

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОГОРАНИЯ ПОРИСТЫХ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ С КАНАЛЬНЫМ ПЛАМЕГАСЯЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Н. А. Какуткина<sup>1</sup>, А. А. Коржавин<sup>1</sup>, А. Д. Рычков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, kktk@kinetics.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведен численный анализ процесса прогорания пористых огнепреградителей. Показано, что время прогорания пористых пламегасящих элементов канального типа определяется временем входа пламени в пористый элемент, а насыпного типа — временем распространения по нему. Увеличению огнестойкости канального огнепреградителя способствует увеличение теплопроводности материала пористого пламегасящего элемента, его длины, а также уменьшение эффективного размера каналов и пористости пламегасящего элемента. Установлено, что, увеличивая длину пористого элемента или уменьшая диаметр каналов и пористость, можно достигнуть того, что пламя, возникшее за огнепреградителем, будет стабилизироваться на выходной поверхности пламегасящего элемента, не входя внутрь него.

Ключевые слова: горение, пористая среда, огнепреградитель.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших приложений тепловой теории гашения пламени [1, 2] является создание промышленных огнепреградителей. Рабочий элемент огнепреградителя представляет собой слой пористой среды (насыпного, сетчатого, канального типа). Действие огнепреградителей основано на гашении пламени в каналах с эффективным диаметром, меньшим критического, за счет теплопотерь из зоны горения в стенки канала [3]. Однако лабораторные исследования и обширный опыт использования огнепреградителей в промышленности показывают, что для эффективной работы огнепреградителя приведенное условие необходимо, но не достаточно [4]. Наиболее тяжелыми с точки зрения локализации пламени оказываются условия, при которых происходит стабилизация зоны горения на поверхности пламегасящего элемента [5]. Абсолютное большинство применяемых в промышленности огнепреградителей локализуют горение в этих условиях непродолжительное время — 4 ÷ 30 мин, а затем пламя проникает в защищаемый объем. Это явление часто называют прогоранием огнепреградителя [6].

Усилия многих исследователей и конструкторов направлены на преодоление этого

ограничения, так как указанное время в условиях промышленности может оказаться недостаточным для принятия действенных мер по ликвидации аварийной ситуации. В [4] дан анализ возможных путей повышения огнестойкости огнепреградителей. По принципу действия они объединены в следующие группы.

1. Размещение над пламегасящим элементом устройств, увеличивающих скорость истечения газа из пористого элемента. Это исключает стабилизацию пламени и, соответственно, прогорание огнепреградителя, но значительно увеличивает его гидравлическое сопротивление.

2. Прекращение подачи взрывоопасной смеси к огнепреградителю. Следует учитывать, что мгновенно прекратить подачу газа невозможно. В промышленных условиях запаздывание может достигать нескольких минут. Кроме того, это может привести к аварийной остановке всего производства, а при возобновлении потока газа не исключена возможность повторного зажигания.

3. Сигнализация появления пламени на поверхности пламегасящей насадки. При этом необходимы конкретные действия обслуживающего персонала или наличие автоматически действующих систем.

4. Подавление очага горения введением гасящих реагентов. Этот метод эффективен, но не всегда применим.

Указанные пути направлены на исклю-

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-08-00123-а).

чение длительного взаимодействия пламени с пламегасящим элементом. По существу, это совмещение пористого пламегасящего элемента с элементами, которые в ряде случаев можно самостоятельно применять для локализации распространяющегося пламени.

Другая группа методов направлена на увеличение продолжительности защитного действия самого пламегасящего элемента. К ним относятся [4]:

- 1) расчленение пористого элемента по длине на ряд элементов с воздушным зазором между ними;

- 2) чередование в пламегасящем элементе слоев с высокой и низкой теплопроводностью;

- 3) введение в пламегасящий элемент теплообменника с циркулирующим хладагентом.

В первых двух методах предполагается, что пламя задерживается на границе отдельных слоев, что должно приводить к увеличению времени огнестойкости. Однако испытания отдельных конструкций огнепреградителей с двух- и трехслойным пламегасящим элементом показали, что разделение элемента на отдельные секции незначительно увеличивает, а в ряде случаев и уменьшает огнестойкость [7]. Это обусловлено тем, что тепло от пламени воспринимает не весь пламегасящий элемент, а лишь часть его [7]. В итоге происходит быстрый прогрев соответствующего элемента и более быстрый вход пламени в глубь пористого пространства. Пламегасящие элементы, изготовленные из алюминия, при этом плавятся [7]. В результате происходит загибание части каналов, а через оставшиеся каналы газ начинает протекать с большей скоростью. Это может приводить к некоторому повышению огнестойкости. Очевидно, однако, что такой путь повышения огнестойкости неприемлем.

Введение в пламегасящий элемент теплообменника существенно увеличивает огнестойкость [7]. Однако в этом случае надежность работы огнепреградителя зависит от бесперебойности циркуляции хладагента.

Огнестойкость огнепреградителя зависит также от типа пористого пламегасящего элемента. По классификации [7] различают сетчатые, кассетные и насадочные огнепреградители. Сетчатые состоят из нескольких слоев сеток из латунной или стальной проволоки. Такие огнепреградители очень быстро прогорают и могут использоваться только для защиты от проскока пламени. Кассетные пламегасящие

элементы представляют собой рулон из сложенных вместе и навитых на стержень плоской и гофрированной металлических лент. В насадочных огнепреградителях используются насыпки гранулированного или зернистого материала: гравия, шаров из металла, стекла, цемента, фарфора. Кассетные и насадочные огнепреградители обладают некоторой огнестойкостью. При этом, как отмечалось в [7], в массе своей насадочные огнепреградители обладают большей огнестойкостью, чем кассетные. В то же время наибольшая огнестойкость была получена на огнепреградителе с алюминиевой кассетой [7].

Варьирование параметров пламегасящего элемента в экспериментах показало, что огнестойкость растет с уменьшением эффективного диаметра канала пористого элемента и увеличением длины пористого слоя [7].

Основой для оптимизации параметров огнепреградителей с целью повышения огнестойкости служили эмпирические наблюдения и теоретические представления о процессе прогорания. Предполагалось, в частности, что причиной прогорания является прогрев пламегасящего элемента пламенем, стабилизированным на его поверхности [7], в результате чего уменьшается критический диаметр гашения и пламя проскакивает по пористой среде. Развитие представлений о фильтрационном горении газа позволило скорректировать понимание природы прогорания огнепреградителей. Стало ясно, что прогорание обусловлено распространением пламени по пламегасящему элементу в режиме низких скоростей фильтрационного горения газа (ФГГ) [6, 8, 9]. В рамках этой концепции в одномерном приближении в [10] были проанализированы закономерности прогорания насадочных огнепреградителей. Важнейшим результатом анализа было выделение двух стадий в процессе прогорания: входа пламени в пористый элемент и распространения пламени по нему, что подтверждается экспериментальными наблюдениями [10]. Полное время огнестойкости огнепреградителя, соответственно, складывается из времени этих двух стадий. Было показано (расчетным и экспериментальным путем) [10], что в наиболее жестких условиях огнестойкость насадочных огнепреградителей определяется временем распространения. Поэтому все, что уменьшает скорость распространения пламени по пористой среде, способствует увеличению огнестойкости огнепрегра-

дителя. Это, в частности, объясняет линейную зависимость огнестойкости насадочных огнепреградителей от длины насадки [7].

Насыпные пористые среды, используемые в насадочных огнепреградителях, не позволяют в широких пределах варьировать параметры пламегасящего элемента. Так, пористость насыпок меняется от 0.4 до 0.5. Эффективный диаметр канала 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 доработки насадочных огнепреградителей. Пористые среды канального типа, используемые в кассетных огнепреградителях, предоставляют большие возможности варьирования параметров. Целью настоящей работы является анализ закономерностей прогорания канальных пламегасящих элементов с целью выявления путей повышения огнестойкости кассетных огнепреградителей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ процесса прогорания проводился численно на основе модели фильтрационного горения газа [8]. На рис. 1 представлена геометрия моделируемой системы. В трубе радиусом  $R_w$  располагается пористый блок конечной длины  $h$ . Слева по трубе течет горючая смесь, которая втекает в пористый блок, а справа выходят продукты сгорания. Зажигание газовой смеси осуществляется на участке трубы справа от пористого блока. Труба, в которой располагается пористый блок, обладает теплоемкостью и теплопроводностью, т. е. участвует в процессе переноса тепла, моделируя корпус огнепреградителя. Система уравнений, описывающая распространение одномерной нестационарной волны горения в химически инертной пористой среде, состоит из уравнений переноса тепла по газу и твердой фазе, переноса массы недостающего компонента газовой смеси, со-



Рис. 1. Геометрия модельной системы

хранения полного количества вещества в потоке и уравнения газового состояния. Система решалась численно. Подробное описание системы уравнений и метода их решения приведено в [10] и здесь опускается.

Программа рассчитывает профили температур газа и пористой среды и определяет положение фронта пламени в каждый момент. По этим данным можно вычислить время входа пламени в пористый блок и время распространения по нему. Расчеты проводились для стехиометрической метановоздушной смеси. Для газовой смеси приняты следующие значения параметров [10]: удельная теплоемкость при постоянном давлении  $c_p = 10^3$  Дж/(кг·К), теплопроводность  $\lambda = 0.1$  Вт/(м·К), температура адиабатического пламени  $T_b = 2320$  К. Скорость химической реакции задавалась в форме  $W = \eta k_0 \exp(-E/RT)$ , где  $\eta$  — относительная концентрация недостающего компонента газовой смеси,  $k_0 = 1 \cdot 10^{11}$  с<sup>-1</sup>,  $E = 2.26 \cdot 10^5$  Дж/моль,  $R$  — газовая постоянная. Значения параметров пористой среды варьировались. Корпус огнепреградителя моделировался как участок стальной трубы радиусом  $R_w = 45$  мм и толщиной 5 мм, что соответствует реальному огнепреградителю ОП-50. Уровень теплопотерь на единицу внешней поверхности огнепреградителя оценивался значением  $\alpha_w = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [10].

По термодинамическим параметрам канальная пористая среда отличается от насыпной главным образом теплопроводностью. В огнепреградителях насыпного типа теплопроводность пористого блока определяется переносом тепла между зернами насыпки 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. Пламегасящий элемент канального огнепреградителя может быть выполнен в виде рулона сложенных вместе прямой и гофрированной лент фольги или в виде монолитного перфорированного блока. Под перфорированным блоком здесь понимается монолитный цилиндр с цилиндрическими каналами равного диаметра, равномерно распределенными по поперечному сечению. Канальная структура может быть организована также путем набивки участка трубы прямыми цилиндрическими стержнями. Этот случай, однако, отличается от перфорированного бло-

ка только формой каналов и фиксированной пористостью  $\approx 0.1$ . Кассетам из фольги соответствует пористость  $0.8 \div 0.95$ . Перфорированный блок позволяет менять пористость в широких пределах от 0.8 и ниже.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости времени прогорания огнепреградителя ( $\tau$ ) от теплопроводности пористого блока ( $\lambda_s$ ). Пористость блока принята равной  $m = 0.5$ , удельная теплоемкость  $c_s = 400$  Дж/(кг·К), длина пористого блока  $h = 75$  мм. Видно, что время входа волны горения в пористый блок монотонно растет с увеличением  $\lambda_s$ . Эта закономерность понятна, если учесть, что для входа пламени в глубь пористой среды нужно прогреть ее крайние слои. Чем больше теплопроводность блока, тем быстрее тепло, которое пористая среда получает от пламени, размывается по толще блока и тем больше времени требуется для прогрева поверхностных слоев до требуемой температуры. Время распространения по блоку, наоборот, падает с ростом  $\lambda_s$ . 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 теплопроводность пористой среды. Вследствие противоположных тенденций изменения времени входа и времени распространения в зависимости от теплопроводности, полное время прогорания оказывается немонотонной функцией с минимумом, который для блока длиной 75 мм до-

стигается 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  $\lambda_s$  — временем входа волны в пористый блок. Для насыпных пористых сред характерны значения  $\lambda_s < 3 \div 4$  Вт/(м·К) [11], а для канальных —  $\lambda_s = 10 \div 100$  Вт/(м·К). Учитывая это, можно констатировать, что прогорание насыпных пламегасящих 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 составляет  $\tau_{inp} \approx 30$  мин, а время распространения всего  $\tau_p \approx 1$  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. На рис. 3 показаны зависимости времени входа от скорости газа на

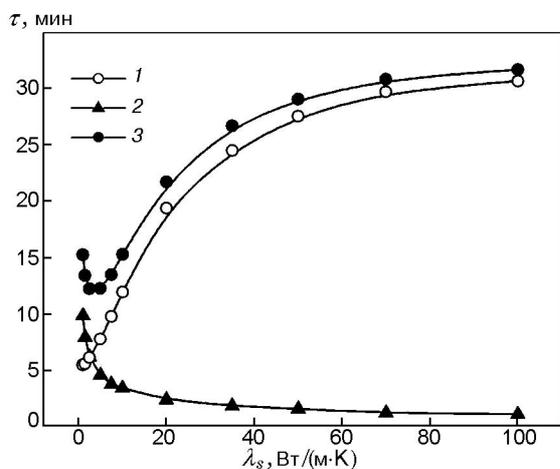


Рис. 2. Влияние теплопроводности пористого блока на время входа пламени в пористый блок (1), время распространения по нему (2) и полное время прогорания (3)

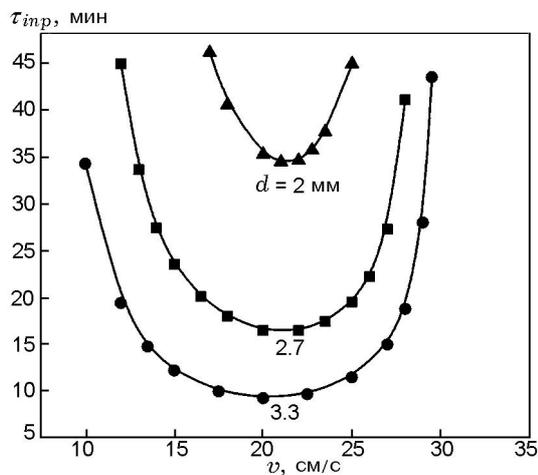


Рис. 3. Зависимости времени входа пламени в пористый элемент от скорости газа при различных диаметрах канала ( $h = 75$  мм,  $\lambda_s = 70$  Вт/(м·К))

входе в пористый элемент. Расчеты сделаны для перфорированного стального блока пористостью  $m = 0.5$ , плотностью  $\rho_s = 8 \text{ г/см}^3$ , теплоемкостью  $c_s = 400 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  и теплопроводностью  $\lambda_s = 70 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , длина блока  $h = 75 \text{ мм}$ . Так же как для насыпных пористых сред, эти зависимости имеют U-образный вид. При малых и больших скоростях потока время входа становится бесконечным, т. е. пламя, стабилизированное на поверхности пористого блока, не входит в него. Наименьшая огнестойкость для всех диаметров каналов наблюдается при скорости газа  $v = 22 \text{ см/с}$ . 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 времена входа и прогорания. При теплопроводности  $\lambda_s = 1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , характерной для засыпных огнепреградителей, время входа практически не

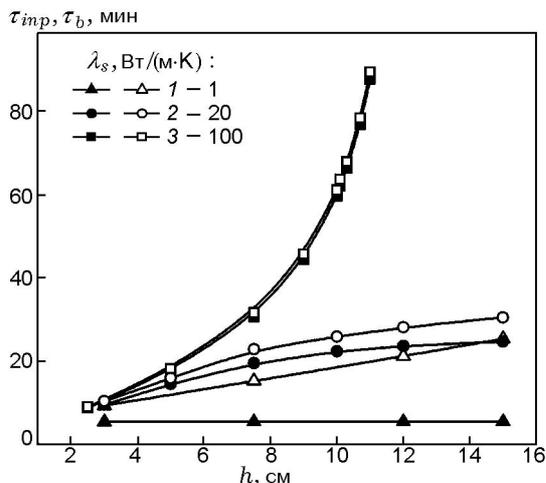


Рис. 4. Зависимости времени входа пламени в пористый блок (темные значки) и времени прогорания огнепреградителя (светлые значки) от длины пористого блока при различных значениях теплопроводности

зависит от длины блока и составляет  $\tau_{inp} \approx 5$  мин. Время прогорания  $\tau_b$  линейно растет с увеличением длины пористого слоя. Эта зависимость очевидна, так как при малом времени входа время прогорания определяется временем распространения, а оно равно  $h/u$ , где  $u$  — стационарная скорость распространения волны ФГГ.

При  $\lambda_s = 20 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  основной вклад во время прогорания дает уже стадия входа в пористый блок. Существенный рост  $\tau_{inp}$  с увеличением длины блока вплоть до  $h = 11 \text{ см}$  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  $h = 10 \text{ см}$  время входа перестает меняться с ростом  $h$ . Это означает, что в момент входа волны горения в пористый блок размывание тепла не достигает противоположной границы пористого блока. Формирующаяся волна ФГГ 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 увеличением времени входа, а дальнейший медленный рост при  $h > 10 \text{ см}$  обусловлен приростом времени распространения.

При  $\lambda_s = 100 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  время прогорания практически совпадает со временем входа и быстро увеличивается с ростом  $h$ . При  $h > 12 \text{ см}$  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 теплотерь 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 при исключении внешних теплотерь кривая 3 трансформируется к кривой вида 2.

Рис. 5 демонстрирует изменение времени входа пламени в пористый блок при изменении его длины и диаметра каналов при  $\lambda_s =$

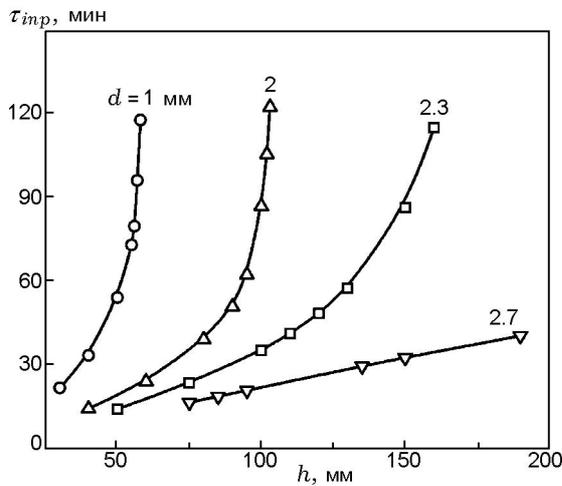


Рис. 5. Зависимость времени входа пламени в пористый элемент от его длины при различных диаметрах каналов ( $\lambda_s = 70$  Вт/(м·К),  $v = 22$  см/с)

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

Кривая 1 на рис. 6 показывает зависимость  $h^*$  от диаметра канала. Расчеты сделаны для перфорированного стального блока пористостью  $m = 0.5$ , плотностью  $\rho_s = 8$  г/см<sup>3</sup>,

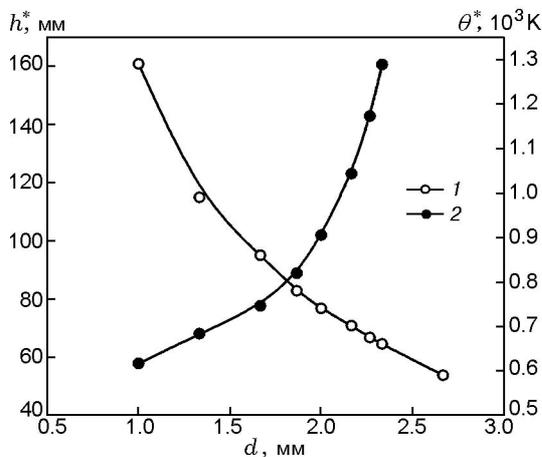


Рис. 6. Зависимости критической длины (1) и максимального разогрева пористого элемента (2) от диаметра каналов ( $\lambda_s = 70$  Вт/(м·К),  $v = 22$  см/с)

теплоемкостью  $c_s = 400$  Дж/(кг·К) и теплопроводностью  $\lambda_s = 70$  Вт/(м·К). При  $h > h^*$  в пористом элементе формируется стационарный профиль температуры с максимумом на поверхности, на которой стабилизирован факел пламени. Кривой 2 на рис. 6 каждому значению  $h^*$  соотнесено соответствующее значение максимальной температуры в пористом блоке. Видно, что чем меньше диаметр каналов, тем меньшая длина блока требуется, чтобы огнепреградитель не прогорал, но тем выше максимальный разогрев пористого блока при установлении стационарного профиля температуры.

Гасящую способность огнепреградителя можно менять также, изменяя пористость блока  $m$ . В случае перфорированного блока это легко сделать путем изменения плотности расположения каналов. При фиксированном диаметре каналов и длине блока время входа пламени в пористый блок растет с уменьшением пористости (рис. 7). При достижении некоторого значения  $m = m^*$  пламя перестает входить в пористый блок, т. е. огнепреградитель с таким блоком не прогорает. При заданной длине блока стабилизации пламени на правой границе блока можно достигнуть уменьшением либо диаметра канала, либо пористости. Рис. 8 показывает взаимосвязь критических значений пористости и диаметра каналов в пористом стальном блоке длиной 75 мм, при которых пламя перестает входить в пористый блок. Видно, что чем больше диаметр каналов, тем меньшие значения пористости требуются для обеспечения непрогорания пористого блока.

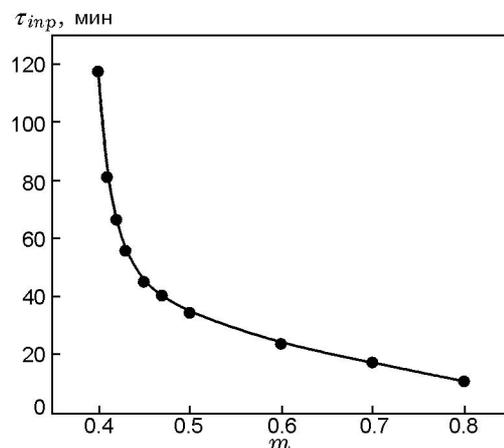


Рис. 7. Зависимость времени входа от пористости ( $\lambda_s = 70$  Вт/(м·К),  $v = 22$  см/с)

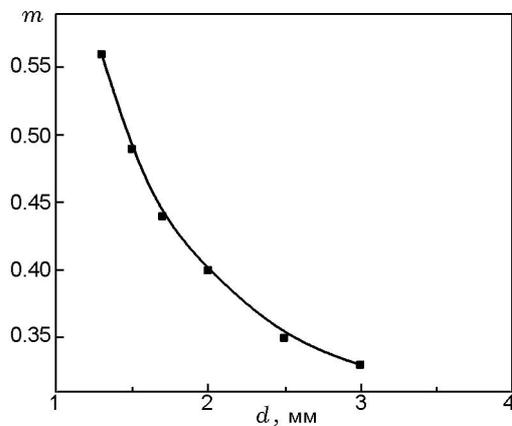


Рис. 8. Связь между диаметром каналов и пористостью, обеспечивающей непрогорание пористого блока длиной 75 мм

## ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование, проведенное в данной работе и в [10], дает основы для оптимизации пористых огнепреградителей. Огнепреградитель должен соответствовать ряду требований: 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.

Первое требование накладывает жесткое ограничение сверху на эффективный диаметр каналов. Он должен быть меньше критического диаметра гашения. С этой точки зрения наиболее выгодным вариантом пористой среды является монолитный перфорированный блок. Жесткая калибровка каналов позволяет в этом случае ограничиться минимальным запасом по диаметру канала на уровне  $5 \div 10 \%$  от критического. В случае насыпных пористых сред размеры отдельных каналов среди прочего зависят от качества засыпки, что требует большего коэффициента запаса. Канальные пористые среды, выполненные из сложенных вместе прямой и гофрированной лент металлической фольги, также требуют значительного запаса по диаметру канала. Это обусловлено отсутствием жесткости у такой пористой среды. В случае ее прогрева факелом пламени, установившимся на поверхности пористой среды, от-

дельные слои фольги могут разойтись, образуя каналы большего диаметра.

Требования высокой огнестойкости и низкого гидравлического сопротивления необходимо рассматривать в комплексе, так как часто то, что увеличивает огнестойкость, увеличивает и гидродинамическое сопротивление. В практике огнепреградители делят на классы в зависимости от времени огнестойкости [12]. Как правило, требуется огнестойкость больше 30 мин. Идеальным мог бы считаться огнепреградитель, в который пламя, стабилизированное на его поверхности, не входит за любое сколь угодно большое время.

Огнепреградители с насыпными пористыми средами наиболее просты в изготовлении. Очевидным их недостатком является то, что при тех же самых эффективном диаметре каналов и пористости они обладают значительно большим гидравлическим сопротивлением, чем канальные. Структура насыпных пористых сред не позволяет широко менять их параметры: пористость варьируется в интервале  $0,4 \div 0,5$ , теплопроводность —  $1 \div 4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Расчеты показали, что при таких параметрах и разумных значениях диаметра каналов при наиболее опасных значениях скорости газа  $\approx 20 \text{ см}/\text{с}$  пламя всегда входит в пористую среду. Поэтому на основе засыпок невозможно создать непрогорающий огнепреградитель. Можно лишь оптимизировать его огнестойкость. Характерные времена входа в насыпную пористую среду невелики и составляют  $1 \div 10$  мин. Огнестойкость насыпных пламегасящих элементов определяется временем распространения пламени по пористому блоку, которая может составлять десятки минут и в некоторых случаях достигать часа. Возможности влияния на время распространения весьма ограничены. Время распространения пропорционально длине пористого блока. Поэтому, увеличивая длину, можно достигнуть некоторого увеличения огнестойкости. Однако гидравлическое сопротивление при этом также растет пропорционально длине. Существенно увеличить время распространения можно, уменьшая эффективный диаметр каналов. Но при этом сопротивление растет еще сильнее — обратно пропорционально квадрату диаметра.

Теплопроводность канальных пористых сред  $10 \div 100 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Согласно рис. 2 их огнестойкость определяется временем входа пламени в пористый блок. Это обстоятельство пе-

реводит проблему оптимизации канальных огнепреградителей в другую плоскость: с целью улучшения огнестойкости нужно стремиться к ухудшению условия входа. В частности, появляется возможность создания непрогорающих огнепреградителей, когда пламя вообще не входит в пламегасящий элемент.

Из рис. 2 следует, что с точки зрения увеличения огнестойкости в канальных огнепреградителях целесообразно использовать высокотеплопроводные материалы, например металлы. Этот вывод косвенно подтверждается тем фактом, что на практике наилучшая огнестойкость была достигнута при использовании кассет из алюминиевой фольги [7]. В этих же экспериментах выявились и недостатки таких огнепреградителей: они плавятся. Проведенные расчеты позволяют проанализировать причину этой неудачи. Кассеты из фольги обладают большой пористостью —  $m = 0.8 \div 0.95$ . Из рис. 8 следует, что при высокой пористости хорошей огнестойкости можно добиться за счет уменьшения диаметра канала. Например, в упомянутом огнепреградителе [7] диаметр каналов составлял  $1 \div 1.25$  мм. Из рис. 6 видно, что при стабилизации пламени на поверхности пористого блока последняя разогревается тем сильнее, чем меньше диаметр каналов. В частности, диаметру каналов 1.2 мм при длине блока более 65 мм соответствует температура 1100 К, что существенно превышает температуру плавления алюминия [13].

Сталь обладает несколько меньшей теплопроводностью, чем алюминий, но существенно лучшей термостойкостью, что делает ее более приемлемым материалом для пламегасящего элемента. Кассеты из стальной фольги не позволяют существенно менять пористость. Более подходящим представляется исполнение пламегасящего элемента в виде перфорированного монолитного блока. Этот вариант не нашел широкого применения в практике создания огнепреградителей. Причина этого, вероятно, в низкой технологичности, так как трудно обеспечить ряд отверстий небольшого диаметра ( $1 \div 2.5$  мм) по всей длине блока, которая может составлять  $60 \div 200$  мм. Такой блок, однако, может быть собран из отдельных секций высотой  $10 \div 20$  мм. Единственное требование — совмещение отверстий в отдельных секциях так, чтобы образовывались сплошные каналы по всей длине пламегасящего элемента. При этом не требуется даже специальных мер

для обеспечения теплового контакта между отдельными секциями. Расчеты показывают, что даже если между секциями будут воздушные зазоры порядка 1 мм, время прогорания такого секционного блока будет слабо отличаться от времени прогорания сплошного блока такой же толщины.

Выбор диаметра каналов и пористости блока должен проводиться 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. 8, который каждому значению диаметра канала сопоставляет величину пористости, обеспечивающей непрогорание блока длиной 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 метановоздушной смеси составляет 3 мм, можно выбрать значение  $d = 2$  мм и соответствующую ему пористость 0.4 (см. рис. 8). При длине блока 75 мм, согласно расчетам, 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, уровень внешних теплотерь и т. д. Кроме того, исполнение пламегасящего 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

• Численный анализ процесса прогорания пористых огнепреградителей показал, что огнестойкость канальных пламегасящих элементов определяется стадией входа пламени в пористую среду, а насыпных — стадией распространения пламени по пористому элементу.

• С целью повышения огнестойкости пламегасящий элемент канального огнепреградителя целесообразно изготавливать из высокопроводящих материалов.

• Пламегасящий элемент в виде монолитного перфорированного блока позволяет в наилучшей степени оптимизировать защитные свойства огнепреградителей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. Теория предела распространения тихого пламени // Журн. эксперим. и теорет. 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.
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. информ. 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. 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. Крошкина О. Г. Огнепреградители для длительной локализации пламени: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1984.
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 Appl. Chem. — 1993. — V. 65, N 2. — P. 335–344.
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.
11. Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. — Л.: Химия, 1979.
12. НПБ 254-99. Огнепреградители и искрогасители. Общие технические требования. Методы испытаний. — М.: МВД РФ, Гос. противопожарная служба, 1999.
13. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.

Поступила в редакцию 10/IV 2008 г.