

ОСОБЕННОСТИ ПРОГОРАНИЯ ЗАСЫПНЫХ И КАНАЛЬНЫХ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ

Н.А. Какуткина, А.А. Коржавин, А.Д. Рычков, П.К. Сеначин

В результате численных расчетов прогорания пористого огнепреградителя показано, что время прогорания огнепреградителя является немонотонной, имеющей минимум, функцией теплопроводности пористой среды. При низкой теплопроводности огнепреграждающего элемента прогорание лимитируется временем распространения пламени через него, а при высокой – стадией входа пламени в огнепреграждающий элемент. Время прогорания канальных огнепреградителей может быть увеличено путем увеличения теплопроводности огнепреграждающего элемента, причем при достаточно высокой теплопроводности и оптимальной длине огнепреграждающего элемента может быть достигнуто непрогорание канального огнепреградителя.

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

Огнепреградители с эффективным размером пор, меньшим критического диаметра, надежно защищают оборудование от проскока пламени в защищаемый объем. Однако остается проблема прогорания коммуникационных огнепреградителей [4, 5].

Опасность прогорания возникает в случае воспламенения газовой смеси за огнепреградителем в потоке непрерывно поступающего газа. Факел пламени может стабилизироваться на пористой матрице огнепреградителя, как в случае плоскопламенной горелки [6].

Постепенно прогревая матрицу огнепреградителя, пламя медленно перемещается вглубь матрицы и в конечном итоге может выйти в защищаемый объем. Это явление называется прогоранием огнепреградителя.

Физической основой прогорания является существование низкоскоростного режима фильтрационного горения газа (РНС) [7]. Механизм и закономерности распространения стационарных волн РНС были подробно исследованы в ряде работ [7-17]. Однако стационарные волны возможны только в бесконечно протяженных пористых средах. Пористые матрицы огнепреградителей обычно имеют небольшой толщины порядка 7-10 см,

в то время как ширина стационарной волны РНС может превышать десятки сантиметров. Поэтому процесс прогорания огнепреградителей принципиально нестационарен. Волны фильтрационного горения газа (ФГГ) 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 о существовании 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 характеристик пористой среды огнепреградителя (размер пор, пористость, теплоемкость и теплопроводность пористой среды, размер огнепреградителя) [7]. Оценку времени распространения волны ФГГ по пористому блоку в данных параметрических условиях можно провести в рамках стационарной модели ФГГ [13].

Однако, как следует из результатов экспериментов, полное время прогорания определяется не только временем распространения по блоку, но также и временем формирования волны горения в пористом блоке. Причем время формирования волны, оцененное из экспериментов [18, 19], 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 открывает 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. В данной работе в рамках нестационарной модели ФГГ анализируются общие закономерности прогорания пористых огнепреградителей в целом и отличительные особенности прогорания огнепреградителей с пористыми элементами засыпного и канального типа.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

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:

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

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

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

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

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

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

Граничные условия для системы (1) задаются в следующем виде. На левой границе трубы: $u = u_{\text{вх}}(t)$, $T = T_{\text{вх}}$, $Y = Y_{\text{вх}}$, где индек-

сом “*вх*” 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 ($t=0$):

$$u = u_0(x), \quad T = T_0(x), \quad T_s = T_{s0}(x), \quad Y = Y_0.$$

Зажигание могло осуществляться “открытым пламенем” или прогретым участком пористой среды. Тип зажигания задается начальными профилями температур $T_0(x)$ и $T_{s0}(x)$.

Как частный случай данная система описывает обычное ламинарное пламя в газе. Для этого в системе уравнений необходимо положить ε_g равным 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. Для переинтерполяции параметров течения использовались локальные В-сплайны.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделировалась система, показанная на рис. 1. В трубе диаметром 180 мм и длиной 250 мм расположен пористый блок ограниченного размера. Слева и справа от пористого блока имеются незаполненные участки трубы. Слева подается газовая смесь с заданной скоростью течения. Зажигание осуществляется справа от пористого блока “открытым пламенем”, т.е. на некотором расстоянии от пористого блока в начальный момент задается ступенчатый профиль температуры в газовой фазе. Программа рассчитывает в каждый момент времени профили температуры газа и пористой среды, профиль концентрации метана и определяет координату зоны химической реакции.

В качестве смеси взята стехиометрическая метано-воздушная смесь с $T_b=2320$ К, $c_p=10^3$ Дж/(кг·К), $\lambda=0,1$ Вт/(м·К). Значения параметров скорости химической реакции оценивались из результатов лабораторных экспериментов по фильтрационному горению

ОСОБЕННОСТИ ПРОГОРАНИЯ ЗАСЫПНЫХ И КАНАЛЬНЫХ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ

метано-воздушных смесей [20] и приняты равными $K_0=1 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, $E=2,26 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$. Из этих же экспериментов оценивался уровень теплопотерь $\alpha_w=50 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$.

Расчеты показывают, что 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. Постепенно высокотемпературное газовое пламя, стабилизированное на границе блока, разогревает поверхностные слои пористого блока. Теплопотери от пламени в узкой поре с прогретыми стенками меньше, чем с холодными, и в результате пламя входит в пористую среду.

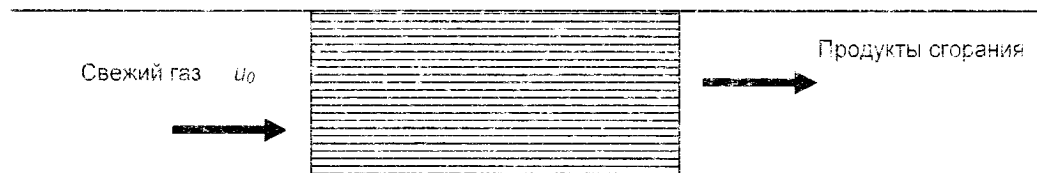


Рис. 1. Геометрия модельной системы

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 связи возможно распространение пламени по пористому блоку.

Третья стадия – это стадия выхода пламени из пористого блока. При приближении к левой границе пористого блока пламя на некоторое время задерживается на границе блока, не выходя в свободную часть трубы. При этом пористая среда разогревается значительно сильнее, чем в стационарной волне. В зависимости от характеристик газовой смеси и пористого блока длительность третьей стадии может меняться в широких пределах. В отдельных случаях торможения на левой границе не выявляются вообще. После выхода из пористого блока пламя распространялось по свободной части трубы со скоростью $S_u - u_0$. 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. В [18, 19] отмечается, что эта стадия не имеет практического значения с точки зрения обеспечения пожаровзрывозащиты и поэтому эта стадия нами не рассматривалась в данной работе.

Проведенное моделирование продемонстрировало важную роль теплопроводности пористой среды в процессе прогорания. В стадии входа волны горения в пористый блок теплопроводность размывает тепло по блоку,

замедляя формирование волны горения в приповерхностных слоях и удлинняя, таким образом, эту стадию. В стадии распространения, напротив, увеличение теплопроводности способствует ускорению прохождения волны горения по блоку. В огнепреградителях засыпного типа теплопроводность пористого блока определяется переносом тепла между зернами засыпки и поэтому мало меняется при изменении теплопроводности материала засыпки. Однако в огнепреградителях канального типа теплопроводность пористого блока определяется именно теплопроводностью материала пористой среды и может меняться в очень широких пределах. Огнепреграждающий элемент канального огнепреградителя может быть выполнен в виде рулона гофрированной фольги или в виде монолитного перфорированного блока.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости времени прогорания огнепреградителя от теплопроводности пористого блока. Расчеты проводились с учетом влияния стенки огнепреградителя. Видно, что время входа волны горения в пористый блок монотонно растет с ростом λ_s , а время распространения по блоку наоборот падает. Полное время прогорания оказывается немонотонной функцией с минимумом, который для блока толщиной 7,5 см достигается при $\lambda_s \approx 4 \text{ Вт/(м·К)}$. При этом при $\lambda_s < 3 \text{ Вт/(м·К)}$ полное время прогорания определяется, главным образом, временем распространения волны горения по пористому блоку, а при больших значениях – временем входа волны в пористый блок. Учитывая, что для огнепреградителей засыпного типа характерны значения λ_s меньшие

3÷4 Вт/(м·К), можно констатировать, что прогорание засыпных 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_{ent} 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.

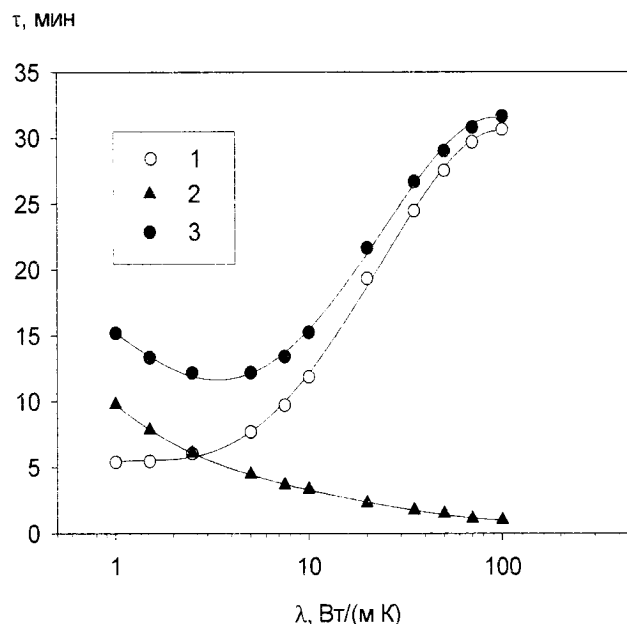


Рис. 2. Зависимости времени входа пламени в пористый блок (1), времени распространения (2) и полного времени прогорания (3) от теплопроводности пористой среды (толщина блока 75 мм, $u_0 = 0,2$ м/с)

Очевидно, что следует стремиться к увеличению времени прогорания огнепреградителей. Из рис. 2 следует, что в канальных огнепреградителях с этой точки зрения целесообразно использовать высокотеплопроводные материалы, например, металлы. Отметим, что относительно низкие огнеупорные свойства металлов в данном случае не являются противопоказанием. Действительно, прогрев пористой среды в волне ФГГ тем ниже, чем выше скорость распространения волны против потока [8], а высокая теплопроводность как раз обуславливает высокие скорости распространения (см. рис. 2, кривая 2). Так, например, расчеты показывают, что для перфорированного блока с размером отверстий 2 мм, пористостью 0,45 и характерным для металлов значением $\lambda_s=70$ Вт/(м·К) разогрев пористого блока не превышает 800 К.

Еще один путь улучшения характеристик канальных огнепреградителей следует из рассмотрения рис. 3, демонстрирующего влияние толщины пористого блока на время прогорания. При $\lambda_s=1$ Вт/(м·К), характерном для засыпных огнепреградителей, время прогорания τ_b линейно растет с увеличением

толщины пористого слоя. Эта зависимость очевидна, так как время входа мало по сравнению со временем распространения, и время прогорания примерно равно h/v , где v – стационарная скорость распространения волны ФГГ.

При $\lambda_s=20$ Вт/(м·К) основной вклад во время прогорания дает уже стадия входа в пористый блок. Существенный рост τ_{ent} с увеличением h вплоть до $h=10$ см обусловлен кондуктивным размытием тепла по толщине пористого слоя. Чем больше h , тем больше тепла уходит на нагрев пористого блока, тем медленнее прогреваются поверхностные слои блока и позже формируется стационарная 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 размытие 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 ростом времени входа, а дальнейший медленный рост

ОСОБЕННОСТИ ПРОГОРАНИЯ ЗАСЫПНЫХ И КАНАЛЬНЫХ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ

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 стабилизируется на поверхности пористого блока, т.е. такой огнепреградитель не прогорает.

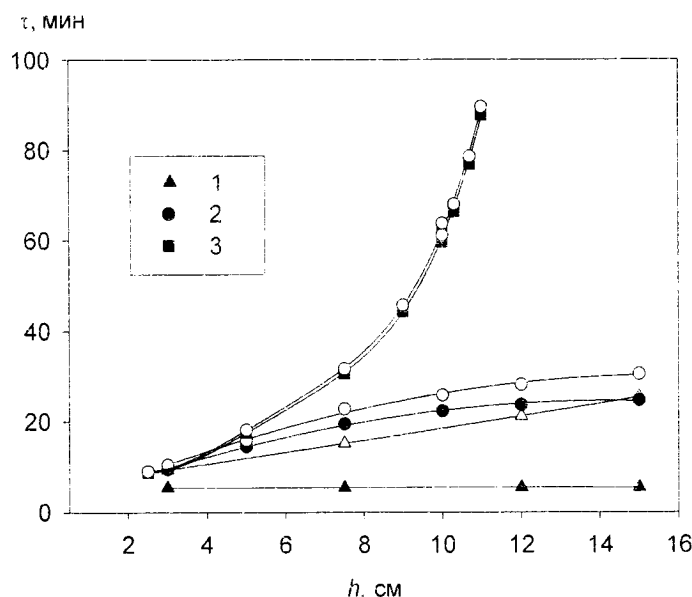


Рис. 3. Зависимости времени входа пламени в пористый блок (темные символы) и времени его прогорания (светлые символы) от толщины пористого блока для различных значений λ_s Вт/(м·К): 1 – (1), 20 – (2), 100 – (3)

ВЫВОДЫ

1. Суммарное время входа пламени в пористый блок и распространения по нему является немонотонной, имеющей минимум, функцией теплопроводности пористой среды.

2. Прогорание огнепреградителей при низкой теплопроводности пористого блока лимитируется временем распространения пламени через него, а при высокой – стадией входа пламени в пористый блок.

3. Время прогорания канальных огнепреградителей может быть увеличено за счет увеличения теплопроводности пористого блока.

4. Непрогорание канального огнепреградителя может быть достигнуто путем увеличения длины пористого блока.

ЛИТЕРАТУРА

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. и др. Математическая теория горения. - М.: Наука, 1980.
3. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. - М.: Химия, 1974.

4. Babkin V.S. 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.

5. Babkin V.S. Some problems of critical diameter // Proc. of the Second seminar on Fire and Explosion Hazards / Ed. Molkov V. - Moscow, 1997. - P. 113-125.

6. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. - М.: Химия, 1980.

7. Бабкин В.С., Лаевский Ю.М. Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. - 1987. - Т. 23. - № 5. - С. 27-44.

8. 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.

9. Бабкин В.С., Лаевский Ю.М. и др. Влияние теплопотерь на распространение стационарных волн при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. - 1984. - Т. 20. - № 1. - С. 19-26.

10. 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.

11. Доброго К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов. - Минск: Нацио-

нальная Академия наук Беларуси. Институт тепло-массообмена им. Лыкова А.В., 2002.

12. 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.

13. Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Фильтрационное горение газа // *Распространение тепловых волн в гетерогенных средах*. /Ред. Ю.Ш. Матрос. Новосибирск: Наука, 1988.

14. 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.

15. Минаев С.С., Потытняков С.И., Бабкин В.С. О неустойчивости фронта пламени при

фильтрационном горении газов // *Физики горения и взрыва*. - 1994. - Т. 30. - №1. - С. 49-54.

16. Минаев С.С., Потытняков С.И., Бабкин В.С. Тепловая устойчивость искривленного газового пламени в пористых средах // *Физики горения и взрыва*. - 1994. - Т. 30. - №1. - С. 39-42.

17. Какуткина Н.А. Некоторые аспекты устойчивости горения газа в пористых средах // *Физики горения и взрыва*. - 2005. - Т. 41. - №4. - С. 39-49.

18. Какуткина Н.А., Коржавин А.А. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса прогорания засыпных огнепреградителей // *Пожарная безопасность*. - № 5. - 2006. - С. 59-72.

19. Какуткина Н.А., Коржавин А.А. и др. Закономерности распространения пламени через насадку коммуникационных огнепреградителей // *Физика горения и взрыва*. - 2007. - № 4. - С. 23-38.