
УДК 621.1-4:536.4

ISBN 978-5-98550-114-8

Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2007)
// Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным
участием / Под ред. Д.Д. Матиевского, П.К. Сеначина / Алт. гос. техн. ун-т им.
И.И. Ползунова, г. Барнаул, 1-4 октября 2008 г. – Барнаул: ОАО «Алтайский дом
печати», 2008. – 404 с.

Вторая Всероссийская научно-практическая конференция с международным
участием проводится по совместному решению НИИ СО РАН и АлтГТУ
им. И.И. Ползунова по избранным проблемам «Приоритетных направлений науки и
техники, прорывных и критических технологий». Материалы конференции
публикуются в авторской редакции. Незначительные изменения внесены редакторами
сборника докладов, а также при компьютерной верстке издания.

ISBN 978-5-98550-114-8

© Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова
© Д.Д. Матиевский, П.К. Сеначин

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ПОРИСТЫХ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ

Н.А. Какуткина, А.А. Коржавин (ИХКГ СО РАН, Новосибирск)

А.Д. Рычков (ИВТ СО РАН, Новосибирск)

П.К. Сеначин (АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул)

Одним из важнейших приложений тепловой теории гашения пламени является создание промышленных огнепреградителей. Рабочий элемент огнепреградителя представляет собой слой пористой среды с эффективным диаметром каналов, меньшим критического [1]. Однако лабораторные исследования и обширный опыт использования огнепреградителей в промышленности показывают, что для эффективной работы огнепреградителя приведенное условие необходимо, но недостаточно [2]. Наиболее тяжелыми с точки зрения локализации пламени, оказываются условия, при которых происходит стабилизация зоны горения на поверхности пламягасящего элемента. 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 [3]. Усилия многих исследователей и конструкторов были направлены на преодоление этого ограничения, так как указанное время в условиях промышленности может оказаться недостаточным для принятия действенных мер по ликвидации аварийной ситуации.

Развитие представлений о фильтрационном горении газа позволило установить, что причиной прогорания является распространение пламени по пористому пламягасящему элементу в режиме низких скоростей (РНС) фильтрационного горения газа (ФГГ) [1]. В рамках этой концепции в одномерном приближении в [4] были проанализированы закономерности прогорания огнепреградителей. Важнейшим результатом этого анализа было выделение в процессе прогорания двух четко различимых стадий: стадии входа пламени в пористый элемент и стадии распространения по нему, что подтверждается экспериментальными наблюдениями [4]. Полное время огнестойкости огнепреградителя, соответственно, складывается из времени входа и времени распространения. Целью настоящей работы является анализ параметрических зависимостей времени прогорания с целью выявления путей повышения огнестойкости огнепреградителей.

Анализ процесса прогорания проводился численно на основе модели фильтрационного горения газа. Огнепреградитель моделировался участком трубы радиусом R_w , в котором располагается пористый блок конечной длины h . Слева по трубе течет горючая смесь, которая втекает в пористый блок. Зажигание газовой смеси осуществляется на участке трубы справа от пористого блока. Труба, в которой располагается пористый блок, обладает теплоемкостью и теплопроводностью, то есть участвует в процессе переноса тепла, моделируя корпус огнепреградителя. Система уравнений, описывающая распространения одномерной нестационарной волны горения в химически инертной пористой среде, состоит из уравнений переноса тепла по газу, твердой фазе, переноса массы недостающего компонента газовой смеси, сохранения полного количества вещества в потоке и уравнения газового состояния. Система решалась численно. Подробное описание системы уравнений и метода их решения приведено в [4].

Программа рассчитывает температурные профили газа и пористой среды и определяет положение фронта пламени в каждый момент. По этим данным может быть определено время входа пламени в пористый блок и время распространения по нему. Расчеты проводились для стехиометрической метано-воздушной смеси. Для газовой

смеси приняты следующие значения параметров [4]. Удельная теплоемкость при постоянном давлении $c_p = 10^3$ Дж/(кг·К), теплопроводность 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 η - относительная концентрация недостающего компонента газовой смеси, $k_0 = 1 \cdot 10^{11}$ с⁻¹, $E = 2.26 \cdot 10^5$ 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 теплотерь на единицу внешней поверхности огнепреградителя оценивался величиной $\alpha_w = 50$ Вт/(м²·К) [4].

В огнепреградителях используются пористые среды двух типов - насыпные и каналные. По термодинамическим параметрам каналная пористая среда отличается от насыпной, главным образом, величиной теплопроводности. В огнепреградителях насыпного типа теплопроводность пористого блока определяется переносом тепла между зернами засыпки и составляет 1-4 Вт/(м·К). В огнепреградителях каналного типа теплопроводность определяется именно теплопроводностью материала пористой среды и может меняться в очень широких пределах. Расчеты показали, что 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. Учитывая, что для насыпных пористых сред характерны значения λ_s меньше 3-4 Вт/(м·К) [5], а для каналных значения λ_s составляют 10-100 Вт/(м·К), можно констатировать, что прогорание насыпных пламягасящих элементов огнепреградителей лимитируется стадией распространения, а каналных - стадией входа. Насыпные пористые среды, используемые в насадочных огнепреградителях, не позволяют в широких пределах варьировать параметры пламягасящего элемента. Это ограничивает возможности доработки насадочных огнепреградителей. Пористые среды каналного типа, используемые в кассетных огнепреградителях, предоставляют большие возможности варьирования параметров.

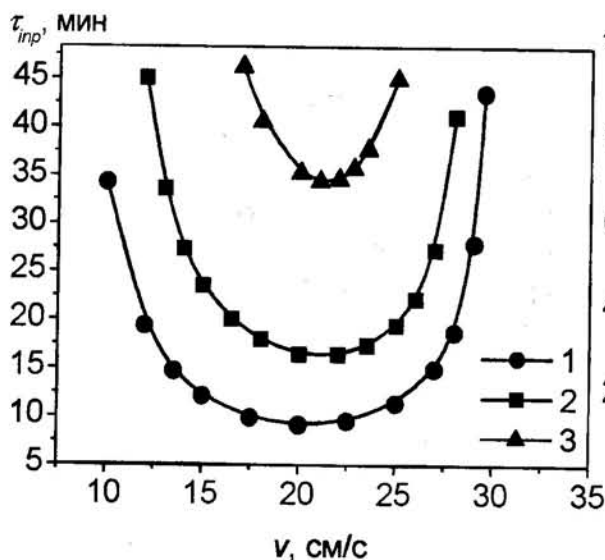


Рисунок 1 - Зависимости времени входа пламени в пористый элемент от скорости газа. d , мм: 3.3 (1), 2.7 (2), 2 (3).

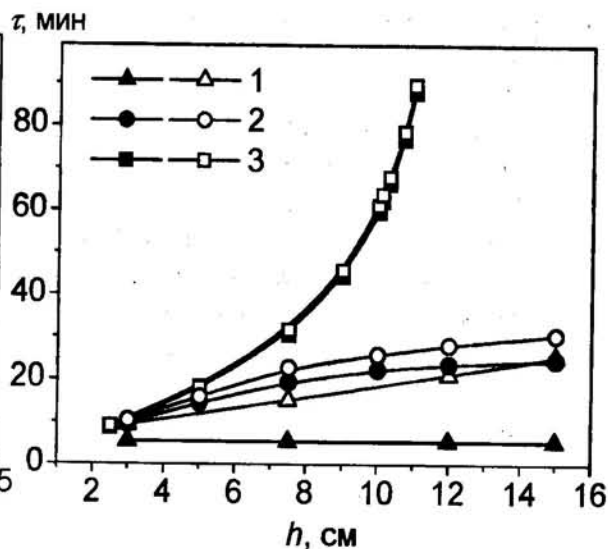


Рисунок 2 - Зависимости времени входа пламени в пористый блок (темные символы) и времени прогорания огнепреградителя (светлые символы) от длины пористого блока. λ_s , Вт/(м·К): 1 (1), 20 (2), 100 (3).

Рисунок 1 демонстрирует зависимости времени входа от скорости газа на входе в пористый элемент. Расчеты сделаны для перфорированного стального блока с пористостью $m=0.5$, плотностью $\rho_s=8 \text{ г/см}^3$, теплоемкостью $c_s=400 \text{ Дж/(кг·К)}$ и теплопроводностью $\lambda_s=70 \text{ Вт/(м·К)}$, длина блока $h=75 \text{ мм}$, диаметр канала $d=1) 3 \text{ мм}$.

Так же, как для насыпных пористых сред, эти зависимости имеют U-образный вид. При малых и больших скоростях потока время входа становится бесконечным, то есть 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 рисунка 1 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 рисунка 2, демонстрирующего влияние длины пористого блока на время входа и прогорания. При $\lambda_s=1 \text{ Вт/(м·К)}$, характерном для насыпных огнепреградителей, время входа практически не зависит от длины блока и составляет около 5 минут. Время прогорания t_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 $\lambda_s=20 \text{ Вт/(м·К)}$ основной вклад во время прогорания дает уже стадия входа в пористый блок. Существенный рост t_{inp} с увеличением h 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 на 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.

При $\lambda_s=100 \text{ Вт/(м·К)}$ время прогорания практически совпадает со временем входа и быстро растет 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 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).

Рисунок 3 демонстрирует изменение времени входа пламени в пористый блок при изменении его длины и диаметра каналов при $\lambda_s=70 \text{ Вт/(м·К)}$ 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 пламягасящего элемента требуется, чтобы огнепреградитель не прогорал.

Кривая (1) на рисунке 4 показывает зависимость h^* от диаметра канала. 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). При $h>h^*$ в пористом элементе формируется стационарный профиль температуры с максимумом на поверхности, на которой стабилизирован факел пламени. Кривой 2 на рисунке 4 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.

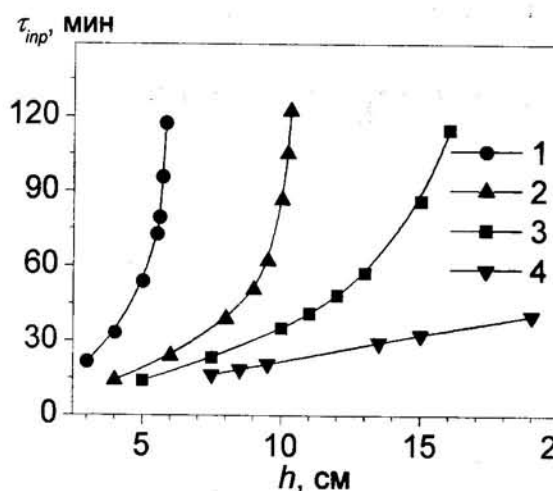


Рисунок 3 - Зависимость времени входа пламени в пористый элемент от его длины при значениях диаметра каналов d : 1 (1), 2 (2), 2.3 (3) и 2.7 (4) мм.

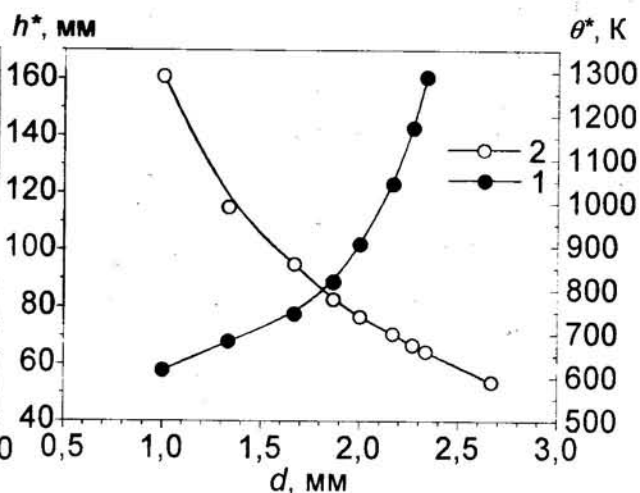


Рисунок 4 - Зависимости критической длины (1) и максимального разогрева пористого элемента (2) от диаметра каналов

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 (рисунок 5). При достижении некоторого значения $m=m^*$ пламя перестает входить в пористый блок, то есть огнепреградитель с таким блоком не прогорает. При заданной длине блока стабилизации пламени на правой границе блока можно достигнуть уменьшением либо диаметра канала, либо пористости. Рисунок 6 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.

Проведенное моделирование дает 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, длины пористого блока.

Первое требование накладывает жесткое ограничение сверху на эффективный диаметр каналов. Он должен быть меньше критического диаметра гашения. Однако сильно занижать диаметр каналов нецелесообразно из-за роста гидравлического сопротивления. 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 5-10% от критического. Кроме того, монолитный блок обладает хорошей теплопроводностью,

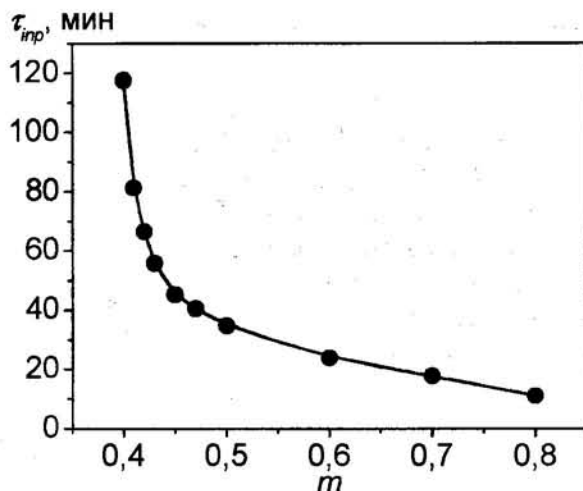


Рисунок 5 - Зависимость времени входа пламени от пористости. $\lambda_s=70 \text{ Вт/(м·К)}$, $v=22 \text{ см/с}$, $d=2 \text{ мм}$.

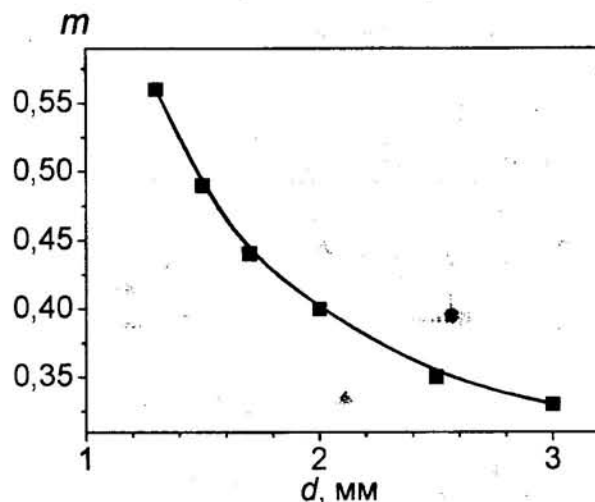


Рисунок 6 - Связь между диаметром каналов и пористостью, обеспечивающая непрогорание пористого блока длиной 75 мм.

что способствует размытию тепла по блоку и увеличению времени входа пламени в пористую среду. Полученные параметрические зависимости огнестойкости для типичного значения $h=75 \text{ мм}$ позволяют рекомендовать в качестве материала блока сталь, обладающую высокой теплопроводностью и хорошей термической стабильностью. Для обеспечения непрогорания пористость огнепреградительного элемента должна выбираться в соответствии с рисунком 6 или аналогичным для выбранных теплофизических параметров блока.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. М.: Химия, 1974.
2. Крошкина О.Г., Сурикова Н.Н., Гликин М.А., Битюцкий В.Е. Устройства для защиты оборудования и коммуникаций взрывопожароопасных производств. Обзор. инф. Сер. "Состояние и совершенствование техники безопасности в химической промышленности". М., НИИТЭХИМ, 1979.
3. 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.
4. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Намятов И.Г., Рычков А.Д. Закономерности распространения пламени через насадку коммуникационных огнепреградителей. Физика горения и взрыва. Т. 43, № 4, С. 23-38. 2007.
5. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Ленинград: "Химия", 1979.