

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЬ-ФАРАБИ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ISSN 1560-7534
ISSN 1563-0285

С О В М Е С Т Н Ы Й В Ы П У С К

по материалам Международной конференции
"Вычислительные и информационные технологии
в науке, технике и образовании"
10-14 сентября 2008

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

Том 13

ВЕСТНИК КАЗНУ
ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ

Серия математика, механика,
информатика №3(58)

ЧАСТЬ II

АЛМАТЫ - НОВОСИБИРСК, 2008

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЬ-ФАРАБИ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ISSN 1560-7534
ISSN 1563-0285

*Посвящается 60-летнему юбилею со дня
рождения доктора физико-математических
наук, профессора, лауреата Государственной
премии Республики Казахстан в области
науки, техники и образования, академика
Национальной инженерной академии
Республики Казахстан и Международной
инженерной академии
Наргозы Турсынбаевича Данаева*

СОВМЕСТНЫЙ ВЫПУСК

по материалам Международной конференции
«Вычислительные и информационные технологии
в науке, технике и образовании»
(10 – 14 сентября, 2008)

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 13

ВЕСТНИК КАЗНУ им. АЛЬ-ФАРАБИ

Серия математика, механика, информатика № 3 (58)

ЧАСТЬ II

АЛМАТЫ – НОВОСИБИРСК, 2008

Главный редактор академик Ю.И. Шокин

Заместитель главного редактора чл.-к. РАН А.М. Федотов

Ответственный секретарь И.А. Пестунов

Редакционная коллегия:

С.Н. Баутин,

И.В. Бычков,

В.А. Гущин,

Н.Т. Данаев,

А.Ж. Жайнаков,

Б.Т. Жумагулов,

А. Канантай,

В.М. Ковеня,

Н.А. Колчанов,

С.К. Коровин,

Е. Краузе,

В. Крейнович,

Д. Крёнер,

В.Ф. Куропатенко,

А. Лерэ,

Х. Милошевич,

Б.Г. Михайленко,

В.В. Москвичев,

М.К. Орунханов,

В.Я. Панченко,

В.П. Потапов,

К. Рознер,

Б. Ру,

М. Рэш,

Н. Сатофука,

С.И. Смагин,

В.А. Сойфер,

А.Л. Стемпковский,

М. Фрэнер,

В.Ж. Хабаша,

Джи-Хуан Хе,

Ч. Хирш,

Б.Н. Четверушкин,

Л.Б. Чубаров,

В.В. Шайдуров,

Б. Эйнарссон,

З.Х. Юлдашев

Академик Жумагулов Б.Т. – главный редактор

Редакционная коллегия:

Темирбеков Н.М., научный редактор

Данаев Н.Т., заместитель научного редактора

Даирбаева Л.М., ответственный секретарь

Айсагалиев С.А.

Бадаев С.А.

Блиев Н.К.

Джисналиев М.Т.

Ершин Ш.А.

Калимолдаев М.Н.

Кальменов Т.Ш.

Калтаев А.Ж.

Касымов К.А.

Неронов В.С.

Орунханов М.К.

Отелбаев М.О.

Уалиев Г.У.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОРИСТЫХ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ ПРОГОРАНИЯ¹

Какуткина Н.А.^{*}, Коржавин А.А.^{*}, Рычков А.Д.^{**}

^{*}Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: kktk@kinetics.nsc.ru

^{**}Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

^{**}Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: rych@ict.nsc.ru

Operation of porous flame-arresters is based on flame extinction in channels with effective diameter less than critical one. However laboratory studies and extensive experience of flame-arresters using in industry show that flame can penetrate through flame-arresting element even if this condition is satisfied. This phenomenon is often called burning-through of a flame-arrester. Study of burning-through process shows, that filtration gas combustion (FGC) in low velocity regime is its basis. In the present work the numerical simulation of burning-through process was carried out with the goal to search ways for improving of flame-resistance of a flame-arrester. The system of nonsteady-state equations of heat and mass transfer in the gas and porous medium, describing FGC process is in the base of numerical analysis. As the result of modeling there were revealed two clearly distinct stages of the process. They are the stage of entering flame into the flame-arrester porous element and the stage of the formed FGC wave propagation through it. The full time of burning-through is the sum of the time of entering and the time of propagation. As the flame arrester element there can be used a porous medium of a grain type (packed bed flame arrester) or channel type (cassette flame-arrester). It is shown that burning-through of the packed bed flame arrester is determined by the stage of flame propagation through the element and for the cassettes ones by the stage of entering flame into the element. The ways of improving of the packed bed flame arresters and the cassettes ones are accordingly different. For improving of the packed bed flame arresters it is necessary to increase flame propagation time and for the cassettes ones to increase the entering time. The computational modeling demonstrates that the possibility to increase flame propagation time is very narrow. On the other hand by the variation of the parameters of cassette flame arrester there is possible to achieve the state when flame cannot enter the flame arrester element at all. It means that such flame arrester will do not burn-through. In particular, an increase in the entering time is promoted with an increase in heat conductivity of the flame arrester element, its length, decrease in porosity and channels diameter.

Введение

Одним из важнейших приложений тепловой теории гашения пламени [1,2] является создание промышленных огнепреградителей. Рабочий элемент огнепреградителя (насыпного, сетчатого, канального типов) представляет собой слой пористой среды. Действие огнепреградителей основано на гашении пламени в каналах с эффективным диаметром, меньшим критического, за счет теплотерь из зоны горения в канал [3]. Однако лабораторные исследования и обширный опыт использования огнепреградителей в промышленности показывают, что для эффективной работы огнепреградителя приведенное условие является необходимым, но не достаточным [4]. Наиболее тяжелыми, с точки зрения локализации пламени, оказываются условия, при которых происходит стабилизация зоны горения на поверхности пламягасящего элемента [5]. Абсолютное большинство применяемых в промышленности огнепреградителей локализует горение в этих условиях непродолжительное время (4÷30 минут), а затем пламя проникает в защищаемый объем. Это явление часто называют прогоранием огнепреградителя

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 07-08-00123а и программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН (проект 4.1.1).

[6]. Огнестойкость огнепреградителя зависит от типа пористого пламягасящего элемента. По классификации [7] различают сетчатые, кассетные и насадочные огнепреградители. Насыпные пористые среды, используемые в насадочных огнепреградителях, не позволяют в широких пределах варьировать параметры пламягасящего элемента. Так, например, пористость насыпок может изменяться от 0.4 до 0.5, эффективный диаметр канала также нельзя сильно уменьшать из-за резкого роста гидравлического сопротивления. Теплопроводность пористой среды определяется, главным образом, передачей тепла между зернами насыпки, поэтому также слабо зависит от материала насыпки. Это ограничивает возможности применения насадочных огнепреградителей. Пористые среды канального типа, используемые в кассетных огнепреградителях, предоставляют большие возможности варьирования параметров. Показано, что прогорание насадочных огнепреградителей определяется стадией распространения пламени по пламягасящему элементу, а кассетных – стадией входа пламени в пламягасящий элемент. Соответственно для улучшения огнестойкости насадочных огнепреградителей необходимо увеличивать время распространения пламени, а для кассетных – время входа.

Основой для оптимизации параметров огнепреградителей с целью повышения их огнестойкости служили эмпирические наблюдения и теоретические представления о процессе прогорания. Предполагалось, в частности, что причиной прогорания является прогрев пламягасящего элемента пламенем, стабилизированным на его поверхности [7]. В результате прогрева уменьшается критический диаметр гашения, и пламя проскакивает по пористой среде. Развитие представлений о фильтрационном горении газа (ФГГ) позволило откорректировать понимание природы прогорания огнепреградителей. Стало ясно, что причиной прогорания является распространение пламени по пламягасящему элементу в режиме низких скоростей (РНС) фильтрационного горения газа [6,8].

В рамках этой концепции в данной работе с использованием математического моделирования проведен анализ закономерностей прогорания канальных пламягасящих элементов с целью выявления путей повышения огнестойкости кассетных огнепреградителей.

Математическая модель

Анализ процесса прогорания проводится численно на основе модели фильтрационного горения газа [8]. На рис. 1 представлена геометрия моделируемой системы. В круглом канале радиуса R_w находится пористый блок (пламегасящий элемент) конечной длины h . Через левое входное сечение в канал подается горючая смесь, которая

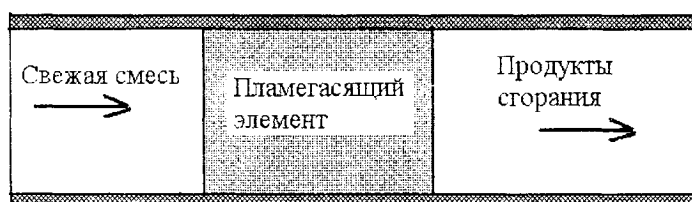


Рис.1. Схема модельного пламегасителя

втекает в пористый блок, а продукты сгорания вытекают. Зажигание газовой смеси осуществляется на участке канала справа от пористого блока. Стенки канала обладают теплоемкостью и теплопроводностью, то есть участвует в процессе переноса тепла, моделируя фланцы огнепреградителя. Диаметр канала много меньше его длины и для моделирования процесса прогорания вполне достаточно одномерного приближения. Кроме того, скорость движения газовой фазы мала и изменением давления вдоль канала можно пренебречь. Пористый блок моделируется совокупностью неподвижных сферических гранул одинакового размера. Детальный механизм химических реакций, протекающих в такой гетерогенной системе, изучен крайне слабо. Однако учитывая, что температура пламени в волне ФГГ близка к адиабатической, а скорость волны горения мала, оказывается впол-

нужно втекает в пористый блок, а продукты сгорания вытекают. Зажигание газовой смеси осуществляется на участке канала справа от пористого блока. Стенки канала обладают теплоемкостью и

не достаточным для описания процесса горения ограничиться одной брутто-реакцией с единственной горючей компонентой в газовой фазе. В этом случае система уравнений, описывающая распространения одномерной нестационарной волны ФГГ в химически инертной пористой среде при постоянном давлении p_0 , состоит из уравнений сохранения массы, переноса тепла по газу и твердой фазе, переноса массы горючего компонента газовой смеси и уравнения состояния. Учитывается собственный объем, занимаемый неподвижными частицами:

$$\frac{\partial \varepsilon_g \rho}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_g \rho u}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_g \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_g \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + C_\alpha (T_s - T) + Q \varepsilon_g \rho Y \cdot W, \quad (2)$$

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

$$\rho_s^0 \varepsilon_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + C_\alpha (T - T_s) + 2 \frac{\alpha_w}{R_w} (T_0 - T_s), \quad (4)$$

$$p_0 = \frac{\rho R_0 T}{M}, \quad \varepsilon_s = \rho_s / \rho_s^0, \quad \varepsilon_g = 1 - \varepsilon_s. \quad (5)$$

Здесь: u – скорость несущего газа; Y, M – массовая концентрация и молекулярный вес горючей компоненты смеси; ρ, T, C_p – физическая плотность газа, его температура и удельная теплоемкость при постоянном давлении соответственно; Q – тепловой эффект реакции; ρ_s, ρ_s^0 – счетная и физическая плотности твердой фазы; ρ_s определяется из условий засыпки пористого блока; λ, D – коэффициенты теплопроводности и диффузии; C_α – межфазный коэффициент теплообмена; $W = K_w \exp(-E/(RT))$ – скорость обобщенной одностадийной химической реакции горения углеводородного топлива (метана); K_w – предэкспоненциальный множитель; T_s – температура частиц; λ_{eff} – эффективная теплопроводность «каркаса» гранул пористого блока, определяемая по формуле работы [9]

$$\lambda_{\text{eff}} = (A + B \cdot Re) \cdot \lambda_g, \quad (6)$$

где α_w, R_w – коэффициент теплоотдачи в стенку и радиус канала; A, B – эмпирические константы. Коэффициент теплообмена вычислялся по формуле:

$$C_\alpha = \frac{6Nu\lambda_g}{d_s d_{\text{eff}}} \varepsilon_s, \quad Nu = 0.395 Re_p^{0.64} Pr^{0.33}, \quad Re_p = \frac{|u| d_{\text{eff}} \rho}{\mu}, \quad (7)$$

где $d_{\text{eff}} = 2\varepsilon_s d_s / (3\varepsilon_g)$ – эффективный диаметр гранулы в засыпке; d_s – диаметр гранулы;

T_0 – температура окружающей среды; Pr – число Прандтля.

Граничные условия для системы (1) – (4) задаются следующим образом:

- при $x=0$ (левая граница канала): $u = u_0(t)$, $T = T_{\text{inp}}$, $Y = Y_{\text{inp}}$;
- при $x = x_k$ (правая граница) задаются «мягкие» краевые условия:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial Y}{\partial x} = 0,$$

где: $u_0(t)$, T_{in} , Y_{in} – заданные значения входных величин соответствующих параметров.

Значение плотности газа определяется из уравнения состояния (5), распределение скорости находится из решения уравнения неразрывности (1).

Начальные условия ($t=0$): $u = 0$, $T = T_p = T_s = T_0$, $Y = 0$.

Для численного решения системы (1) – (5) использовалась конечно-разностная схема, основанная на Лагранжевой аппроксимации конвективных членов и аппроксимации центральными разностями диффузионных [10]. Поскольку протяженность зоны горения очень мала (порядка 200 мкм), 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 (2). По мере перемещения этого максимума разностная сетка перестраивалась, для переинтерполяции параметров течения использовались локальные В - сплайны.

Верификация программы проводилась путем ее тестирования на нескольких задачах с заведомо известными решениями. В частности, были проведены тестовые расчеты по параметрическим зависимостям и абсолютным значениям нормальной скорости ламинарного пламени [2] (случай $\epsilon_g = 1$, $u = 0$), по параметрическим зависимостям и значениям скорости распространения стационарных волн фильтрационного горения газа, которые сопоставлялись со значениями, рассчитанными в рамках аналитической модели фильтрационного горения [8]. На нестационарных задачах тестировалась кондуктивно-конвективная трансформация во времени первоначального ступенчатого температурного профиля пористой среды при отсутствии химической реакции ($Q = 0$).

Некоторые результаты расчетов

Расчеты проводились для стехиометрической метано – воздушной смеси. Для газовой смеси приняты следующие значения параметров:

$$C_p = 10^3 \text{ [Дж/(кг·К)]}, \lambda = 0.1 \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)]}, K_w = 10^{11} \text{ [с}^{-1}\text{]}, E = 226000 \text{ [Дж/моль]}.$$

Значения параметров пористой среды варьировались. По термодинамическим параметрам канальная пористая среда отличается от насыпной, главным образом, величиной теплопроводности. В огнепреградителях насыпного типа теплопроводность пористого блока определяется переносом тепла между зернами засыпки и составляет $1 \div 4$ Вт/(м·К). В огнепреградителях канального типа теплопроводность пористого блока определяется именно теплопроводностью материала пористой среды и может меняться в очень широких пределах. Пламягасящий элемент канального огнепреградителя может быть выполнен в виде рулона сложенных вместе прямой и гофрированной фольги или в виде монолитного перфорированного блока. Канальная структура также может быть организована путем набивки участка трубы прямыми цилиндрическими стержнями. Этот случай, однако, отличается от перфорированного блока только формой каналов и фиксированной пористостью порядка 0.1. Кассетам из фольги соответствует пористость порядка $0.8 \div 0.95$. Перфорированный блок позволяет менять пористость в широких пределах от 0.8 и ниже. На рис. 2 представлены расчетные зависимости времени прогорания огнепреградителя от теплопроводности пористого блока λ_s . Пористость блока $\epsilon_s = 0.5$, удельная теплоемкость $C_s = 400$ Дж/(кг·К), длина блока $h=75$ мм. Видно, что

время входа волны горения в пористый блок монотонно растет с ростом λ_s . Эта закономерность понятна, если учесть, что для входа пламени вглубь пористой среды нужно

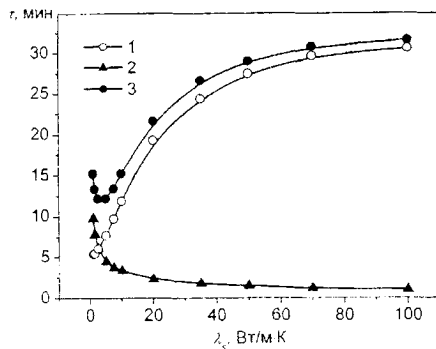


Рис. 2. Зависимость времени прогорания от теплопроводности пористого блока

теплопроводность пористой среды. Вследствие противоположных тенденций изменения времени входа и времени распространения с теплопроводностью полное время прогорания оказывается немонотонной функцией с минимумом, который для блока толщиной 75 мм достигается при $\lambda_s \approx 4$ Вт/(м·К). При этом при $\lambda_s < 3$ Вт/(м·К) полное время прогорания определяется, главным образом, временем распространения волны горения по пористому блоку, а при больших значениях λ_s – временем входа волны в пористый блок. Для насыпных пористых сред характерны значения λ_s меньшие 3÷4 Вт/(м·К) [9], а для канальных значения λ_s составляют 10÷100 Вт/(м·К). Учитывая это, можно констатировать, что прогорание насыпных пламягасящих элементов огнепреградителей лимитируется стадией распространения, а канальных – стадией входа. Так, например, из рис. 2 видно, что при $\lambda_s = 70$ Вт/(м·К), время входа τ_{inp} составляет около 30 мин, а время распространения τ_p всего около 1 мин. Для наблюдателя это выглядит так, как будто пламя на выходе огнепреградителя стоит 30 мин, постепенно прогревая его, а затем исчезает за огнепреградителем и практически сразу появляется перед ним. Вероятно, это обстоятельство породило известное заблуждение, что причиной прогорания является проскок пламени по огнепреградителю, предварительно прогретому факелом, стабилизированным на его выходе. Таким образом, в огнепреградителях с канальными пористыми средами следует стремиться к увеличению времени входа пламени в пористую среду, так как именно оно определяет огнестойкость.

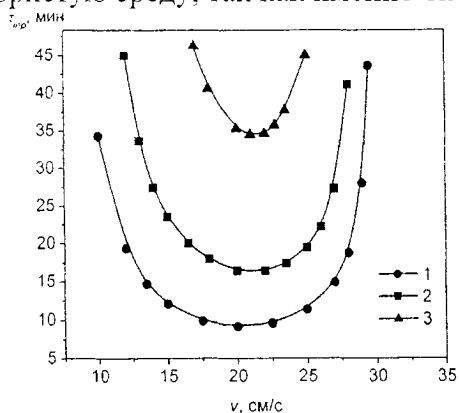


Рис. 3. Зависимость времени входа пламени в пористый блок от скорости газа

прогреть ее крайние слои. Чем больше теплопроводность блока, тем быстрее тепло, которое пористая среда получает от пламени, размывается по толще блока, и тем большее время требуется для прогрева поверхностных слоев до требуемой температуры. Время распространения по блоку наоборот падает с ростом λ_s . Эта закономерность обусловлена тем, что скорость распространения волны ФГГ по пористой среде напрямую связана со скоростью распространения тепла по пористому блоку. Последняя тем больше, чем больше

Рис. 3 демонстрирует зависимости времени входа от скорости газа на входе в пористый элемент. Расчеты сделаны для перфорированного стального блока с пористостью $m = 0.5$, плотностью $\rho_s = 8$ г/см³, теплоемкостью $C_s = 400$ Дж/(кг·К) и теплопроводностью $\lambda_s = 70$ Вт/(м·К), длина блока $h = 75$ мм, диаметр канала $d = 1 \div 3$ мм. Так же, как для насыпных пористых сред, эти зависимости имеют U-образный вид. При малых и больших скоростях потока время входа становится бесконечным, то есть пламя, стабилизированное на поверхности пористого блока, не входит в него. Наименьшая огнестой-

кость для всех диаметров каналов наблюдается при скорости газа $u = 22$ см/с. Этот режим является наиболее жестким и в дальнейшем все расчеты проводились для этой скорости газа. Из рис. 3 следует, что чем меньше диаметр каналов, тем уже область скоростей, при которых возможно прогорание и больше время входа в самом жестком режиме. Поэтому для повышения огнестойкости следует использовать блоки с минимально возможным диаметром каналов. Минимальный диаметр определяется компромиссом между желаемым временем огнестойкости и гидравлическим сопротивлением блока.

Еще один путь улучшения характеристик канальных огнепреградителей следует из рассмотрения рис. 4, демонстрирующего влияние длины пористого блока на время входа и

прогорания. При $\lambda_s = 1$ Вт/(м·К), характерном для засыпных огнепреградителей, время входа практически не зависит от длины блока и составляет около 5 минут. Время прогорания τ_b линейно растет с увеличением длины пористого слоя. Эта зависимость очевидна, так как при малом времени входа время прогорания определяется временем распространения волны ФГГ, а оно равно h/v , где v – стационарная скорость распространения волны..

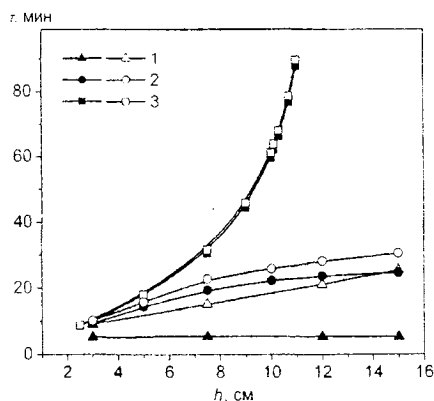


Рис. 4. Влияние длины блока на время входа пламени в пористый блок

При $\lambda_s = 20$ Вт/(м·К) основной вклад во время прогорания дает уже стадия входа в пористый блок. Существенный рост $\tau_{\text{вх}}$ с увеличением h вплоть до $h=11$ см обусловлен кондуктивным размыванием по толщине пористого слоя тепла, получаемого пористым элементом от пламени, стабилизированного на его поверхности. Чем больше h , тем больше суммарная теплоемкость блока, тем медленнее он прогревается и позже достигается температура поверхности блока, при которой формируется волна ФГГ. Начиная с $h=10$ см, время входа перестает меняться с ростом h . Это означает, что на момент входа волны

горения в пористый блок размывание тепла не достигает противоположной границы пористого блока. Формирующаяся волна горения не чувствует этой границы и ведет себя так же, как при входе в полуограниченный блок. Таким образом, начальный быстрый рост времени прогорания с ростом h связан с ростом времени входа, а дальнейший медленный рост при $h > 10$ см обусловлен приростом времени распространения. При $\lambda_s = 100$ Вт/(м·К) время прогорания практически совпадает со временем входа и быстро растет с ростом h . При $h > 12$ см пламя не входит в пористый блок. Вместо этого в пористом блоке формируется стационарный профиль температуры, т.е. такой огнепреградитель не прогорает. Причиной появления критической длины блока h^* , выше которой пламя не входит в пористый блок, вероятно, является увеличение суммарных теплопотерь от блока с ростом его длины. В результате устанавливается динамическое равновесие между теплоприходом и теплоотводом, что приводит к установлению стационарного профиля температуры в блоке. Действительно, расчеты показывают, что исключение внешних теплопотерь приводит к трансформации кривой (3) к кривой вида (2).

Рис. 5 демонстрирует изменение времени входа пламени в пористый блок при изменении его длины и диаметра каналов при $\lambda_s = 70$ Вт/(м·К) и $m=0.5$. Видно, что для диаметров каналов меньших критического по проскоку пламени существует некоторая

длина пористого блока h^* , при которой пламя никогда не войдет в пористый блок. При этом

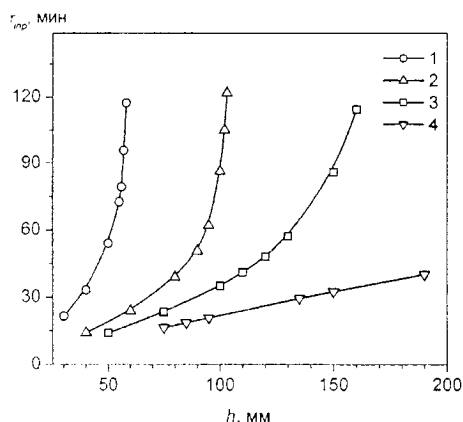


Рис. 5. Зависимость времени входа в пористый блок от его длины

таким блоком не прогорает. При заданной длине блока стабилизации пламени на правой границе блока можно достигнуть уменьшением либо диаметра канала, либо пористости. Рис. 6 показывает взаимосвязь критических значений пористости и диаметра каналов в пористом стальном блоке толщиной 75 мм, при которых пламя перестает входить в пористый блок. Видно, что чем больше диаметр каналов, тем меньшие значения

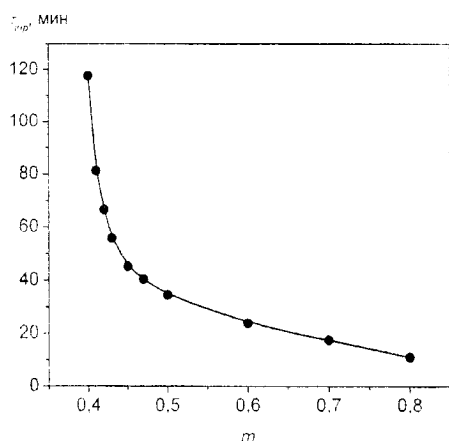


Рис. 6. Зависимость времени входа пламени в блок от его пористости

чем меньше диаметр каналов, тем меньшая длина пламягасящего элемента требуется, чтобы огнепреградитель не прогорал.

Гасящую способность огнепреградителя можно менять также, изменяя пористость блока m . В случае перфорированного блока m легко меняется путем изменения плотности расположения каналов. При фиксированном диаметре каналов и длине блока время входа пламени в пористый блок растет с уменьшением пористости (рис. 6).

При достижении некоторого значения $m = m^*$ пламя перестает входить в пористый блок, то есть огнепреградитель с

пористости требуются для обеспечения непрогорания пористого блока.

Результаты численного моделирования дают основы для оптимизации пористых огнепреградителей. Огнепреградитель должен соответствовать ряду требований. Он должен надежно защищать от проскока пламени, обеспечивать высокую огнестойкость и обладать низким гидравлическим сопротивлением. Среди средств оптимизации — выбор типа пористой среды (зернистая или канальная) и характеристик пористого блока — материала (теплопроводность, теплоемкость), эффективного диаметра канала, пористости, толщины пористого блока. Выбор диаметра каналов и по-

ристости блока должен производиться с учетом его гидравлического сопротивления. Сопротивление перфорированного блока (определяемое как падение давления на нем) можно считать пропорциональным длине блока и обратно пропорциональным его пористости и квадрату диаметра каналов. Используя данные рис. 6, который каждому значению диаметра канала сопоставляет величину пористости, обеспечивающей непрогорание блока толщиной 75 мм, легко оценить, что при постоянной длине сопротивление непрогорающего блока монотонно растет с уменьшением диаметра каналов. Поэтому с точки зрения уменьшения гидравлического сопротивления желательно выбирать максимально возможный диаметр каналов. Сделав хороший запас по критическому диаметру, который для стехиометрической метано-воздушной смеси составляет 3 мм, можно выбрать значение $d = 2$ мм и соответствующую ему пористость 0.4 (рис. 6). При длине блока 75 мм, согласно расчетам, такой блок не должен прогорать. При этом при стабилизации на его поверхности пламени максимальная температура блока, согласно рис. 6, не должна превышать 750 К. Отметим, что несмотря на попытки выбора параметров, дающих результаты, приближенные к экспериментальным, проведенные

расчеты являются в значительной степени иллюстративными ввиду неопределенности некоторых физико-химических параметров процесса. Тем не менее, обнаруженные качественные закономерности должны оставаться в силе и при изменении значений параметров системы таких, как скорость химической реакции, размеры и термодинамические параметры корпуса огнепреградителя, уровня внешних теплопотерь и т.д. Кроме того, исполнение пламягасящего элемента в виде перфорированного стального блока дает возможность в широких пределах варьировать параметры блока, что позволяет в случае необходимости оптимизировать процесс прогорания экспериментальным путем, используя принципы, описанные в данной работе.

Выводы

1. Численный анализ процесса прогорания пористых огнепреградителей показал, что огнестойкость канальных пламягасящих элементов определяется стадией входа пламени в пористую среду, а насыпных – стадией распространения пламени по пористому элементу.
2. С целью повышения огнестойкости пламягасящий элемент канального огнепреградителя целесообразно изготавливать из высокотеплопроводных материалов.
3. Пламягасящий элемент в виде монолитного перфорированного блока позволяет в наилучшей степени оптимизировать защитные свойства огнепреградителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б. Теория предела распространения тихого пламени// Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1941. Т. 11, № 1. С. 159-169.
2. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения. М.: Наука, 1980.
3. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. М.: Химия, 1974.
4. Крошкина О.Г., Сурикова Н.Н., Гликин М.А., Битюцкий В.Е. Устройства для защиты оборудования и коммуникаций взрывопожароопасных производств. Обзорн. инф. Сер. "Состояние и совершенствование техники безопасности в химической промышленности". М., НИИТЭХИМ, 1979.
5. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М.: Химия, 1980.
6. V.S.Babkin. The problems of porous flame arresters// Prevention of Hazardous Fires and Explosions / Zarko V.E. et al (eds.). Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 199-213.
7. Крошкина О.Г. Огнепреградители для длительной локализации пламени. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1984.
8. Бабкин В.С., Лаевский Ю.М. Фильтрационное горение газов// Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 27-44.
9. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Ленинград: "Химия", 1979.
10. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Намятов И.Г., Рычков А.Д. Закономерности распространения пламени через насадку коммуникационных огнепреградителей// Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 4, С. 23-38.