако для коммуникационных огнепреградителей [6] остается проблема прогорания. Термином прогорание обозначают явление медленного (со скоростями на 2–3 порядка ниже нормальной скорости пламени) распространения пламени через огнегасящий элемент без его термической деструкции. Опасность прогорания возникает в случае воспламенения газовой смеси за огнепреградителем в потоке непрерывно поступающего газа. Если скорость газа близка к нормальной скорости горения, то факел пламени может стабилизироваться на огнегасящем элементе, как в случае плоскопламенной горелки [7]. Постепенно прогревая огнепреграждающий элемент, пламя медленно перемещается вглубь него и может выйти в защищаемый объем. Физической основой прогорания огнепреградителей является существование низкоскоростного режима фильтрационного горения газа (ФГГ) [8]. Механизм и закономерности распространения стационарных волн ФГГ были подробно исследованы в ряде работ [8]–[15]. Однако процесс прогорания огнепреградителей принципиально нестационарен. О закономерностях распространения стационарных волн ФГГ известно очень мало. Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое исследование процесса прогорания пористых засыпных огнепреградителей.

Экспериментальный стенд для проведения испытаний огнепреградителей

Для проведения исследований использовали экспериментальный стенд (рис. 1). Стенд состоит из следующих основных частей:

* Работа выполнена при поддержке Кемеровского экспериментального завода средств безопасности.

испытываемого огнепреградителя (4);
 камеры сгорания (1);
 системы приготовления газовых смесей проточного типа (8) для испытаний по определению времени сохранения работоспособности огнепреградителя при воздействии пламени;
 системы приготовления газовых смесей высокого давления (9) для испытаний по определению способности огнепреградителя локализовать пламя;
 системы регистрации распространения пламени для различных испытаний.

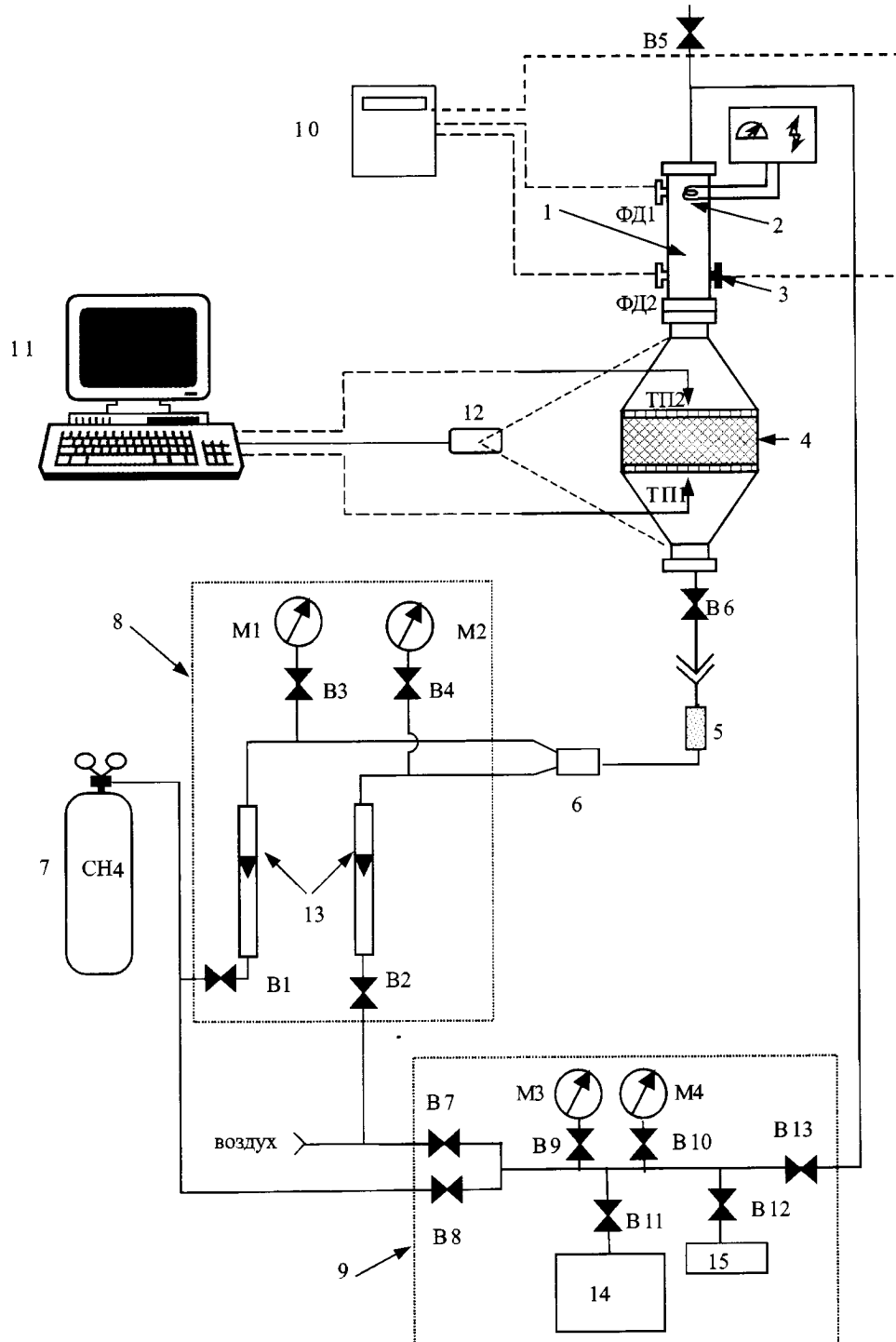


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда для исследования огнепреградителей:

1 – камера сгорания; 2 – источник зажигания; 3 – датчик давления; 4 – испытываемый огнепреградитель;
 5 – огнепреградитель, препятствующий распространению пламени в смеситель; 6 – смеситель газов проточного типа;
 7 – баллон с метаном; 8 – блок приготовления горючей смеси проточного типа; 9 – блок приготовления горючей смеси по парциальным давлениям; 10 – светолучевой осциллограф; 11 – компьютер; 12 – web-камера; 13 – ротаметры;
 14 – смеситель высокого давления; 15 – форвакуумный насос

Испытываемый огнепреградитель, предоставленный разработчиком – Кемеровским экспериментальным заводом средств безопасности, состоит из корпуса с внутренним диаметром 180 мм, входного и выходного конусообразных патрубков, огнегасящей насадки, удерживаемой с двух сторон стальными пластинами толщиной 5 мм, перфорированными отверстиями диаметром 5 мм и металлическими сетками с ячейкой 3×3 мм. В качестве пористой среды – гасителя пламени использованы гранулы электрокорунда произвольной формы размерами от 5 до 6 мм. Согласно [17], это соответствует среднему эквивалентному диаметру сферических гранул 3,8 мм. Высота насадки 75 мм, пористость 0,5, плотность материала зерна 3,9 г/см³.

Камера сгорания (1) предназначена для проведения испытаний огнепреградителя на способность локализовать пламя и представляет собой цилиндрическую трубу внутренним диаметром 100 мм и длиной 1 м. В одном ее торце размещен источник зажигания (2), представляющий собой пережигаемую нихромовую проволоку диаметром 0,3 и длиной 3 мм, на которую подается напряжение 40 В. На другом торце камеры находится фланец, обеспечивающий герметичное присоединение камеры к испытываемому огнепреградителю.

Система газоприготовления высокого давления (9) состоит из смесителя высокого давления (14), форвакуумного насоса (15), системы вентиля и образцовых манометров. Объем смесителя составляет 3,6 л, максимальное рабочее давление 100 МПа.

Система газоприготовления проточного типа (8) состоит из расходомеров, манометров М1, М2, проточного смесителя (6) и системы вентиля для дозированной подачи компонентов газовой смеси.

Система регистрации распространения пламени при испытаниях по определению способности огнепреградителя локализовать пламя представлена датчиком давления (3) и фотодиодами ФД1 и ФД2. Сигналы датчиков регистрируются с помощью светолучевого осциллографа (10).

Для регистрации распространения пламени в испытаниях по определению времени сохранения работоспособности огнепреградителя используются термопары ТП1 и ТП2, установленные вблизи поверхности огнегасящего элемента на входе и на выходе из него. Сигналы термопар регистрируются цифровым мультиметром и через равные, программно заданные промежутки времени записываются в памяти компьютера (11). Регистрация распространения пламени непосредственно по огнегасящему элементу в процессе его прогорания осуществляется с помощью web-камеры (12), также соединенной с компьютером.

Порядок проведения испытаний

Испытания способности огнепреградителя локализовать пламя проводились в следующем порядке. Гомогенные метановоздушные смеси необходимой концентрации предварительно готовились в смесителе высокого давления из технического метана и воздуха по парциальным давлениям компонентов. Для измерения парциальных давлений использовались образцовые манометры, точность приготовления смеси 0,1 % (об.).

После этого вакуумировалась вся система, включая трубопроводы, камеру сгорания (1), испытываемый огнепреградитель (4), до остаточного давления 0,5 кПа. Смесь подавалась в камеру сгорания и огнепреградитель, которые заполнялись ею до достижения давления, незначительно превышающего атмосферное. Далее открывался вентиль В6, и под ним устанавливалась кювета с бензином. Смесь в камере сгорания поджигалась провололочкой (2). Зажигание контролировалось сигналами фотодиодов ФД1 и ФД2 и датчика давления (3). Для измерения текущего давления использовались преобразователи «Сапфир 22ДИ» модели 2151, обеспечивающие непрерывное преобразование значения избыточного давления в унифицированный токовый сигнал. В работе применялись фотодиоды ФД-3, хромель-алюмелевые термопары ТХА, по ГОСТ Р 50431, с диаметром провода 0,5 мм. Запись всех сигналов (датчика давления, термопар, фотодиодов, метки момента зажигания) осуществлялась с помощью ультрафиолетового осциллографа Н071.5М. Прохождение пламени через огнепреградитель определялось по зажиганию бензина в кювете и показаниям термопары ТП2.

При проведении испытаний по определению времени сохранения работоспособности огнепреградителя при воздействии пламени камера сгорания отсоединялась от огнепреградителя, и выходной фланец огнепреградителя оставался открытым. На вход огнепреградителя устанавливался дополнительный огнепреградитель, предупреждающий проскок пламени в систему приготовления смеси.

Стехиометрическая метановоздушная смесь готовилась по расходам компонентов газовой смеси с учетом выходных давлений на ротаметрах, обусловленных сопротивлением системы при данных расходах. Метан с воздухом смешивались в смесителе, и смесь через предохранительный огнепреградитель и вентиль В6 поступала в испытываемый огнепреградитель.

У выходного фланца огнепреградителя смесь зажигалась факелом. В зависимости от скорости потока газа пламя либо входило в коническую часть огнепреградителя и стабилизировалось на поверхности огнегасящего элемента, либо стабилизировалось на выходном фланце огнепреградителя. В последнем случае факел вводили в коническую часть огнепреградителя, чтобы обеспечить зажигание газа

непосредственно на огнегасящем элементе. После зажигания факел убирали. Запускали систему регистрации температуры и видеоизображения. По мере разогрева огнегасящего элемента корпус огнепреградителя начинал светиться. По перемещению границы светящейся зоны следили за распространением волны горения по огнегасящему элементу. Обработка снимков в дальнейшем позволяла оценить скорость прогорания огнегасящего элемента. Когда волна горения достигала входного участка огнегасящего элемента, раздавался хлопок, что свидетельствовало о переходе горения в свободное пространство перед огнегасящим элементом. Одновременно происходил скачок температуры на термопаре, размещенной на входе в огнепреградитель. Время между зажиганием газа и хлопком считалось временем сохранения работоспособности огнепреградителя.

Результаты испытаний

Испытания огнепреградителя на способность локализовать пламя проводились для метановоздушных смесей с содержанием метана 8,5; 9,0; 9,5 и 10 %. Такой набор испытательных смесей обусловлен тем, что из-за эффектов селективной диффузии максимум скорости распространения пламени в пористых средах для метановоздушных смесей смещен в бедную область [4], [5]. Для каждой смеси проводилось три испытания. Испытания показали, что распространение пламени через огнепреградитель не происходит.

Определение времени сохранения огнепреградителем работоспособности проводилось в соответствии с п. 43 НПБ 254-99 [16] при расходах горючей смеси через огнепреградитель соответственно 100, 70, 40 и 10 % от номинального расхода. Номинальный расход был равен 13,9 л/с. Скорость течения газовой смеси непосредственно перед огнегасящим элементом составляла соответственно 53,5; 37,4; 21,4 и 5,4 см/с. Результаты испытаний приведены в таблице. Чтобы получить дополнительную информацию об условиях работы огнепреградителя в различных режимах прогорания, на наружной стенке верхней конической части корпуса была установлена термопара для регистрации температуры в процессе проведения опыта.

Результаты определения времени сохранения огнепреградителем работоспособности при воздействии пламени

Номер эксперимента	Расход горючей смеси, % от номинального значения	Время сохранения работоспособности	Примечания
1	10	Более часа	Без верхней сетки
2	10		
3	40	25 минут	С верхней сеткой
4	40	33 минуты	Без верхней сетки
5	70	32 минуты	Сгорела верхняя сетка
6	70	39 минут	Без верхней сетки
7	100	Более 30 минут	
8	100		

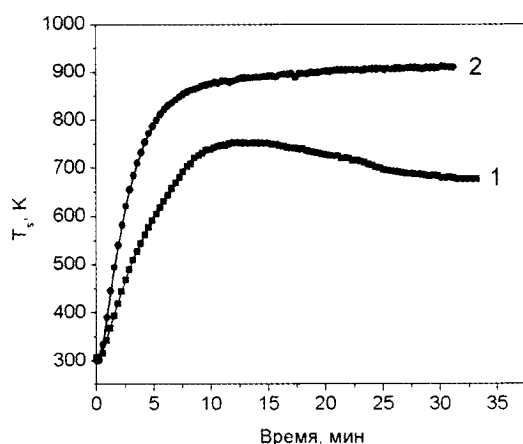


Рис. 2. Зависимость температуры внешней верхней конической части огнепреградителя от времени. Расход смеси: 40 % (кривая 1) и 100 % (кривая 2) от номинального значения

Процесс прогорания огнепреградителя состоял из двух стадий: формирования волны горения в пористой среде на границе со свободным объемом и распространения волны по огнегасящему элементу. Это можно видеть, если сопоставить записи температуры стенки выходной конусной части огнепреградителя для расходов 40 % от номинального, когда пламя прошло через огнегасящий элемент (рис. 2, кривая 1), и 100 % (рис. 2, кривая 2), когда прогорания не было. Во втором случае температура корпуса монотонно растет, выходя на стационарное значение, что свидетельствует о стабилизации положения волны горения. В первом же случае корпус разогревается в течение примерно 13 мин, а затем, после входа волны горения в пористую среду, начинает охлаждаться. Момент начала снижения температуры соответствует моменту входа волны горения в пористый огнегасящий элемент и началу его прогорания.

После формирования волны горения в огнегасящем элементе пламя начинает распространяться по элементу. Обработка видеозаписей показала, что траектория движения волны горения близка к линейной, что свидетельствует о стационарном распространении волны горения по пористому блоку. Средняя скорость движения волны горения в данном случае составила $6,2 \cdot 10^{-3}$ см/с. Скорость ламинарного пламени для стехиометрической метановоздушной смеси – 42 см/с. Таким образом, скорость распространения пламени в режиме прогорания на четыре порядка ниже, чем в режиме обычного ламинарного пламени.

В процессе прогорания пористая среда сильно разогревается. Измерение температуры пористой среды в 1,5 см от входной поверхности для расхода 40 % от номинального значения показало, что температура в волне горения достигает 1300 °С. При таких температурах части огнепреградителя могут подвергаться термической деструкции. В частности, в эксперименте, в котором была получена запись температуры, расплавилась металлическая сетка, находящаяся на выходе из пористой среды. После расплавления сетки часть экспериментов проводилась без нее. Это позволило установить еще одну особенность. Сопоставление времени сохранения работоспособности огнепреградителя с сеткой и без нее при одних и тех же расходах смеси показало, что без сетки время сохранения работоспособности больше, чем с сеткой на 8 мин – для 40 % и на 7 мин – для 70 % от номинального расхода (сравнить строки 3, 4 и 5, 6 в таблице). По нашему мнению, это связано с тем, что сетка способствует прогреву пористой среды, сокращая время формирования волны горения и, как следствие, уменьшая полное время сохранения работоспособности. Из данных эксперимента 4 (без сетки) и рис. 2 следует, что время входа пламени в пористую среду составляет около 13 мин, полное время сохранения работоспособности – 33 мин (см. строку 4 таблицы), т. е. волна горения формировалась в пористой среде в течение 13 мин и за 20 мин прошла оставшуюся часть пористой среды. В эксперименте 3 при тех же начальных условиях по расходу смеси, но с верхней сеткой прогорание произошло через 25 мин. Очевидно, что сокращение времени работоспособности обусловлено не сокращением времени распространения волны горения по огнегасящему элементу, так как условия горения внутри него не менялись, а изменением времени формирования волны горения. В случае с сеткой волна формировалась не 13, а 5 мин.

Наконец, следует отметить, что прогорание огнепреградителя происходит не при любых расходах газа. Так, из данных таблицы следует, что при 10 и 100 % от номинального расхода прохождение пламени через огнепреградитель не было зарегистрировано в течение более 30 мин. Показания термопар свидетельствовали о стабилизации пламени на границе пористой среды. Таким образом, существует ограниченный диапазон скоростей газа, при которых возможно прогорание.

Физические основы прогорания пористых сред огнепреградителей

Как показано в [6], физической причиной прогорания огнепреградителей является то, что при наличии потока газа, помимо обычного высокоскоростного режима горения, т. е. «проскока» пламени, возможен низкоскоростной режим фильтрационного горения газа. Типичные скорости распространения волны горения, характерные для этого режима, составляют $10^{-2} \div 10^{-3}$ см/с. Волны фильтрационного горения газа могут распространяться как в направлении потока газа (спутная волна), так и против потока (встречная волна). Прогорание огнепреградителя происходит в варианте встречной волны, поэтому вопрос о возможности прогорания в первую очередь сводится к вопросу существования встречной волны ФГГ.

Характеристики волн ФГГ, в том числе и направление распространения, зависят как от характеристик потока газовой смеси (состав смеси, скорость потока), так и от показателей пористой среды огнепреградителя (размер пор, пористость, теплоемкость и теплопроводность пористой среды) [8]. Оценку величин скорости прогорания в данных параметрических условиях, а также анализ параметрических зависимостей скорости можно провести в рамках стационарной модели ФГГ [14] или адаптированной к потребностям практики инженерной модели [15]. Однако, как следует из результатов экспериментов, полное время прогорания определяется не только периодом распространения волны горения по пористому блоку, но и временем формирования волны горения в пористом блоке. Причем время формирования волны, оцененное на основе описанных выше экспериментов, соизмеримо со временем распространения волны по пористому блоку. Не исключено, что при определенных условиях волна горения вообще не будет формироваться в пористом блоке, и такой огнепреградитель не будет прогорать. Это открыло бы дополнительные возможности для совершенствования огнепреградителей. Процесс формирования волны горения в пористом блоке принципиально не стационарен и не может быть проанализирован в рамках имеющихся аналитических моделей. Для его анализа был использован метод численного моделирования нестационарного процесса фильтрационного горения.

На рис. 3 представлена геометрия моделируемой системы. В трубе радиусом R_0 располагается пористый блок конечной толщины (рис. 3, а). Пористый блок может состоять из нескольких слоев пористых сред с различными характеристиками (рис. 3, б). Такая модификация позволяет исследовать влияние различных прослоек и сеток на характеристики прогорания огнепреградителя. Слева в пористый блок втекает горючая смесь, а справа выходят продукты горения.

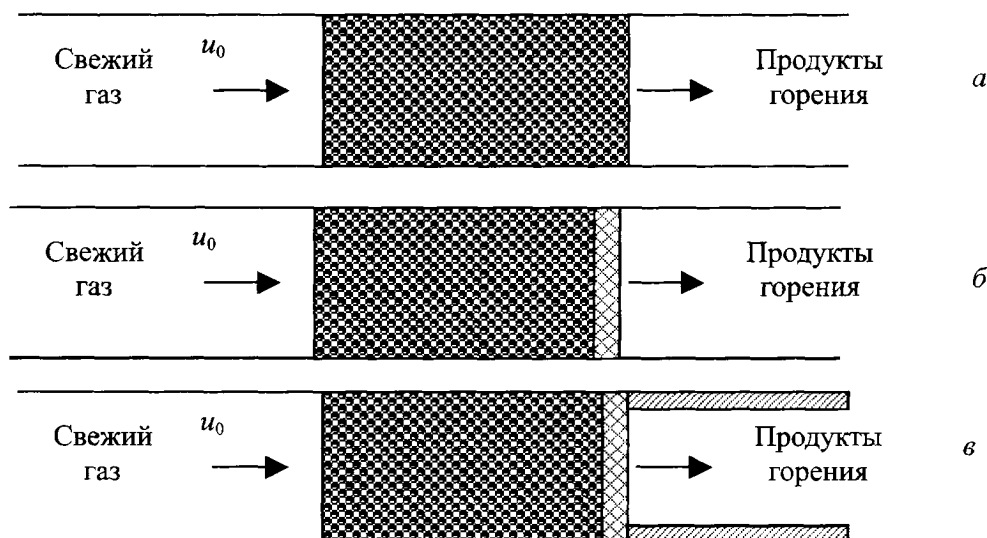


Рис. 3. Геометрия модельной системы

Система уравнений, описывающая распространения одномерной нестационарной волны горения в химически инертной пористой среде, состоит из уравнений переноса тепла по газу, пористой среде, переноса массы недостающего компонента газовой смеси, сохранения полного количества вещества в потоке и уравнения газового состояния:

$$\varepsilon_g \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_g \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \alpha S_c (T_s - T) + Q \varepsilon_g \rho Y W; \quad (1)$$

$$\rho_s^0 (1 - \varepsilon_g) c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 - \varepsilon_g) \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right] + \alpha S_c (T - T_s) + 2 \frac{\alpha_w}{R_w} (T_0 - T_s); \quad (2)$$

$$\varepsilon_g \rho \left(\frac{\partial Y}{\partial t} + u \frac{\partial Y}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_g \rho D \frac{\partial Y}{\partial x} \right) - \varepsilon_g \rho Y W; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_g \rho}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_g \rho u}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$\rho T = \text{const.}$$

где ε_g – пористость; ρ и ρ_s – плотности газа и материала пористой среды; c_p и c_s – удельные теплоемкости; T и T_s – температуры газа и инертной пористой среды; u – скорость газа; λ , λ_s – коэффициенты теплопроводности; α – коэффициент межфазного теплообмена; S_c – удельная поверхность пористой среды; Q – тепловой эффект реакции, $Q = c_p (T_b - T_0)$, T_b – адиабатическая температура горения газовой смеси; Y – относительная массовая концентрация недостающего компонента газовой смеси; W – скорость обобщенной одностадийной химической реакции, $W = k_0 \exp [-E / (RT)]$, где k_0 – предэкспоненциальный множитель, E – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная; α_w – коэффициент внешней теплоотдачи; D – коэффициент диффузии недостающего компонента газовой смеси.

Граничные условия для системы (1) задаются в следующем виде. На левой границе трубы: $u = u_{\text{вп}}(t)$, $T = T_{\text{вп}}$, $Y = Y_{\text{вп}}$, где индексом *вп* помечены входные значения скорости, температуры газа и концентрации недостающего реагирующего компонента в газовой смеси. На правой границе задаются «мягкие» краевые

условия: $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial Y}{\partial x} = 0$. Начальные условия ($t = 0$): $u = u_0(x)$, $T = T_0(x)$, $T_s = T_{s0}(x)$, $Y = Y_0$. Зажигание могло осуществляться открытым пламенем или прогретым участком пористой среды. Тип зажигания задается начальными профилями $T_0(x)$ и $T_{s0}(x)$.

Как частный случай данная система описывает обычное ламинарное пламя в газе. Для этого в системе уравнений необходимо предположить, что ε_g равно 1.

Для численного решения системы (1)–(4) использовалась конечно-разностная схема, основанная на Лагранжевой аппроксимации конвективных членов. Поскольку протяженность зоны горения очень мала, то для достаточно точного расчета параметров течения в ней использовалась неравномерная адаптивная разностная сетка, максимальное сгущение которой имело место в окрестности максимума функции тепловыделения в уравнении (1). По мере перемещения этого максимума разностная сетка перестраивалась.

Результаты моделирования

Моделировалось прогорание огнепреградителя с пористым блоком толщиной 75 мм. Слева подается газовая смесь с заданной скоростью течения. Зажигание осуществляется справа от пористого блока открытым пламенем. Программа рассчитывает в каждый момент времени профили температуры газа и пористой среды, профиль концентрации метана и определяет координату зоны химической реакции.

В расчетах использовались следующие значения параметров: $\rho_p = 3,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\varepsilon_g = 0,45$, $c_p = 800 \text{ Дж/(кг·К)}$. В качестве среднего размера зерна было принято значение $d = 5 \text{ мм}$. Коэффициент теплообмена рассчитывался по соотношениям, рекомендованным в [17] для засыпных пористых сред:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{d_{\text{eff}}}, \quad \text{Nu} = 0,395 \text{Re}^{0,64} \text{Pr}^{0,33}, \quad \text{Re} = \frac{|u| d_{\text{eff}} \rho}{\mu}, \quad d_{\text{eff}} = \frac{2\varepsilon_g}{3d(1-\varepsilon_g)},$$

где Nu , Re и Pr – числа соответственно Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; d_{eff} – эффективный диаметр поры; μ – динамическая вязкость газа. Удельная поверхность определялась как $S_g = 6(1 - \varepsilon_g) / d$. Теплопроводность пористой среды не равна теплопроводности материала зерна, так как она определяется, главным образом, передачей тепла между зернами, а не по зерну. Для данной засыпки значение λ_s принято равным $0,5 \text{ Вт/(м·К)}$.

Моделировалось горение стехиометрической метановоздушной смеси с $T_b = 2320 \text{ К}$, $c_p = 10^3 \text{ Дж/(кг·К)}$, $\lambda = 0,1 \text{ Вт/(м·К)}$. Значения параметров скорости химической реакции оценивались на основе результатов лабораторных экспериментов по фильтрационному горению метановоздушных смесей [18] и приняты равными: $k_0 = 1 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, $E = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$. По результатам этих же экспериментов оценивался уровень теплотер $\alpha_w = 50 \text{ м}^2/\text{К}$.

На рис. 4 показаны результаты расчета для входной скорости газа $0,24 \text{ м/с}$. Согласно рис. 4, в процессе прогорания огнепреградителя можно выделить три стадии.

Первая стадия – это стадия входа пламени в пористый блок. Пробежав незаполненную часть трубы от точки зажигания со скоростью $S_u - u_0$, где S_u – нормальная скорость пламени, а u_0 – скорость течения газа, пламя останавливается на правой границе пористого блока. Войти в пористый блок пламя не может, так как размеры пор ниже критического уровня. Постепенно высокотемпературное газовое пламя, стабилизированное на границе блока, разогревает поверхностные слои пористого блока. Теплотер от пламени в узкой поре с прогретыми стенками меньше, чем с холодными, и в результате пламя входит в пористую среду. На рис. 4, б видно, что в приведенном примере эта стадия заняла около 5 мин, ей соответствуют кривые 1–3 на рис. 4, а и участок ОА на траектории движения волны. Все это время координата фронта пламени практически не менялась и совпадала с координатой правой границы пористого блока.

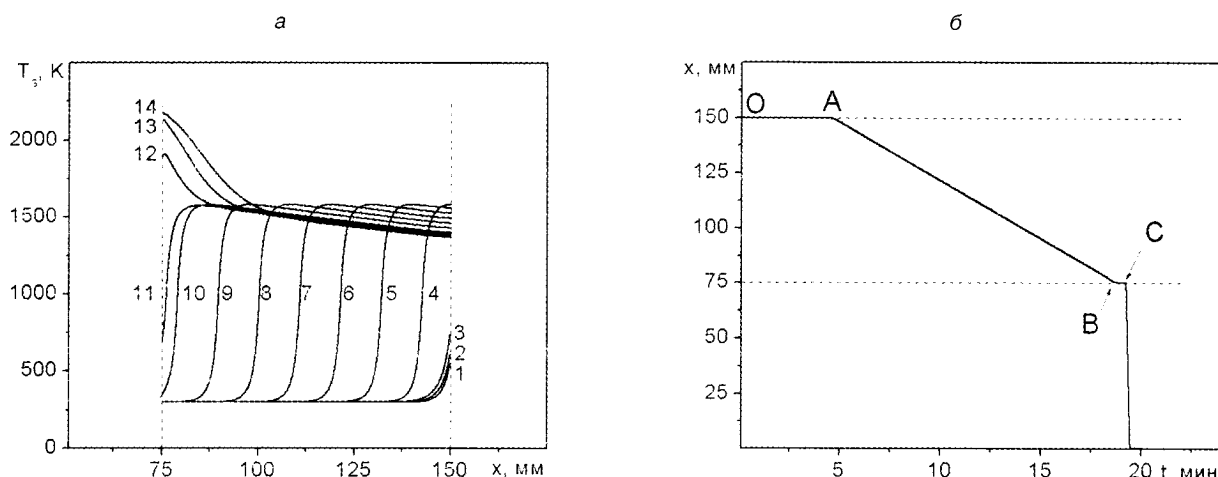


Рис. 4. Трансформация со временем температурных профилей в пористом блоке (а) и траектория распространения волны горения в пористом блоке (б). Время с момента зажигания в минутах: 0,5 (1); 1 (2); 4 (3); 6 (4); 8 (5); 10 (6); 12 (7); 14 (8); 16 (9); 18 (10); 18,5 (11); 19 (12); 19,5 (13); 20 (14). Скорость газового потока $0,24 \text{ м/с}$. Штриховые линии показывают границы пористого блока

Вторая стадия – это распространение сформированной волны горения по пористому блоку. Волна горения представляет собой комплекс из тепловой волны в газе, пористой среде и волны химической реакции. И только в такой связке возможно распространение пламени по пористому блоку. На рис. 4 видно, что волна горения распространяется по пористому блоку стационарно: форма температурного профиля не меняется в процессе распространения волны. На траектории движения эта стадия выглядит прямой линией АВ, наклон которой характеризует скорость распространения волны. В приведенном примере скорость составляла $8,7 \cdot 10^{-3}$ см/с, что близко к значению $6,2 \cdot 10^{-3}$ см/с, измеренному в эксперименте.

Третья стадия – это стадия выхода пламени из пористого блока. Как следует из данных, приведенных на рис. 4, б, при приближении к левой границе пористого блока пламя на некоторое время задерживается на границе блока (участок ВС), не выходя в свободную часть трубы. При этом пористая среда разогревается значительно сильнее, чем в стационарной волне (см. рис. 4, а). В приведенном примере длительность третьей стадии составила около 1 минуты, после чего пламя вышло из пористого блока и далее распространялось по свободной части трубы со скоростью $S_{\text{н}} - u_{\text{н}}$. Однако в зависимости от характеристик газовой смеси и пористого блока длительность третьей стадии может меняться в очень широких пределах. В отдельных случаях торможения на левой границе не наблюдается вообще. В ряде случаев расчеты показывают стабилизацию пламени на левой границе, т. е. пройдя пористый блок, пламя не может его покинуть. При этом поверхность пористого блока разогревается до температуры, близкой к температуре адиабатического пламени. Получается система, аналогичная излучательной горелке.

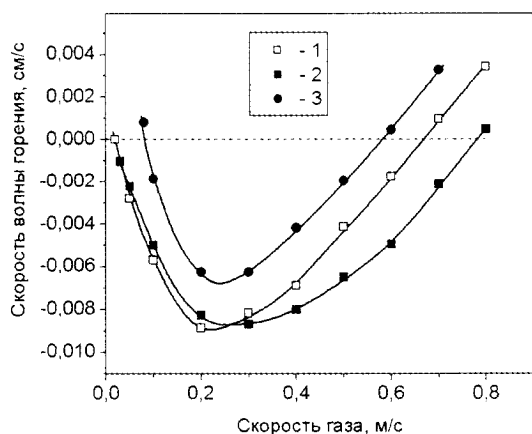


Рис. 5. Зависимость скорости волны горения стехиометрической метановоздушной смеси в пористой среде от скорости течения газа:

1 – $d = 5$ мм, $\alpha_{\text{н}} = 50$ м²/К; 2 – $d = 3$ мм, $\alpha_{\text{н}} = 50$ м²/К;
3 – $d = 5$ мм, $\alpha_{\text{н}} = 1000$ м²/К

Рассмотрим более подробно механизмы и закономерности, характерные для каждой стадии процесса прогорания. Закономерности стационарных волн фильтрационного горения газа изучены достаточно хорошо. Отметим лишь некоторые закономерности стадии стационарного распространения применительно к прогоранию огнепреградителей. На рис. 5 приведены скорости распространения волны горения в пористой среде V в зависимости от скорости u_0 течения газа в свободной (без пористой среды) части трубы (скорость течения в пористой среде равна $u_0 / \varepsilon_{\text{с}}$). Положительным значениям скорости волны соответствует распространение газовой смеси по потоку, а отрицательным – против потока. Из данных, приведенных на рис. 5, следует, что встречное по отношению к потоку распространение волн горения, соответствующее режиму прогорания огнепреградителя, возможно лишь в ограниченной области скоростей газа. При очень больших и очень малых значениях скорости газа прогорание невозможно. Это свойство волн ФГГ согласуется с тем фактом, что в экспериментах прогорание огнепреградителя наблюдалось только при 40 и 70 % от номинального расхода, а при 10 и 100 %, соответствующих малым и большим скоростям газа, прогорание не зарегистрировано.

Второе важное свойство зависимостей $V(u_0)$ – немонотонность и наличие максимума (по абсолютной величине) скорости встречной волны горения. Это означает, что существует область наиболее опасных скоростей течения газа, где прогорание идет наиболее быстро. Рис. 5 иллюстрирует также влияние параметров пористого блока на характер зависимости $V(u_0)$. В частности, уменьшение среднего размера зерна засыпки до 3 мм в данной области параметров почти не меняет максимальную скорость прогорания и несколько увеличивает область скоростей газа, в которой возможно прогорание. Увеличение теплотерь от системы при прочих равных условиях приводит к сужению области прогорания и уменьшению максимальной скорости прогорания, при этом улучшаются характеристики огнепреградителя. Заметим, однако, что обеспечение столь больших теплотерь, дающих заметное улучшение характеристик огнепреградителя, возможно только при принятии специальных технических мер, например, посредством введения в пористую среду теплообменника, как это было сделано в [19].

Сосредоточимся на механизмах и закономерностях, действующих в нестационарной стадии входа волны горения в пористый блок. Распространение пламени по пористой среде с размером пор меньше критического возможно только в связке с тепловой волной в твердой фазе. Поэтому на стадии входа пламя должно прогреть близлежащие участки пористой среды и сформировать тепловую волну.

На рис. 6 показано изменение со временем профилей температуры газа и пористой среды в процессе формирования волны фильтрационного горения газа в пористом блоке. Профиль температуры газа (1) представляет собой структуру ламинарного адиабатического газового пламени, распространяющегося стационарно по участку трубы, свободного от пористой среды, со скоростью $V = S_u - u_0$. Далее пламя подходит к границе пористого блока и останавливается. Стабилизация происходит потому, что, когда пламя подходит вплотную к пористому блоку, часть зоны подогрева пламени оказывается в поровом пространстве, см. рис. 6, профиль температуры газа (2). При этом меняется тепловой баланс в газе. Кондуктивный нагрев газа в поре пламенем уравнивается конвективным сносом тепла набегающим потоком газа и теплопотерями в пористую среду. Причем стабилизация пламени на границе осуществляется автоматически. В частности, если кондуктивный прогрев газа превалирует, поровое пространство глубже прогреется, пламя глубже войдет в поровое пространство, что приведет к увеличению теплопотерь от пламени и уравниванию тепловых потоков. Стабилизация пламени на границе сопровождается снижением температуры горения газа (см. рис. 6, профили температуры газа 1 и 2), что обусловлено теплопотерями от газа в пористую среду. Если бы температура пористой среды не менялась, то пламя так и осталось бы на границе пористого блока. Однако пористая среда прогревается за счет межфазного теплообмена с подогретым газом в поровом пространстве (см. рис. 6, профиль температуры пористой среды 2). Сначала прогрев пористой среды идет очень медленно за счет низкого температурного напора $T - T_0$ в поровом пространстве. Температура пористой среды на этой стадии везде ниже температуры газа в пламени. По мере прогрева поверхностных слоев пористой среды становится заметным действие теплопроводности пористой среды, которая переносит тепло вглубь пористого блока. В результате уже через 0,5 мин (см. рис. 6, кривые 3) в структуре волны горения возникает область, где температура пористой среды выше, чем газа (область отрицательного температурного напора). При этом возникает положительная обратная связь. Новые порции газа, проходя область с отрицательным температурным напором, подогреваются, увеличивая энтальпию горящего газа. Это приводит к повышению температуры горения (сравнить профили температуры газа 2 и 3) и незначительному смещению зоны горения вглубь пористой среды.

Расчеты показывают, что вспышка газа в поровом пространстве происходит, когда температура поверхности пористой среды достигает 750–900 К в зависимости от скорости течения газа. Вход высокотемпературной зоны газового горения в поровое пространство приводит к резкому увеличению температурного напора и, как следствие, к быстрому разогреву пористой среды (сравнить профили температуры пористой среды 5 и 6) и появлению области охлаждения в профиле температуры газа.

В описанном механизме формирования волны горения в пористом блоке явно прослеживается активная роль теплопроводности пористой среды в процессе входа волны горения в пористый блок, а именно: увеличение теплопроводности должно приводить к увеличению времени входа. Действительно, для входа зоны горения в поровое пространство необходимо прогреть поверхность пористого блока до температуры вспышки. Теплопроводность «размазывает» тепло, получаемое от газа, по объему пористой среды, снижая тем самым скорость прогрева поверхностных слоев и увеличивая время прогрева поверхности до температуры вспышки. Такие параметры, как пористость, плотность и теплоемкость пористой среды, характеризуют «тепловую нагрузку» пористой среды на горящий газ: чем выше плотность и теплоемкость и ниже пористость, тем медленнее, при прочих равных условиях, идет разогрев пористой среды и тем больше должно быть время входа пламени в пористый блок.

В третьей стадии прогорания, как следует из данных рис. 4, может наблюдаться задержка или даже стабилизация пламени, т. е. пламя, пройдя весь блок, не может выйти в свободное пространство. Однако, хотя обнаруженный эффект представляет интерес с научной точки зрения, едва ли он может рассматриваться как фактор, влияющий на работоспособность огнепреградителя. Поскольку стабилизация

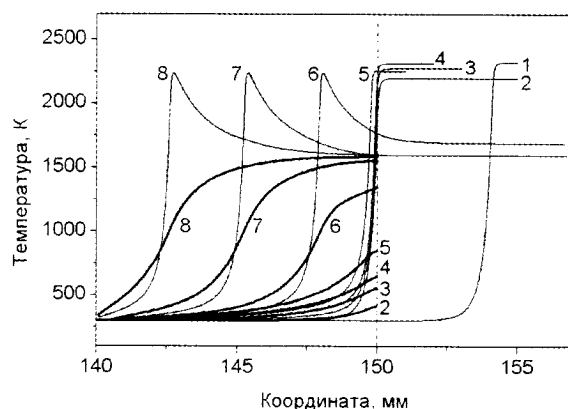


Рис. 6. Профили температуры газа (тонкие линии) и пористой среды (толстые линии) в стадии входа волны горения в пористый блок. Время с момента загорания в секундах: 0,1 (1); 0,5 (3); 1,5 (4); 4,5 (5); 5 (6); 5,5 (7); 6 (8). Скорость газового потока 0,4 м/с. Штриховая линия показывает правую границу пористого блока

осуществляется непосредственно на границе пористого блока с защищаемым объемом, даже незначительные флуктуации скорости течения газа, обусловленные как сбоями в системе нагнетания газа, так и локальными неоднородностями течения газа в засыпной пористой среде, могут привести к срыву пламени с поверхности пористого блока и переходу в защищаемый объем. Поэтому в дальнейшем задержкой на выходе будем пренебрегать и под временем прогорания огнепреградителя понимать сумму времени входа и распространения пламени по пористому блоку. Управление временем входа пламени в пористый блок может служить также реальной основой для улучшения характеристик огнепреградителя.

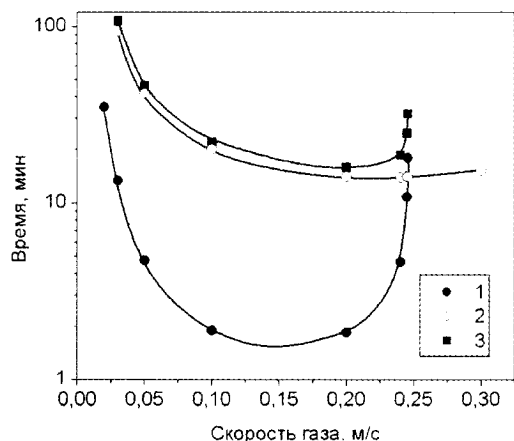


Рис. 7. Зависимости времени формирования волны горения (1), времени прохождения пористого блока (2) и полного времени прогорания огнепреградителя (3) от скорости потока газа. Толщина пористого блока 7,5 см

Время входа и времени входа от скорости газа имеют подобную U-образную форму, полной корреляции между ними нет. В частности, верхний предел по скорости газа для зажигания возникает в области скоростей газа, соответствующих наиболее быстрому распространению волны горения по пористому блоку. Причина такого расхождения в том, что в стационарной волне горения газа в пористой среде важную роль играет разогрев твердого каркаса (зависящий от скорости течения газа), который в стадии формирования волны еще очень мал.

Из данных, приведенных на рис. 7, следует, что для пористого блока в широком диапазоне скоростей газа полное время прогорания засыпного огнепреградителя (кривая 3) определяется главным образом временем распространения пламени по блоку, и только при скоростях газа, близких к пределам зажигания, лимитирующей становится стадия входа волны горения в пористый блок. Тем не менее, роль стадии зажигания нельзя недооценивать. Так, сопоставляя рис. 5 и 7, легко видеть, что учет стадии зажигания резко сужает область скоростей газа, при которых возможно прогорание засыпного огнепреградителя: область распространения $0,03 < u < 0,68$ м/с сужается до диапазона $0,03 < u < 0,25$ м/с за счет пределов зажигания.

Рассмотрим пути улучшения характеристик огнепреградителя. Идеальным с точки зрения прогорания мог бы считаться огнепреградитель, в который пламя вообще не входит во всем допустимом диапазоне скоростей течения газа. Теоретически достижение такого результата возможно, например, за счет сильного уменьшения пористости и/или размера пор огнепреградителя. Однако практически это привело бы к неоправданно высокому сопротивлению огнепреградителя газовому потоку, что неприемлемо для обычных условий эксплуатации коммуникационных огнепреградителей. Поэтому под улучшением характеристик огнепреградителя понимается увеличение времени сохранения им работоспособности. Увеличить время прогорания огнепреградителя можно, увеличивая время распространения по пористому блоку или время входа пламени в пористую среду. В случае засыпных пористых сред возможности влияния на время распространения пламени весьма ограничены. Действительно, теплофизические свойства пористой среды – плотность, теплоемкость – примерно одинаковы для всех огнеупорных материалов, которые могут использоваться в качестве засыпки. Теплопроводность пористой среды определяется, главным образом, передачей тепла не по гранулам засыпки, а между ними и является характеристикой не столько материала засыпки, сколько размера и формы зерна, и также меняется

незначительно [17]. Пористость засыпных пористых сред тоже определяется в основном формой зерна и меняется в узком диапазоне от 0,4 до 0,5 [17]. Остается всего два параметра процесса, которые можно менять в относительно широких пределах – средний размер зерна пористой среды и уровень теплопотерь. На рис. 5 видно, что довольно значительное уменьшение размера зерна (от 5 до 3 мм) не приводит к существенному изменению скорости стационарной волны горения в пористой среде, а значит, и время распространения также изменится мало. Дальнейшее уменьшение размера зерна нецелесообразно из-за резкого повышения сопротивления пористого блока. Увеличение теплопотерь от пористой среды заметно уменьшает скорость распространения (см. рис. 5) и может рассматриваться как путь улучшения характеристик огнепреградителя. Однако, как уже отмечалось, столь значительное увеличение теплопотерь требует специальных технических решений.

Рассмотрим пути влияния на время входа пламени в пористую среду. В процессе входа участвуют только ближайшие к границе пористого блока слои пористой среды. Поэтому следует ожидать, что изменение характеристик приповерхностных слоев засыпки может повлиять на время входа. Хорошо известно [17], что в случае засыпных пористых сред локальная пористость приповерхностных слоев пористого блока (на глубину 1–2 размеров зерна) примерно на 20 % выше, чем в объеме. Смоделируем этот эффект введением дополнительного слоя пористой среды толщиной 5 мм с пористостью 0,55, как показано на рис. 3, б. Сопоставление кривых 1 и 2 на рис. 8 позволяет оценить влияние краевого эффекта на время входа пламени в пористый блок. Во всем диапазоне скоростей газа учет краевого эффекта приводит к существенному, в несколько раз, уменьшению времени входа. Кроме того, краевой эффект ответствен за сдвиг верхнего предела зажигания по скорости газа с 0,5 до 0,29 м/с.

Скорость прогрева крайних слоев пористой среды, необходимого для входа волны горения в пористый блок, определяется величиной суммарного потока тепла, поступающего к границе пористого блока. Поэтому любые дополнительные потоки тепла, помимо тепла от горящего газа, направленные к пористому блоку или от него, должны влиять на время входа. Одним из таких тепловых потоков, от влияния которого трудно избавиться в реальном огнепреградителе, является кондуктивный теплообмен пористой среды с корпусом огнепреградителя. Массивные металлические стенки в выходной части огнепреградителя нагреваются продуктами горения газа. Теплопроводность материала стенок велика. Поэтому при наличии температурного градиента между стенкой в свободной выходной части огнепреградителя и пористым блоком возникает продольный кондуктивный поток тепла. В расчетах этот эффект моделировался следующим образом. Участок трубы в выходной части огнепреградителя рассматривался как среда с очень высокой пористостью и теплопроводностью, соответствующей теплопроводности материала стенки (рис. 3, в). Пористость оценивалась из соотношения площадей поперечного сечения стенки и свободного объема в выходной части реального огнепреградителя и составила $\varepsilon_k = 0,91$. Величина теплопроводности стенки принималась равной 70 Вт/(м·К) [20]. Коэффициент межфазного теплообмена рассчитывался как для теплообмена в трубах [21]. В пористом блоке учитывался краевой эффект. Результаты расчета показаны на рис. 8, кривая 3. Из сравнения кривых 2 и 3 следует, что влияние теплообмена со стенкой на время входа неоднозначно. В области малых и умеренных скоростей газа влияние стенки приводит к заметному замедлению входа пламени в пористый блок и сдвигу нижнего предела зажигания по скорости газа с 0,02 до 0,045 м/с. В области больших скоростей газа, начиная с 0,285 м/с, влияние стенки, напротив, приводит к ускорению входа и расширению области зажигания с 0,29 до 0,31 м/с.

Обнаруженный достаточно сильный краевой эффект указывает еще один путь влияния на время входа, а именно: введение перед пористым блоком узкой прослойки пористой среды с параметрами, отличными от параметров основного пористого блока. Это могут быть различного рода сетки, тонкие слои засыпных пористых сред или перфорированные пластины, которые пламя должно преодолеть прежде, чем войдет в пористый блок. Такие прослойки могут быть, кроме того, элементами конструкции огнепреградителя.

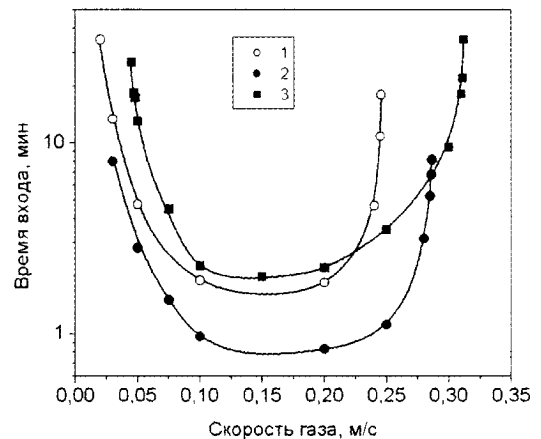


Рис. 8. Зависимость времени входа пламени в пористый блок от скорости газа:

1 – пористый блок без краевых эффектов; 2 – пористый блок с краевыми эффектами; 3 – пористый блок с краевыми эффектами + влияние стенки трубы

Так, например, в испытываемом огнепреградителе перед пористым блоком устанавливалась металлическая сетка, назначением которой было предотвращение разбрасывания засыпки.

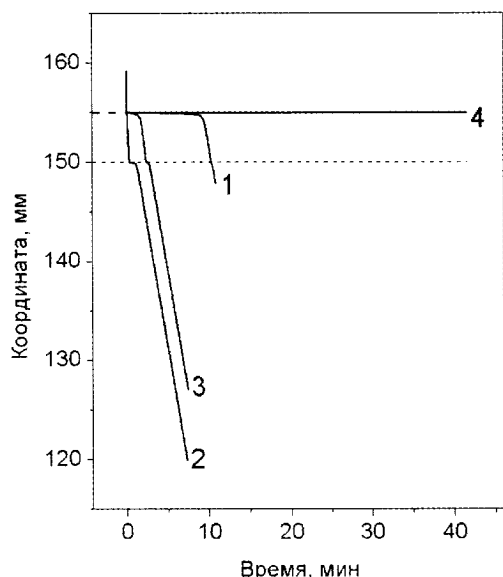


Рис. 9. Траектории распространения пламени при прогорании огнепреградителя с разными прослойками на правой границе пористого блока:

1 – без прослойки; 2 – металлическая сетка, $\varepsilon_k = 0,8$; 3 – металлическая сетка, $\varepsilon_k = 0,7$; 4 – перфорированная металлическая пластина, $\varepsilon_k = 0,2$. Скорость газа 0,3 м/с. Штриховые линии показывают положение прослойки

Рис. 9 иллюстрирует влияние некоторых прослоек на время входа пламени в пористый блок при скорости газа 0,3 м/с. При моделировании учитывалось влияние стенок огнепреградителя. Толщина прослойки принята равной 5 мм. Прослойки располагаются между координатами $150 < x < 155$ мм (положение прослойки показано штриховыми линиями). Кривая 1 на рис. 9 показывает траекторию входа и распространения пламени в обычном пористом блоке с краевым эффектом, моделируемым как прослойка пористой среды с теми же параметрами, что основной блок, но с $\varepsilon_k = 0,55$. Видно, что время входа составляет около 10 мин. Кривая 2 на рис. 9 демонстрирует влияние прослойки, моделирующей металлическую сетку, установленную в реальном огнепреградителе. Размер ячейки сетки составляет 3 мм. Величина пористости, оцененная для этой сетки, составила $\varepsilon_k = 0,8$, плотность и теплоемкость взяты такими же, как и для стали, а теплопроводность – как для основного пористого блока. На рис. 9 видно, что пламя проскакивает такую сетку, практически не замечая ее, и останавливается на границе пористого блока, расположенного при $x < 150$ мм. При этом сетка начинает очень быстро разогреваться,

так как через нее текут горячие продукты горения (большой тепловой напор), а тепловая нагрузка сетки $c_p \rho_s (1 - \varepsilon_k)$ невелика из-за большой пористости. Прогрев поверхности пористого блока в этом случае происходит не за счет конвективного теплообмена со слабо прогретым газом в поровом пространстве, как на рис. 4, а за счет гораздо более эффективного механизма кондуктивного теплообмена с сильно разогретой сеткой (тепловой контакт считается идеальным). Поэтому время входа пламени в пористый блок сокращается примерно до одной минуты. Кривая 3 на рис. 9 показывает влияние такой же сетки, но с $\varepsilon_k = 0,7$. В этом случае пламя уже замечает сетку и стабилизируется сначала на ней, однако быстро, за 2 мин, нагревает ее и входит под сетку, при этом скорость прогрева сетки резко возрастает. Второй раз пламя стабилизируется на границе сетки с пористым блоком. Благодаря быстрому прогреву поверхности пористого блока за счет все того же эффективного механизма кондуктивного теплообмена с разогретой сеткой вход пламени в пористый блок осуществляется менее, чем за 1 минуту (рис. 9, кривая 3). Наконец, моделировалось влияние прослойки, представляющей собой перфорированную стальную пластину с отверстиями диаметром 2,5 мм и пористостью $\varepsilon_k = 0,2$. В такую пластину пламя не смогло войти даже за 40 мин (рис. 9, кривая 4).

Таким образом, введение различных прослоек перед пористым блоком позволяет варьировать время входа в пористый блок от 1 до более чем 40 мин. Нетривиально, что добавка дополнительной границы, которая, казалось бы, требует дополнительного времени для адаптации волны горения к новым условиям, может приводить не только к увеличению, но и к значительному уменьшению времени прогорания благодаря включению более эффективных механизмов прогрева. Заметим, что результаты моделирования качественно подтверждаются данными эксперимента. Так, при испытаниях огнепреградителя было обнаружено, что установка металлической сетки перед пористым блоком уменьшает время входа в пористый блок на 7–8 мин. Моделирование также показало, что введение сетки уменьшило время входа с 9 до 1 мин (рис. 9, кривые 1, 2). Таким образом, целенаправленное введение прослоек с определенными свойствами в конструкцию огнепреградителя может быть эффективным механизмом повышения надежности огнепреградителя.

Заключение

Проведенное математическое моделирование процесса прогорания огнепреградителей не претендует на количественное описание экспериментальных результатов, прежде всего, потому, что оно оперирует не с реальной кинетикой химических реакций в пламени, а с эффективной одностадийной реакцией первого порядка. Кроме того, существуют трудности с оценкой термодинамических характеристик пористой среды, например, теплопроводности. Вместе с тем результаты работы позволили выявить физические механизмы процесса прогорания и установить некоторые закономерности.

1. Проведены испытания образца огнепреградителя и установлена его способность локализовать пламя метановоздушной смеси; по времени сохранения работоспособности под действием пламени (менее 30 мин) огнепреградитель может быть отнесен ко второму классу в соответствии с классификацией НПБ 254-99 [16].

2. Экспериментально и теоретически показано, что процесс прогорания состоит из двух стадий – нестационарной стадии формирования волны горения в пористом блоке огнепреградителя и стадии стационарного распространения горения по нему; характерные времена двух стадий соизмеримы.

3. Распространение пламени по огнепреградителю, так же, как и формирование волны горения в нем, возможно в ограниченном диапазоне скоростей газа; за счет стадии формирования волны горения параметрическая область прогорания огнепреградителя может быть существенно сужена.

4. Время входа пламени в пористый блок и время распространения пламени по блоку являются немонотонными, имеющими минимум функциями скорости газа;

5. Возможности влияния на время распространения пламени по пористому блоку ограничены ввиду невозможности изменения в широком диапазоне одних параметров процесса и слабой зависимости скорости распространения от других в допустимом диапазоне изменения.

6. Время входа пламени в огнегасящий элемент можно менять в широком диапазоне благодаря тонким прослойкам с характеристиками, отличными от характеристик основного блока.

7. Тепловой контакт огнегасящего элемента с корпусом огнепреградителя, прогреваемым продуктами горения, увеличивает время входа при малых скоростях газа и уменьшает – при больших.

Все результаты в данной работе получены для огнепреградителей засыпного типа. В то же время нельзя не признать, что каналные огнепреградители имеют ряд преимуществ. При прочих равных условиях они дают меньшее сопротивление потоку, чем засыпные. Это обусловлено прямолинейностью каналов, в отличие от разветвленных криволинейных каналов в пористой среде. Прямолинейность каналов также повышает устойчивость к запыленности продуваемой смеси. Общеизвестно, что засорение пор огнепреградителя пылью выводит его из строя вследствие резкого увеличения сопротивления. Изменение направления движения запыленного потока, характерное для течения в порах засыпных огнепреградителей, увеличивает осаждение пыли в пористом блоке. Наконец, каналная структура позволяет точно выдержать требования к размеру канала без дисперсии, характерной для пористых сред. Это дает основание для снижения коэффициента запаса при выборе диаметра огнегасящих каналов.

В случае огнепреградителей каналного типа определяющие параметры процесса оказываются в совершенно иной параметрической области. Тем не менее, установленные механизмы прогорания позволяют сделать некоторые прогнозы относительно поведения каналных огнепреградителей. Например, такой важный для формирования и распространения волны горения параметр, как теплопроводность пористой среды, в случае каналных огнепреградителей может быть на 1–2 порядка выше, чем для засыпных. Проведенные исследования позволяют предположить, что увеличение теплопроводности должно привести к повышению роли стадии формирования волны в процессе прогорания огнепреградителя.

Библиографические ссылки

1. Зельдович Я.Б. Теория предела распространения тихого пламени // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1941. – Т. 11, № 1. – С. 159–169.
2. Математическая теория горения / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

3. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. – М.: Химия, 1974. – 264 с.
4. Problems of Porous Flame-Arresters: Effects of Lewis Numbers / V.S. Babkin, A.A. Korzhavin, V.A. Bunev, D. Bradley // 11-th International Symposium «Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries», Paper Full Texts Section D, (H.J. Pasman, J.S Karka, F. Babinec Eds), PCHE-PetroChemEng. – Praha, 2004. – P. 4395–4400.
5. Babkin V.S. Some problems of critical diameter // Proc. of the Second seminar on Fire and Explosion Hazards / Ed. V. Molkov. – Moscow, 1997. – P. 113–125.
6. Babkin V.S. The problems of porous flame arresters // Prevention of Hazardous Fires and Explosions / V.E. Zarko et al (eds.). – Kluwer Academic Publishers, 1999. – P. 199–213.
7. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 376 с.
8. Бабкин В.С., Лаевский Ю.М. Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. – 1987. – Т. 23, № 5. – С. 27–44.
9. Babkin V.S. Filtrational combustion of gases. Present state of affairs and prospects // Pure and Applied Chemistry. – 1993. – Vol. 65, No. 2. – P. 335–344.
10. Влияние теплопотерь на распространение стационарных волн при фильтрационном горении газов / В.С. Бабкин, Ю.М. Лаевский, В.И. Дробышевский, С.И. Потытняков // Физика горения и взрыва. – 1984. – Т. 20, № 1. – С. 19–26.
11. Zhdanok S.A., Dobrego K.V., Foutko S.I. Effect of porous media transparency on spherical and cylindrical filtrational combustion heaters performance // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2000. – Vol. 43. – P. 3469–3480.
12. Доброго К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов. – Минск: Национальная Академия наук Беларуси. Институт тепломассообмена им. А.В. Лыкова, 2002. – 203 с.
13. Zhdanok S., Kennedy L.A., Koester G. Superadiabatic Combustion of Methane Air Mixtures under Filtration in a Packed Bed // Combustion and Flame. – 1995. – Vol. 100. – P. 221–231.
14. Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Фильтрационное горение газа // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю.Ш. Матрос. – Новосибирск: Наука, 1988. – 286 с.
15. Доброго К.В., Жданок С.А. Инженерный расчет характеристик фильтрационного горения на основе двухтемпературной одномерной модели // Инженерно-физический журнал. – 1998. – Т. 71, № 3. – С. 424–432.
16. НПБ 254-99. Огнепреградители и искрогасители. Общие технические требования. Методы испытаний.
17. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.
18. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Мбарава М. Особенности фильтрационного горения водородо-, пропано- и метановоздушных смесей в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т. 42, № 4. – С. 372–383.
19. Гликин М.А. Эффективность и взрывобезопасность процессов химической технологии. – 2000. – 392 с.
20. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
21. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.

Материал поступил в редакцию 24.04.2006 г.

N.A. Kakutkina, A.A. Korzhavin, I.G. Namyatov, A.D. Rychkov

Test And Theoretical Research Into Burning-out of Particulate Fire Arresters

There have been outlined the results of testing of the test sample of fire arrester for the possibility of the skip of the methane-air mixture flame and for burning-out. A numerical modeling of the burning-out process of fire arrester has been made and the governing parameters and parametrical dependences of time of its efficient operation have been determined.