

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ЧЕРЕЗ НАСАДКУ КОММУНИКАЦИОННЫХ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ

Н. А. Какуткина<sup>1</sup>, А. А. Коржавин<sup>1</sup>, И. Г. Намятов<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

Изложены результаты испытаний опытного образца огнепреградителя на проскок пламени и прогорание. Дана интерпретация результатов в рамках нестационарной модели фильтрационного горения газа. Показано, что процесс прогорания огнепреградителя состоит из трех стадий с соизмеримыми характерными временами: стадии входа пламени в пористый блок, стадии распространения по нему и стадии выхода пламени из пористого блока. Описаны механизмы, действующие в каждой стадии, и установлены определяющие параметры. На основе теоретического анализа процесса прогорания рассмотрены пути улучшения характеристик огнепреградителя.

Ключевые слова: фильтрационное горение, огнепреградитель, метан, пористая среда.

### 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]

$$d^* = \text{Re}^* \alpha / S_u,$$

где  $\alpha$  — температуропроводность газовой смеси,  $S_u$  — нормальная скорость горения,  $\text{Re}^*$  — критическое значение числа Пекле, соответствующее гашению. Значение  $\text{Re}^*$ , осредненное по множеству экспериментальных данных и рекомендуемое для технических расчетов, принимается равным 65 [3]. В последние годы было получено более точное условие проскока пламени с учетом эффектов числа Льюиса в ламинарных пламенах [4]. Огнепреградители с эффективным размером пор, меньшим критического диаметра, надежно защищают оборудование от проскока пламени в защищаемый объем. Однако остается проблема прогорания коммуникационных огнепреградителей [5, 6]. Опасность прогорания возникает в случае воспламенения газовой смеси за огнепреградителем в потоке непрерывно поступающего газа. Если скорость газа меньше нормальной скорости горения, то факел пламени может стабилизироваться на пористой матрице огнепрегра-

дителя, как в случае плоскопламенной горелки [7]. Постепенно прогревая матрицу огнепреградителя, пламя медленно перемещается в глубь матрицы и в конечном итоге может выйти в защищаемый объем. Физической основой прогорания пористых огнепреградителей является существование низкоскоростного режима фильтрационного горения газа (РНС) [8]. Механизм и закономерности распространения стационарных волн РНС были подробно исследованы в ряде работ [8–18]. Однако стационарные волны возможны только в бесконечно протяженных пористых средах. Пористые матрицы огнепреградителей обычно имеют небольшую толщину (7 ÷ 10 см), в то время как ширина стационарной волны РНС может превышать десятки сантиметров. Поэтому процесс прогорания огнепреградителей принципиально нестационарен. О закономерностях таких волн горения известно очень мало. Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое исследование процесса прогорания пористых огнепреградителей.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Испытывался опытный образец огнепреградителя, схема которого приведена на рис. 1. Огнепреградитель состоит из входного и выходного конусов и огнепреграждающей насадки. Насадка внутренним диаметром 180 мм состояла из двух, со стороны входа и выхода, металлических пластин толщиной 5 мм, перфорированных отверстиями диаметром 5 мм, ме-

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

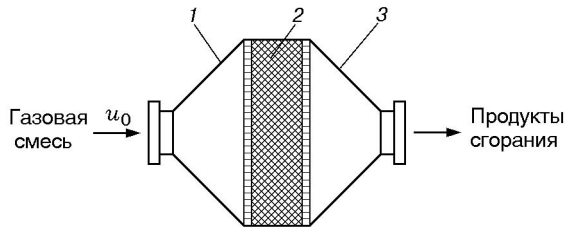


Рис. 1. Схема огнепреградителя:  
1, 2 — входной и выходной конусы, 3 — огнепреграждающая насадка

таллических сеток с размером ячейки 3 мм и засыпанного между ними зернистого электрокорунда. Толщина слоя электрокорунда 75 мм. Зерна электрокорунда были неправильной формы размером  $5 \div 6$  мм. Плотность материала зерна составляла  $3.9 \text{ г/см}^3$ , пористость засыпки 0.45.

Огнепреградитель, предназначенный для локализации пламени метана, испытывался на проскок пламени и на время сохранения работоспособности (время прогорания). Испытания проводились по методикам, соответствующим требованиям, описанным в [19]. В дополнение к стандартным методикам экспериментальный стенд снабжен аппаратурой, позволяющей непрерывно записывать показания термомпар и в автоматическом режиме вести фотографирование огнепреградителя через заданные промежутки времени. В частности, про-

водилась запись температуры стенки выходного конуса огнепреградителя, что позволяло контролировать прогрев огнепреградителя продуктами сгорания пламени. В процессе прогорания огнепреградителя корпус огнепреграждающей насадки разогревался и начинал светиться. Обработка снимков огнепреградителя, которые делались через заданные промежутки времени с помощью Web-камеры и записывались в память компьютера, позволяла оценить характер и скорость распространения пламени по огнепреградителю.

Испытания огнепреградителя на способность локализовать пламя проводились для метановоздушных смесей с содержанием метана 8.5, 9.0, 9.5 и 10 %. Такой набор испытательных смесей обусловлен тем, что из-за эффектов селективной диффузии максимум скорости распространения пламени для метановоздушных смесей может быть смещен в бедную область [4]. Для каждой смеси выполнялось три испытания. Испытания показали, что проскока пламени через данный огнепреградитель не происходит.

Определение времени сохранения работоспособности огнепреградителя в соответствии с требованиями пожарной безопасности [19] проводилось на стехиометрической метановоздушной смеси при расходах газа через огнепреградитель 100, 70, 40 и 10 % от номинального расхода, равного 13.9 л/с. Скорость газовой смеси непосредственно перед огнепреграждающим элементом составляла соответственно 53.5, 37.4, 21.4 и 5.4 см/с. Результаты испытаний представлены в таблице. Для получения дополнительной информации по условиям работы огнепреградителя в различных режи-

Результаты определения времени сохранения работоспособности огнепреградителя

| Номер опыта | Расход горючей смеси, % от номинального | Время сохранения работоспособности | Примечания             |
|-------------|---|------------------------------------|------------------------|
| 1           | 10                                      | Более 1 ч                          | Без выходной сетки     |
| 2           | 10                                      | —//—                               | —//—                   |
| 3           | 40                                      | 25 мин                             | С выходной сеткой      |
| 4           | 40                                      | 33 мин                             | Без выходной сетки     |
| 5           | 70                                      | 32 мин                             | Сгорела выходная сетка |
| 6           | 70                                      | 39 мин                             | Без выходной сетки     |
| 7           | 100                                     | Более 30 мин                       | —//—                   |
| 8           | 100                                     | —//—                               | —//—                   |

мах прогорания снаружи корпуса в верхней части выходной конической насадки была установлена термопара, измеряющая температуру стенки.

При проведении испытаний отмечены следующие особенности. В процессе «прогорания» огнепреградителя выделяются две стадии: стадия формирования волны горения в приповерхностном слое пористой среды на границе со свободным пространством и стадия распространения волны по огнепреграждающему элементу. Это можно видеть, сопоставив представленные на рис. 2 записи температуры стенки выходной конусной насадки для расходов 40 % от номинального, когда пламя прошло через огнепреграждающий элемент (кривая 1), и 100 % (кривая 2), когда прогорания не было. Во втором случае температура корпуса монотонно растет, выходя на стационарное значение, что свидетельствует о стабилизации положения волны горения. В первом же случае корпус разогревается в течение примерно 13 мин, а затем после входа волны горения в пористую среду начинает охлаждаться. Момент начала снижения температуры соответствует моменту входа волны горения в пористый огнепреграждающий элемент и началу его прогорания.

После формирования волны горения в пористом блоке пламя начинает распространяться по огнепреграждающему элементу. Обра-

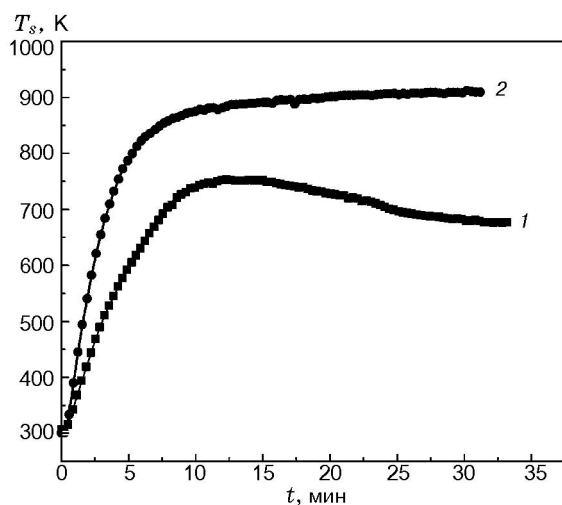


Рис. 2. Зависимости температуры внешней верхней конической части огнепреградителя от времени:

расход смеси: 1 — 40 % (от номинального), 2 — 100 %

ботка видеозаписей показала, что траектория движения волны горения близка к линейной, что свидетельствует о стационарном распространении волны горения по пористому блоку со средней скоростью  $6.2 \cdot 10^{-3}$  см/с. Скорость ламинарного пламени для стехиометрической метановоздушной смеси составляет 42 см/с. Таким образом, скорость распространения пламени в режиме «прогорания» на четыре порядка величины ниже, чем в режиме обычного ламинарного пламени.

В процессе прогорания пористого блока пористая среда сильно разогревается. Например, измерение температуры твердой фазы в 1.5 см от входной поверхности пористого блока показывает, что температура в волне горения достигает 1300 °С. При таких температурах части огнепреградителя могут подвергаться термической деструкции. В частности, в эксперименте 5 расплавилась металлическая сетка, установленная на выходе из пористого блока. После расплавления сетки часть экспериментов проводилась без нее. Это позволило сделать еще одно наблюдение. Сопоставление времен сохранения работоспособности огнепреградителя с сеткой и без нее при одних и тех же расходах газа показало, что без сетки время сохранения работоспособности больше, чем с сеткой, на 8 мин для расхода 40 % и на 7 мин для расхода 70 % от номинального (сравнить строки 3, 4 и 5, 6 в таблице). По нашему мнению, это связано с тем, что сетка способствует прогреву пористой среды, сокращая время формирования волны горения и, как следствие, полное время сохранения работоспособности. Из кривой 1 на рис. 2, относящейся к эксперименту 4 (без сетки), следует, что время входа пламени в пористую среду составляет около 13 мин. Сопоставление с таблицей показывает, что волна горения формировалась в пористой среде в течение 13 мин и за 20 мин прошла оставшуюся часть пористой среды. В эксперименте 3 при тех же начальных условиях по расходу, но с металлической сеткой на выходе прогорание наблюдалось через 25 мин. Очевидно, что уменьшение времени сохранения работоспособности произошло не за счет времени распространения волны горения по пористому блоку, так как условия горения в толще пористого блока не менялись. Следовательно, изменилось время формирования волны горения, оно сократилось до 5 мин.

Наконец, следует отметить, что прогора-

ние огнепреградителя происходит не всегда. Так, из таблицы видно, что при 10 и 100 % от номинального расхода прохождение пламени через огнепреградитель не зарегистрировано. Таким образом, существует ограниченный диапазон скоростей газа, при которых возможно прогорание.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГОРАНИЯ ПОРИСТЫХ СРЕД ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ

В [5] было показано, что физической причиной прогорания огнепреградителей является то, что при наличии потока газа, помимо обычного высокоскоростного режима горения, т. е. «проскока» пламени, возможен низкоскоростной режим фильтрационного горения газа. Типичные скорости распространения волны горения, характерные для этого режима, составляют  $10^{-2} \div 10^{-3}$  см/с. Волны фильтрационного горения газа (ФГГ) могут распространяться как в направлении потока газа (спутная волна), так и против потока (встречная волна). Прогорание огнепреградителя происходит в условиях 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 свойств потока газовой смеси (состав смеси, скорость потока), так и от параметров пористой среды огнепреградителя (размер пор, пористость, теплоемкость и теплопроводность пористой среды, размер огнепреградителя) [8]. Оценку скорости прогорания для заданных параметров, а также параметрический анализ скорости можно провести в рамках стационарной модели ФГГ [14] или адаптированной к потребностям практики инженерной модели [15]. Однако, как следует из результатов экспериментов, полное время прогорания определяется не только временем распространения волны горения по пористому блоку, но и временем ее формирования. Причем время формирования волны, оцененное из описанных выше экспериментов, соизмеримо с 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 пористых огнепреградителей. Процесс формиро-

вания волны горения в пористом блоке принципиально нестационарен и не может быть проанализирован в рамках имеющихся аналитических моделей. Нами использован метод численного моделирования нестационарного процесса фильтрационного горения.

На рис. 3 представлена геометрия моделируемой системы. В трубе радиусом  $R_w$  располагается пористый блок конечной толщины (рис. 3, а), который может состоять из нескольких слоев пористых сред с различными характеристиками (рис. 3, б). Такая модификация позволяет исследовать влияние различных прослоек и сеток на характеристики прогорания огнепреградителя. Горючая смесь поступает в пористый блок слева, а справа выходят продукты сгорания. Волна горения предполагается плоской и одномерной, возможные эффекты искривления фронта не рассматриваются.

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

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

$$\rho_s (1 - \varepsilon_g) c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( (1 - \varepsilon_g) \lambda_s + \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) +$$

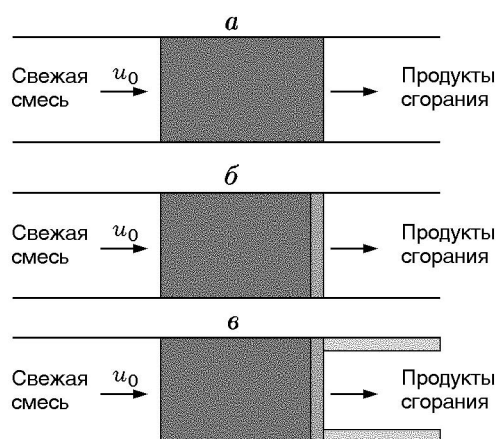


Рис. 3. Геометрия модельной системы

$$+ \alpha S_c(T - T_s) + 2 \frac{\alpha_w}{R_w}(T_0 - T_s), \quad (2)$$

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

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

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

Здесь  $T$  и  $T_s$  — температуры газа и инертной пористой среды,  $Y$  — относительная массовая концентрация недостающего компонента газовой смеси,  $u$  — скорость несущего газа,  $\rho$  и  $\rho_s$  — плотности газа и материала пористой среды,  $c_p$  и  $c_s$  — удельные теплоемкости,  $\lambda$  и  $\lambda_s$  — коэффициенты теплопроводности газа и пористой среды,  $\varepsilon_g$  — пористость,  $\alpha$  — коэффициент межфазного теплообмена,  $\alpha_w$  — коэффициент внешней теплоотдачи,  $S_c$  — 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,  $W = k_0 \exp(-E/RT)$  — константа скорости обобщенной одностадийной химической реакции, где  $k_0$  — предэкспоненциальный множитель,  $E$  — энергия активации,  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Граничные условия задаются в следующем виде. На левой границе трубы:  $u = u_{inp}(t)$ ,  $T = T_{inp}$ ,  $Y = Y_{inp}$ , где  $u_{inp}$ ,  $T_{inp}$ ,  $Y_{inp}$  — входные значения соответственно 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 при  $t = 0$ :  $u = u_0(x)$ ,  $T = T_0(x)$ ,  $T_s = T_{s0}(x)$ ,  $Y = Y_0$ . Зажигание могло осуществляться «открытым пламенем» или прогретым участком пористой среды. Тип зажигания задается начальными профилями  $T_0(x)$  и  $T_{s0}(x)$ .

В частном случае данная система описывает обычное ламинарное пламя в газе. Для этого в системе уравнений необходимо положить  $\varepsilon_g = 1$ .

## АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Для численного решения системы (1)–(4) использовалась конечно-разностная схема, основанная на лагранжевой аппроксимации конвективных членов. Суть этой схемы рассмотрим на примере модельного уравнения

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Заменим левую часть (5) эквивалентным ей выражением  $\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT}{dt}$ , записанным вдоль направления  $\frac{dx}{dt} = u(x, t)$ , которое в дальнейшем будем называть характеристикой уравнения (5). Тогда вдоль характеристики это уравнение запишется в виде  $\frac{dT}{dt} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ . Для его решения построим следующую неявную разностную схему (для простоты предположим, что разностная сетка является равномерной по пространству с шагом  $h$ ):

$$\frac{T^{n+1} - T_*^n}{\tau} = \delta \lambda_i^{n+1} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_i^{n+1} + (1 - \delta) \lambda_*^n \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_*^n \quad (6)$$

( $\tau$  — шаг по времени). Значения величин со звездочкой вычислены в точках пересечения характеристики с прямыми, образующими разностную сетку. Вторые производные аппроксимируются центральными разностями. Величина  $\delta$  меняется в пределах  $0 \leq \delta \leq 1$  и управляет порядком аппроксимации данной схемы. Нетрудно видеть, что при  $\delta = 0.5$  схема (6) аппроксимирует уравнение (5) со вторым порядком по пространству и времени. Систему уравнений (1)–(4) можно записать в векторном виде аналогично уравнению (5) и решить с помощью векторной прогонки с использованием схемы (6). Величины в правой части, отвечающие за «жесткость», вычисляются на верхнем временном слое, что обеспечивает А-устойчивость данной схемы.

Поскольку протяженность зоны горения очень мала, то для достаточно точного расчета параметров течения в ней использована 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 использованы локальные В-сплайны.

Верификация программы проведена путем тестирования на нескольких задачах с известными решениями. В частности, проведены тестовые расчеты по параметрическим зависимостям и абсолютным значениям нормальной скорости ламинарного пламени [2] (случай  $\varepsilon_g = 1$ ,  $u = 0$ ), по параметрическим зависимостям и значениям скорости распространения стационарных волн ФГГ, которые сопоставлялись со значениями, рассчитанными в рамках аналитической модели ФГГ [14]. Выполнены также расчеты кондуктивно-конвективной трансформации во времени первоначально ступенчатого температурного профиля пористой среды при отсутствии химической реакции ( $Q = 0$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим систему, показанную на рис. 3,а. В трубе диаметром 180 мм и длиной 250 мм расположен пористый блок толщиной 75 мм, как в реальном огнепреградителе. Слева и справа от блока имеются незаполненные участки трубы. Слева подается газовая смесь с заданной скоростью течения. Зажигание осуществляется «открытым пламенем» на некотором расстоянии справа, т. е. в начальный момент задается ступенчатый профиль температуры в газовой фазе. В каждый момент времени рассчитываются профили температуры газа и пористой среды, профиль концентрации метана и координата зоны химической реакции.

Рассматривался огнепреградитель засыпного типа с параметрами, близкими к параметрам испытываемого огнепреградителя:  $\rho_s = 3.9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon_g = 0.45$ ,  $c_s = 800$  Дж/(кг·К). В качестве среднего размера зерна принято значение  $d = 5$  мм. Коэффициент теплообмена рассчитывался по соотношениям, рекомендованным в [20] для засыпных пористых сред:

$$\alpha = \frac{\text{Nu}\lambda}{d_{eff}}, \quad \text{Nu} = 0.395\text{Re}^{0.64}\text{Pr}^{0.33},$$

$$\text{Re} = \frac{|u|d_{eff}\rho}{\mu}, \quad d_{eff} = \frac{2\varepsilon_g d}{3(1 - \varepsilon_g)},$$

где Nu, Re и Pr — числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля,  $d_{eff}$  — эффективный диаметр

поры,  $\mu$  — динамическая вязкость газа. Удельная поверхность определялась как  $S_c = 6(1 - \varepsilon_g)/d$ .

Теплопроводность пористой среды не равна теплопроводности материала зерна, так как определяется главным образом передачей тепла между зернами. Для данной засыпки принято  $\lambda_s = 0.5$  Вт/(м·К).

В качестве смеси взята стехиометрическая метановоздушная смесь ( $T_b = 2320$  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 метановоздушных смесей [21]. В данных расчетах  $k_0 = 1 \cdot 10^{11}$  с<sup>-1</sup>,  $E = 2.26 \cdot 10^5$  Дж/моль. Из этих же экспериментов оценивался уровень теплотер:  $\alpha_w = 50$  м<sup>2</sup>/К.

На рис. 4 показаны результаты расчета для входной скорости газа 0.24 м/с. Видно, что в процессе прогорания огнепреградителя можно выделить три стадии.

Первая стадия — вход 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 меньше критического. Постепенно высокотемпературное газовое пламя, стабилизированное на границе блока, разогревает поверхностные слои пористого блока. Теплотерии от пламени в узкой поре с прогретыми стенками меньше, чем с холодными, и в результате пламя входит в пористую среду. Из рис. 4,б видно, что в приведенном примере эта стадия заняла около 5 мин, ей соответствуют кривые 1–3 на рис. 4,а и участок OA на траектории движения волны. Все это время координата фронта пламени практически не менялась и совпадала с координатой правой границы пористого блока.

Вторая стадия — это распространение сформированной волны горения по пористому блоку. Волна горения представляет собой комплекс из тепловой волны в газе, пористой среде и из волны химической реакции. Только в таком комплексе возможно распространение пламени по пористому блоку. Из рисунка 4,а видно, что волна горения распространяется по пористому блоку стационарно: форма температурного профиля не меняется. На траекто-

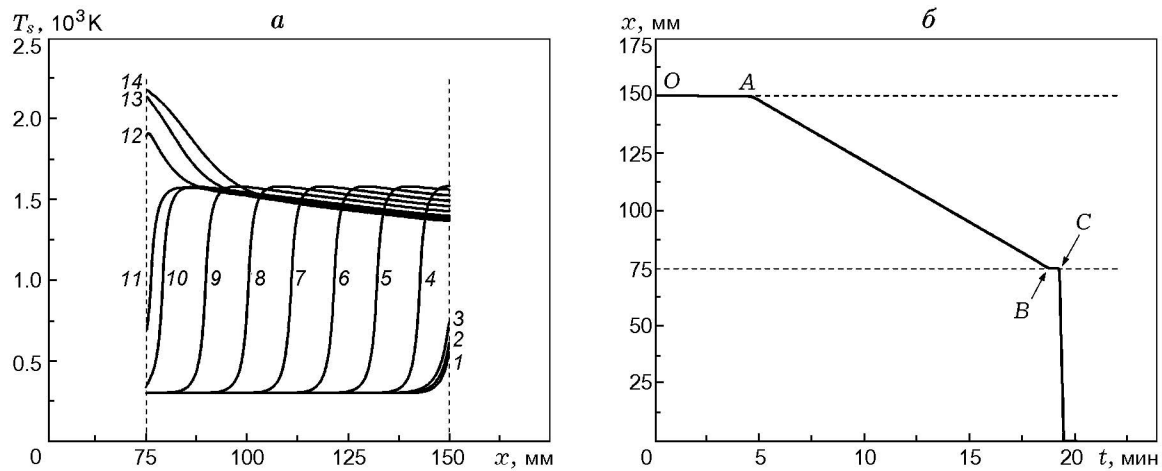


Рис. 4. Изменение во времени температурных профилей в пористом блоке (а) и траектория распространения волны горения в пористом блоке (б):

время с момента зажигания  $t$ , мин: 0.5 (1), 1 (2), 4 (3), 6 (4), 8 (5), 10 (6), 12 (7), 14 (8), 16 (9), 18 (10), 18.5 (11), 19 (12), 19.5 (13), 20 (14);  $u_0 = 0.24$  м/с; штриховые линии — границы пористого блока

рии движения эта стадия выглядит прямой линией  $AB$ , наклон которой характеризует скорость распространения волны. В данном примере скорость  $8.7 \cdot 10^{-3}$  см/с, что близко к значению  $6.2 \cdot 10^{-3}$  см/с, измеренному в эксперименте.

Третья стадия — выход пламени из пористого блока. Как следует из рис. 4, б, при приближении к левой границе блока пламя на некоторое время задерживается на границе (участок  $BC$ ), не выходя в свободную часть трубы. При этом пористая среда разогревается значительно сильнее, чем в стационарной волне (см. рис. 4, а). В приведенном примере длительность третьей стадии составляла около 1 мин, после чего пламя вышло из пористого блока и далее распространялось по свободной части трубы со скоростью  $S_u - u_0$ . Однако в зависимости от характеристик газовой смеси и пористого блока длительность третьей стадии может меняться в очень широких пределах. В отдельных случаях торможения на левой границе не наблюдается вообще. В ряде случаев расчеты показывают стабилизацию пламени на левой границе, т. е., пройдя пористый блок, пламя не может его покинуть. При этом поверхность пористого блока разогревается до температуры, близкой к температуре адиабатического пламени, и система аналогична излучательной горелке.

Рассмотрим более подробно механизмы и закономерности, характерные для каждой ста-

дии процесса прогорания. Закономерности стационарных волн фильтрационного горения газа изучены достаточно хорошо, отметим лишь некоторые из них применительно к прогоранию огнепреградителей. На рис. 5 приведены скорости  $v$  распространения волны горения в пористой среде в зависимости от скорости  $u_0$  потока газа в трубе слева от пористого блока (скорость течения в пористой среде равна  $u_0/\varepsilon_g$ ). Положительным значениям  $v$  соот-

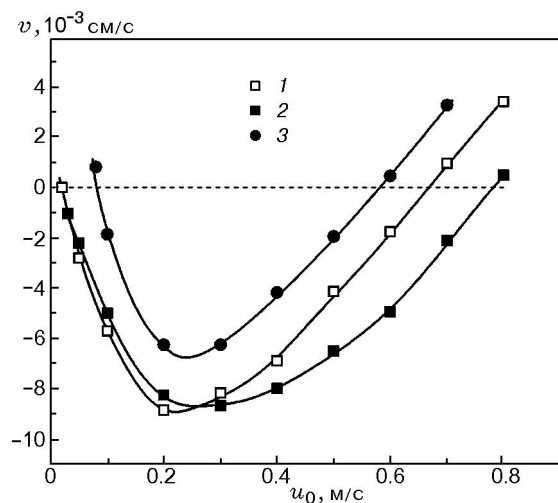


Рис. 5. Зависимости скорости волны горения стехиометрической метановоздушной смеси в пористой среде от скорости газа:

1 —  $d = 5$  мм,  $\alpha_w = 50$  м<sup>2</sup>/К; 2 —  $d = 3$  мм,  $\alpha_w = 50$  м<sup>2</sup>/К; 3 —  $d = 5$  мм,  $\alpha_w = 1000$  м<sup>2</sup>/К

ветствует распространение по потоку газовой смеси, а отрицательным — против потока. Из рис. 5 видно, что встречное по отношению к потоку распространение волн горения, соответствующее режиму прогорания огнепреградителя, возможно лишь в ограниченном интервале скоростей газа, при очень больших и очень малых значениях прогорания невозможно. Это свойство волн ФГГ согласуется с тем фактом, что в экспериментах прогорание огнепреградителя наблюдалось только при 40 и 70 % от номинального расхода, а при 10 и 100 %, соответствующих малым и большим скоростям газа, прогорание не зарегистрировано. Второе важное свойство зависимостей  $v(u_0)$  — немонотонность и наличие максимума (по абсолютной величине) скорости встречной волны горения. Это означает, что существует область наиболее опасных скоростей течения газа, где прогорание идет наиболее быстро. Рис. 5 иллюстрирует также влияние параметров пористого блока на характер зависимости  $v(u_0)$ . В частности, уменьшение среднего размера зерна засыпки до 3 мм в данной области параметров почти не меняет максимальную скорость прогорания и несколько расширяет интервал скоростей газа, в котором возможно прогорание. Увеличение теплопотерь от системы при прочих равных условиях приводит к сужению области прогорания и уменьшению максимальной скорости прогорания, что улучшает характеристики огнепреградителя. Заметим, однако, что обеспечение столь больших теплопотерь, дающих заметное улучшение характеристик огнепреградителя, возможно только при принятии специальных технических мер, например введении в пористую среду теплообменника, как это сделано в [22].

Рассмотрим механизмы и закономерности, действующие на нестационарной стадии входа волны горения в пористый блок. Распространение пламени по пористой среде с размером пор меньше критического возможно только «в связке» с тепловой волной в твердой фазе. Поэтому на стадии входа пламя должно прогреть близлежащие участки пористой среды и сформировать тепловую волну. На рис. 6 показано изменение во времени профилей температуры газа и пористой среды в процессе формирования волны ФГГ в пористом блоке. Профиль 1 температуры газа представляет собой структуру ламинарного адиабатического газового пламени, распространяющегося ста-

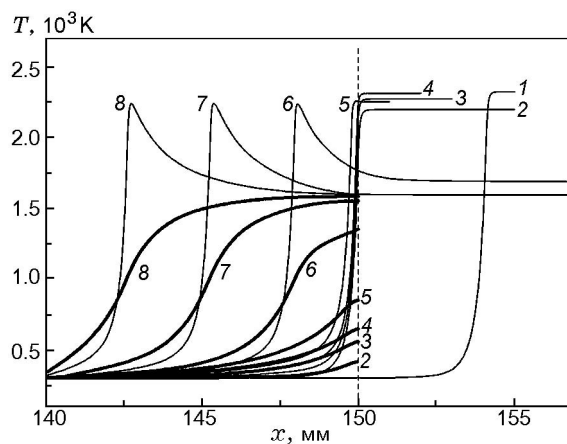


Рис. 6. Профили температуры газа (тонкие линии) и пористой среды (толстые линии) в стадии входа волны горения в пористый блок:

$t$ , с: 0.1 (1), 5 (2),  $t$ , мин: 0.5 (3), 1.5 (4), 4.5 (5), 5 (6), 5.5 (7), 6 (8);  $u_0 = 0.24$  м/с; штриховая линия — правая граница пористого блока

ционарно по участку трубы, свободному от пористой среды со скоростью  $v = S_u - u_0$ . Далее пламя подходит к границе пористого блока и останавливается. Стабилизация происходит за счет того, что в момент, когда пламя подходит вплотную к пористому блоку, часть зоны подогрева пламени оказывается в поровом пространстве (см. рис. 6, профиль температуры газа 2). При этом меняется тепловой баланс в газе. Кондуктивный нагрев газа в поре пламенем уравнивается конвективным переносом тепла набегающим потоком газа и теплопотерями в пористую среду. Причем стабилизация пламени на границе осуществляется автоматически. В частности, если превалирует кондуктивный прогрев газа, поровое пространство глубже прогревается, пламя глубже входит в поровое пространство, что приводит к увеличению теплопотерь от пламени и уравниванию тепловых потоков. Стабилизация пламени на границе сопровождается снижением температуры горения газа (профили температуры газа 1 и 2), что обусловлено теплопотерями от газа в пористую среду. Если бы температура пористой среды не менялась, то пламя так и осталось бы на границе пористого блока. Однако пористая среда прогревается за счет межфазного теплообмена с подогретым газом в поровом пространстве (профиль температуры пористой среды 2). Сначала прогрев пористой среды идет очень медленно за



счет низкого температурного напора  $T - T_s$ , а температура пористой среды всюду ниже температуры газа. По мере прогрева поверхностных слоев пористой среды становится заметным действие теплопроводности, передающей тепло в глубь блока. В результате уже через 0.5 мин (кривые 3) в структуре волны горения появляется область, где температура пористой среды выше, чем газа (область отрицательного температурного напора). При этом возникает положительная обратная связь. Новые порции газа, проходя область с отрицательным температурным напором, подогреваются, увеличивая энтальпию горящего газа. Это приводит к повышению температуры горения (профили температуры газа 2 и 3) и незначительному смещению зоны горения в глубь пористой среды. Расчеты показывают, что вспышка газа в поровом пространстве происходит, когда температура поверхности пористой среды достигает  $750 \div 900$  К в зависимости от скорости течения газа. Вход высокотемпературной зоны газового горения в поровое пространство обуславливает резкое увеличение температурного напора и, как следствие, быстрый прогрев пористой среды (профили температуры пористой среды 5 и 6).

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

Перейдем к рассмотрению стадии выхода волны горения из пористого блока. Рис. 7 показывает трансформацию структуры волны в этой стадии. Вообще говоря, полученный ре-

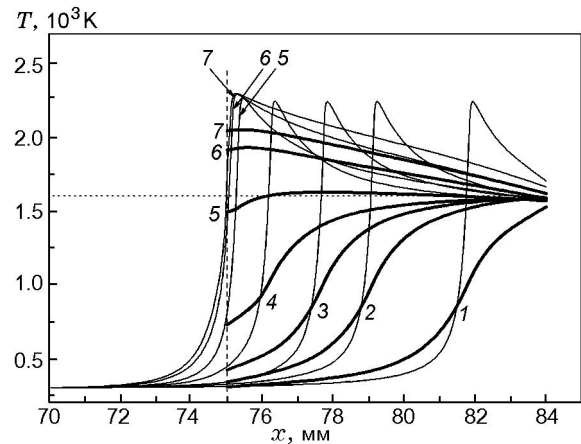


Рис. 7. Профили температуры газа (тонкие линии) и пористой среды (толстые линии) на стадии выхода волны горения из пористого блока:

$t$ , мин: 17.5 (1), 18 (2), 18.25 (3), 18.5 (4), 18.75 (5), 19 (6), 19.17 (7);  $u_0 = 0.24$  м/с; штриховая линия — левая граница пористого блока, пунктирная — уровень максимальной температуры пористой среды в стационарной волне

зультат временной или окончательной стабилизации волны на выходе из пористого блока и разогрева поверхности блока до температур, превышающих разогрев в стационарной волне, представляется на первый взгляд неожиданным. Действительно, вход пламени в блок требует затрат энергии на прогрев пористой среды, так как распространение пламени по пористому блоку возможно только в комплексе с тепловой волной в пористой среде, что объясняет задержку на правой границе блока. При выходе из пористой среды, напротив, тепло химической реакции перестает тратиться на нагрев твердой фазы, и задержка представляется необоснованной. Рассмотрение рис. 7 позволяет предложить следующий механизм этого явления. При стационарном распространении волны горения по пористому блоку в баланс тепла газовой фазы в поровом пространстве включено тепло, которое газ аккумулирует, проходя по нагретой пористой среде. При приближении зоны горения к краю пористого блока время пребывания газа в прогретой пористой среде до момента вспышки сокращается, как видно из рис. 7. Соответственно уменьшается и количество тепла, которое газ запасает на этой стадии. Баланс тепла становится дефицитным по сравнению со стационарной волной. В результате движение фронта пламени в сторону

холодного свежего газа замедляется (профили температуры газа 5–7 на рис. 7). Затраты тепла на прогрев новых участков пористой среды уменьшаются, так как область газового горения перестает двигаться относительно твердой фазы. В результате начинается избыточный относительно стационарной волны разогрев пористой среды (см. профили температуры твердой фазы 5–7). По мере ее разогрева теплопотери от горящего газа в пористую среду падают. В какой-то момент уменьшение теплопотери может скомпенсировать недогрев газа в пористой среде, и зона горения снова начинает смещаться в сторону холодного газа — происходит выход пламени из пористого блока. В описанном механизме время задержки пламени на левой границе соответствует времени прогрева поверхности пористого блока до температуры, обеспечивающей положительный тепловой баланс в газовой фазе. Рост температуры поверхности пористой среды ограничен величиной адиабатической температуры горения газовой смеси, соответствующей максимальному разогреву пористой среды в стоячей (неподвижной относительно твердой фазы) волне ФГГ [23]. Если этого максимального разогрева окажется недостаточно для выхода зоны пламени из пористого блока, произойдет стабилизация волны горения на левой границе блока.

Отметим, что, хотя обнаруженный эффект задержки или стабилизации пламени на выходе из пористого блока представляет интерес с научной точки зрения, едва ли его можно рассматривать как фактор, влияющий на работоспособность огнепреградителя. Поскольку стабилизация осуществляется непосредственно на границе пористого блока с защищаемым объемом, даже незначительные флуктуации скорости течения газа, обусловленные сбоями в системе подачи газа или локальными неоднородностями течения газа в засыпной пористой среде, могут привести к срыву пламени с поверхности пористого блока и переходу в защищаемый объем. Поэтому в дальнейшем задержкой на выходе будем пренебрегать и под временем прогорания огнепреградителя понимать сумму времен входа и распространения по пористому блоку. С другой стороны, управление временем входа пламени в пористый блок может служить реальной основой для улучшения характеристик огнепреградителя.

Рис. 8 показывает изменение времени вхо-

да пламени в пористый блок и времени прохождения засыпного блока при изменении скорости газа. Время входа является немонотонной функцией скорости течения газа. Наиболее быстрый вход волны горения в пористый блок, около 2 мин, происходит при умеренных скоростях газа  $0.1 \div 0.2$  м/с. При малых и больших скоростях газа время входа пламени в пористый блок резко возрастает, а при скоростях газа, меньших 0.03 и больших 0.25 м/с, происходит стабилизация пламени на правой границе пористого блока, т. е. пламя вообще не входит в огнепреградитель. Таким образом, наряду с ограниченной областью скоростей газа, в которой пламя может распространяться по пористому блоку против потока газа, существует еще одно ограничение — по зажиганию волны горения в пористом блоке. Интересно, что, хотя зависимости времени распространения и времени входа от скорости газа имеют подобную U-образную форму, полной корреляции между ними нет. В частности, верхний предел по скорости газа для зажигания возникает в области скоростей газа, соответствующих наиболее быстрому распространению волны горения по пористому блоку. Причина такого расхождения в том, что в стационарной волне горения газа в пористой среде важную роль играет разогрев твердого каркаса (зависящий от скорости течения газа), который в стадии формирования волны еще очень мал.

Из рис. 8 следует, что для данного пористого блока в широком диапазоне скоростей газа полное время прогорания засыпного огнепреградителя определяется главным образом временем распространения пламени по блоку, и только при скоростях газа, близких к пределам зажигания, лимитирующей становится стадия входа волны горения в пористый блок. Тем не менее роль стадии зажигания нельзя недооценивать. Так, сопоставляя рис. 5 и рис. 8, легко видеть, что учет стадии зажигания резко сужает область скоростей газа, при которых возможно прогорание засыпного огнепреградителя: область распространения  $0.03 < u_0 < 0.68$  м/с сужается до диапазона  $0.03 < u_0 < 0.25$  м/с за счет пределов зажигания.

Рассмотрим пути улучшения характеристик огнепреградителя. Идеальным с точки зрения прогорания мог бы считаться огнепреградитель, в который пламя вообще не входит во всем допустимом диапазоне скоростей тече-

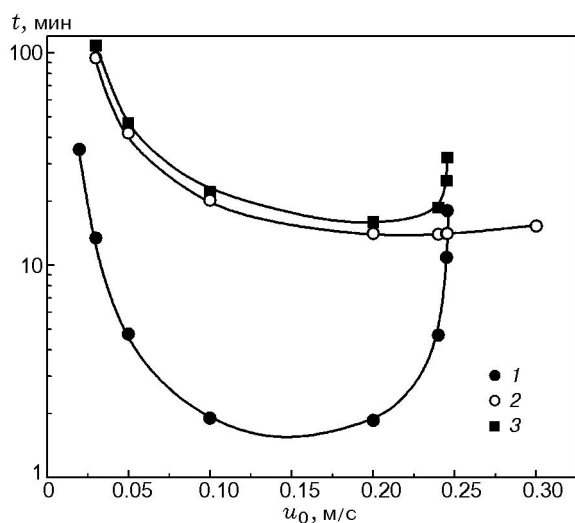


Рис. 8. Зависимости времени формирования волны горения (1), времени прохождения волной пористого блока (2) и полного времени прогорания огнепреградителя (3) от скорости потока газа (толщина пористого блока 7.5 см)

ния газа. Теоретически достижение такого результата возможно, например, за счет сильного уменьшения пористости и размера пор огнепреградителя. Однако практически это привело бы к неоправданно высокому сопротивлению огнепреградителя газовому потоку, что неприемлемо для обычных условий эксплуатации коммуникационных огнепреградителей. Поэтому под улучшением характеристик огнепреградителя понимается увеличение времени сохранения работоспособности огнепреградителя. В зависимости от времени прогорания огнепреградителя делятся на классы: чем выше время прогорания, тем более высокого класса огнепреградитель. Увеличить время прогорания огнепреградителя можно, увеличивая время распространения по пористому блоку или время входа пламени в пористую среду. В случае засыпных пористых сред возможности влияния на время распространения весьма ограничены. Действительно, теплофизические свойства пористой среды — плотность, теплоемкость — примерно одинаковы для всех огнеупорных материалов, которые могут использоваться в качестве засыпки. Теплопроводность пористой среды определяется передачей тепла не по гранулам засыпки, а главным образом между ними и является характеристикой не столько материала засыпки, сколько размера и формы зерна, и также меняется незначитель-

но [20]. Пористость засыпных пористых сред также определяется в основном формой зерна и меняется в узком диапазоне  $0.4 \div 0.5$  [20]. Остаются два параметра процесса, которые можно менять в относительно широких пределах — средний размер зерна пористой среды и уровень теплопотерь. Из рис. 5 видно, что довольно значительное уменьшение размера зерна от 5 до 3 мм не приводит к существенному изменению скорости стационарной волны горения в пористой среде, а значит, и время распространения также изменится слабо. Дальнейшее уменьшение размера зерна нецелесообразно из-за резкого увеличения сопротивления пористого блока. Увеличение теплопотерь от пористой среды заметно уменьшает скорость распространения (см. рис. 5) и в принципе может рассматриваться как путь улучшения характеристик огнепреградителя. Однако, как уже отмечалось, столь значительное увеличение теплопотерь требует специальных технических решений.

Рассмотрим пути влияния на время входа пламени в пористую среду. В процессе входа задействованы только ближайшие к границе пористого блока слои пористой среды. Поэтому следует ожидать, что изменение характеристик приповерхностных слоев засыпки может повлиять на время входа. Хорошо известно [20], что в случае засыпных пористых сред локальная пористость приповерхностных слоев пористого блока (на глубину  $1 \div 2$  размеров зерна) примерно на 20 % выше, чем в объеме. Смоделируем этот эффект введением дополнительного слоя пористой среды толщиной 5 мм с пористостью 0.55, как показано на рис. 3, б. Сопоставление кривых 1 и 2 на рис. 9 позволяет оценить влияние краевого эффекта на время входа пламени в пористый блок. Видно, что во всем диапазоне скоростей газа учет краевого эффекта приводит к существенному, в несколько раз, уменьшению времени входа. Кроме того, краевой эффект ответствен за сдвиг верхнего предела зажигания по скорости газа с 0.25 до 0.29 м/с.

Скорость прогрева крайних слоев пористой среды, необходимого для входа волны горения в пористый блок, определяется суммарным потоком тепла, поступающего к границе пористого блока. Поэтому любые дополнительные потоки тепла, помимо поступающего от горящего газа, направленные к пористому блоку или от него, должны влиять на время вхо-

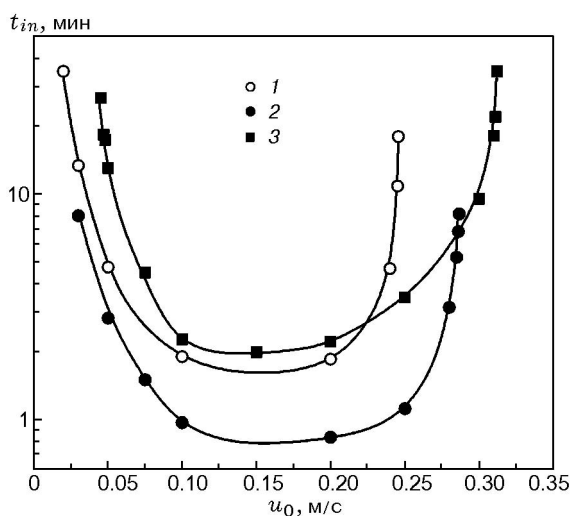


Рис. 9. Зависимости времени входа пламени в пористый блок от скорости газа:

1 — пористый блок без краевых эффектов, 2 — пористый блок с краевыми эффектами, 3 — то же, что 2, с учетом влияния стенки трубы

да. Одним из таких тепловых потоков, от которого трудно избавиться в реальном огнепреградителе, является кондуктивный теплообмен пористой среды с корпусом огнепреградителя. Массивные металлические стенки в выходной части огнепреградителя нагреваются продуктами сгорания газа. Теплопроводность материала стенок велика. Поэтому при наличии температурного градиента вдоль стенки выходной части трубы возникает кондуктивный поток тепла. В расчетах этот эффект моделировался следующим образом. Участок трубы в выходной части огнепреградителя рассматривался как пористая среда с очень высокой пористостью и высокой теплопроводностью, соответствующей теплопроводности материала стенки (см. рис. 3, в). Пористость оценивалась из соотношения площадей поперечного сечения стенки и свободного объема в выходной части реального огнепреградителя и составила  $\epsilon_g = 0.91$ . Теплопроводность стенки принималась равной  $70 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  [24]. Коэффициент межфазного теплообмена рассчитывался по соотношению для теплообмена в трубах [25]. В пористом блоке учитывался краевой эффект. Результаты расчета показаны на рис. 9 кривой 3. Из сравнения кривых 2 и 3 следует, что влияние теплообмена со стенкой на время входа неоднозначно. В области малых и умеренных скоростей газа влияние стенки приводит

к заметному замедлению входа пламени в пористый блок и сдвигу нижнего предела зажигания по скорости газа с  $0.02$  до  $0.045$  м/с. В области больших скоростей газа, начиная с  $0.285$  м/с, влияние стенки, напротив, приводит к ускорению входа и расширению области зажигания с  $0.29$  до  $0.31$  м/с.

Причина противоположного влияния стенки при малых и больших скоростях газа ясна из рис. 10, на котором представлены температурные профили в стадии входа пламени в пористый блок для двух значений скорости газа —  $0.04$  и  $0.32$  м/с, для которых влияние стенки оказывает противоположный эффект. Кривыми 1 представлены профили температуры газа в момент, когда пламя только подошло к правой границе пористого блока и стабилизировалось на ней. Легко выявляются два отличия: при увеличении скорости газа уменьшается глубина прогрева газа в поровом пространстве и увеличивается температура горения. Первая ответственна за прогрев пористой среды, вторая — за прогрев стенки огнепреградителя в области продуктов сгорания. Таким образом, при малых скоростях газа пористая среда прогревается быстрее стенки и тепло от пористой среды начинает перетекать к менее прогретой стенке огнепреградителя. Это хорошо видно по профилям температуры твердой фазы на рис. 10, а при  $x > 155$  мм, где расположена виртуальная пористая среда, имитирующая выходную часть огнепреградителя. Отрицательный градиент температуры в этой области указывает на то, что тепло от пористого блока отводится по стенке огнепреградителя. В результате увеличивается время прогрева поверхности пористого блока до температуры вспышки и, соответственно, время входа. При больших скоростях газа, напротив, более горячие продукты сгорания эффективно прогревают стенку трубы. Начиная с какого-то времени температура стенки становится выше температуры поверхности блока (рис. 10, б, кривые 4, 5) и поток тепла от стенки устремляется к пористой среде, ускоряя процесс входа пламени в пористый блок.

Обнаруженный достаточно сильный краевой эффект указывает еще один путь влияния на время входа, а именно — введение перед пористым блоком узкой прослойки пористой среды с параметрами, отличными от параметров основного пористого блока. Это могут быть различного рода сетки, тонкие слои

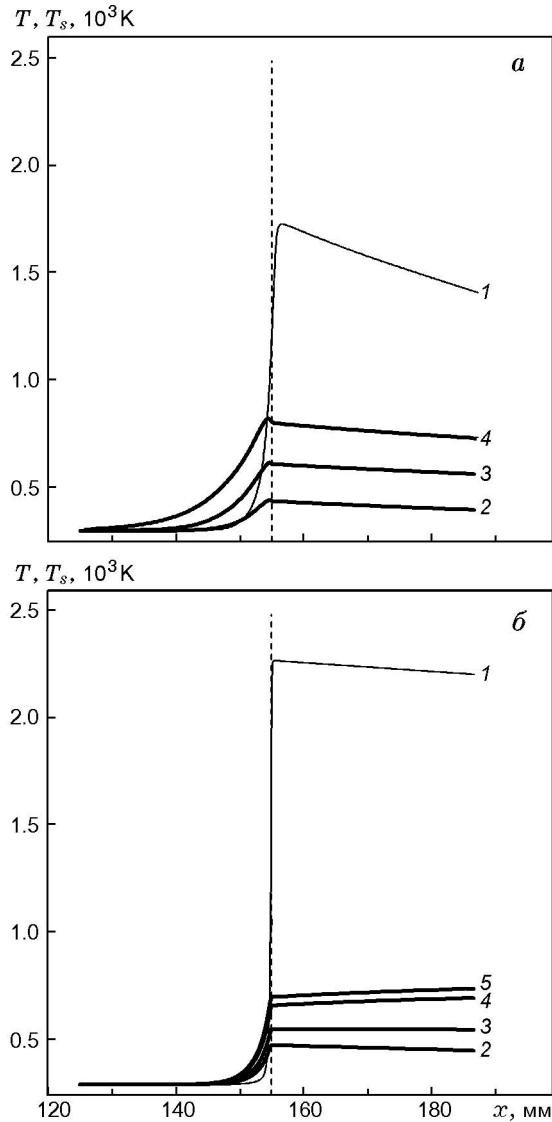


Рис. 10. Профили температуры газа ( $T$ ) и твердой фазы ( $T_s$ ) в различные моменты времени  $t$  для разных скоростей газа  $u_0$ :  
 а —  $u_0 = 0.04$  м/с: 1 —  $T$  ( $t = 1$  с); 2-4 —  $T_s$  ( $t = 1, 4$  и 25 мин соответственно); б —  $u_0 = 0.32$  м/с: 1 —  $T$  ( $t = 1$  с); 2-5 —  $T_s$  ( $t = 1, 2, 6$  и 15 мин соответственно); штриховая линия — правая граница пористого блока

засыпных пористых сред или перфорированные пластины, которые пламя должно преодолеть прежде, чем войдет в пористый блок. Такие прослойки могут быть, кроме того, элементами конструкции огнепреградителя. Так, например, в испытываемом огнепреградителе перед пористым блоком устанавливалась метал-

лическая сетка, назначением которой было предотвращение разбрасывания засыпки.

Рис. 11, 12 иллюстрируют влияние некоторых прослоек на время входа пламени в пористый блок при скорости газа 0.3 м/с. При моделировании учитывалось влияние стенок огнепреградителя. Толщина прослойки принята равной 5 мм, ее координаты  $150 < x < 155$  мм (положение прослойки показано штриховыми линиями). Кривая 1 на рис. 11 — траектория входа и распространения пламени в обычном пористом блоке с краевым эффектом, моделируемым как прослойка пористой среды с теми же параметрами, что основной блок, но с  $\varepsilon_g = 0.55$ . Видно, что время входа составляет около 10 мин. Рис. 12, б и кривая 2 на рис. 11 демонстрируют влияние прослойки, моделирующей металлическую сетку, установленную в реальном огнепреградителе. Размер ячеек сетки 3 мм. Пористость, оцененная для этой сетки, составила  $\varepsilon_g = 0.8$ , плотность и теплоемкость взяты как для стали, а теплопроводность — как для основного пористого бло-

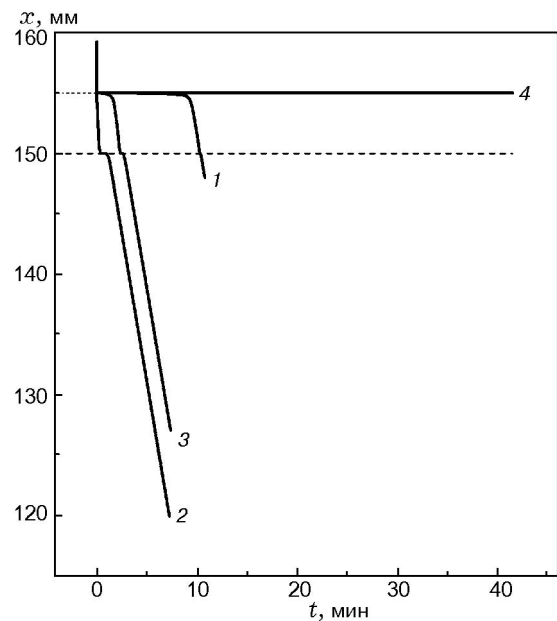


Рис. 11. Траектории распространения пламени при прогорании огнепреградителя с разными прослойками на правой границе пористого блока:

1 — без прослойки, 2, 3 — металлическая сетка,  $\varepsilon_g = 0.8$  и  $0.7$  соответственно, 4 — перфорированная металлическая пластина,  $\varepsilon_g = 0.2$ ;  $u_0 = 0.3$  м/с; штриховые линии — положение прослойки

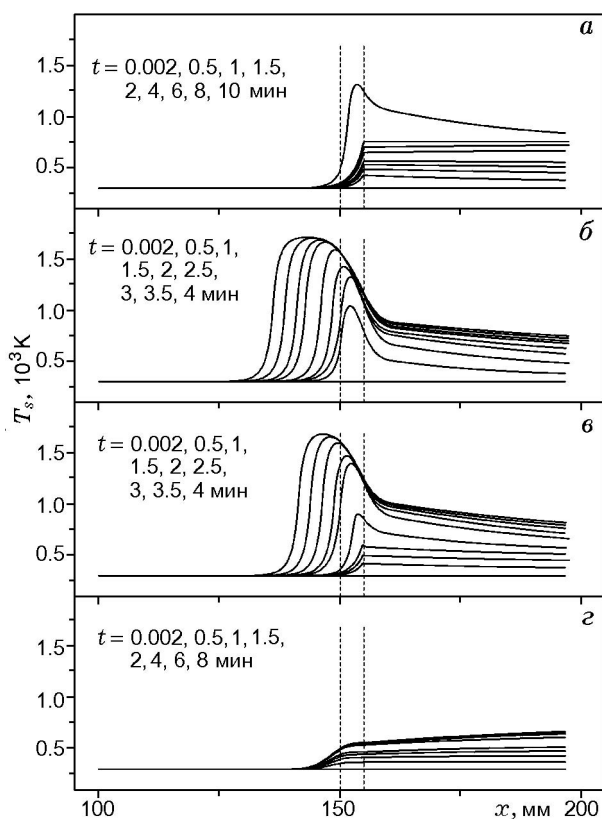


Рис. 12. Профили температуры твердой фазы в начальной стадии прогорания огнепреградителя с разными прослойками:

*a* — без прослойки, *б, в* — металлическая сетка,  $\varepsilon_g = 0.8$  и  $0.7$  соответственно, *г* — перфорированная металлическая пластина,  $\varepsilon_g = 0.2$ ;  $u_0 = 0.3$  м/с; штриховые линии — положение прослойки; моменты времени соответствуют последовательности кривых снизу вверх

ка. Из рис. 11 видно, что пламя проскакивает сетку, практически не замечая ее, и останавливается на границе пористого блока, расположенного при  $x < 150$  мм. При этом сетка, как видно из рис. 12, *б*, начинает очень быстро разогреваться, так как через нее текут горячие продукты сгорания (большой тепловой напор), а тепловая нагрузка сетки  $c_s \rho_s (1 - \varepsilon_g)$  невелика из-за большой пористости. Прогрев поверхности пористого блока в этом случае происходит не за счет теплообмена со слабо прогретым газом в поровом пространстве, как на рис. 12, *а*, а за счет гораздо более эффективного механизма кондуктивного теплообмена с сильно разогретой сеткой. Поэтому время входа пламени в пористый блок сокращается примерно до 1 мин. Кривая 3 на рис. 11 показывает влияние такой же сетки, но с  $\varepsilon_g = 0.7$ . В этом случае пламя

уже «замечает» сетку и стабилизируется сначала на ней. Однако быстро, за 2 мин, нагревает ее и входит под сетку, при этом скорость прогрева сетки резко возрастает (рис. 12, *в*). Второй раз пламя стабилизируется на границе сетки с пористым блоком. Благодаря быстрому прогреву поверхности пористого блока за счет все того же эффективного механизма кондуктивного теплообмена с разогретой сеткой вход пламени в пористый блок осуществляется менее чем за 1 мин (рис. 11, кривая 3). Наконец, моделировалось влияние прослойки, представляющей собой перфорированную стальную пластину с отверстиями диаметром 2.5 мм и пористостью  $\varepsilon_g = 0.4$ . В такую пластину пламя не смогло войти даже за 40 мин (рис. 11, кривая 4; рис. 12, *г*).

Проведенное моделирование показало, что введение различных прослоек перед пористым блоком позволило варьировать время входа в пористый блок от 1 до более чем 40 мин. Нетривиально, что добавка дополнительной границы, что, казалось бы, требует дополнительного времени для адаптации волны горения к новым условиям, может приводить не к увеличению, а к значительному уменьшению времени прогорания за счет включения более эффективных механизмов прогрева. Заметим, что результаты моделирования качественно подтверждаются экспериментом. Так, при испытаниях огнепреградителя было обнаружено, что установка металлической сетки перед пористым блоком уменьшает время входа в пористый блок на 7–8 мин. Моделирование также показало, что введение сетки уменьшило время входа с 9 до 1 мин (рис. 11, кривые 1, 2). Таким образом, целенаправленное введение прослоек с определенными свойствами в конструкцию огнепреградителя может быть эффективным механизмом повышения надежности огнепреградителя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное математическое моделирование процесса прогорания огнепреградителей не претендует на количественное описание экспериментальных результатов, прежде всего потому, что оперирует не реальной кинетикой химических реакций в пламени, а эффективной одностадийной реакцией первого порядка. Кроме того, существуют трудности с оценкой термодинамических характеристик пористой среды, например теплопроводности, которая явля-

ется сложной функцией целого ряда параметров, таких как размер и форма зерна, пористость, скорость фильтрации и характер течения газа в пористой среде, оптические свойства материала. С другой стороны, результаты работы позволили выявить физические механизмы процесса прогорания и установить некоторые закономерности:

- 1) экспериментально и теоретически показано, что процесс прогорания состоит из двух стадий — нестационарной стадии формирования волны горения в пористом блоке огнепреградителя и стадии стационарного распространения по нему; характерные времена двух стадий соизмеримы;
- 2) формирование волны горения в огнепреградителе, так же как и распространение по нему, возможно в ограниченном диапазоне скоростей газа; за счет стадии формирования волны горения параметрическая область прогорания огнепреградителя может быть существенно сужена;
- 3) зависимости времени входа пламени в пористый блок и времени распространения по нему от скорости газа являются немонотонными, имеющими минимум;
- 4) время входа пламени в огнепреграждающий элемент можно менять в широком диапазоне за счет тонких прослоек с параметрами, отличными от параметров основного блока;
- 5) наличие теплового контакта огнепреграждающего элемента с корпусом огнепреградителя, прогреваемым продуктами сгорания, увеличивает время входа при малых скоростях газа и уменьшает — при больших.

Заметим, что все результаты получены для огнепреградителей засыпного типа. В случае огнепреградителей канального типа определяющие параметры процесса оказываются в совершенно иной параметрической области. Так, например, такой важный для формирования и распространения волны горения параметр, как теплопроводность пористой среды, в случае канальных огнепреградителей может быть на  $1 \div 2$  порядка величины больше, чем для засыпных. Многообразие физических механизмов, задействованных при фильтрационном

горении газа, приводит к немонотонным зависимостям характеристик горения от параметров процесса. Поэтому в иной параметрической области, к которой относятся огнепреградители канального типа, закономерности прогорания могут отличаться.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Зельдович Я. Б.** Теория предела распространения тихого пламени // Журнал эксперим. и теор. 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. **Babkin V. S., Korzhavin A. A., Bunev V. A., Bradley D.** Problems of porous flame-arresters: Effects of Lewis numbers // 11th Intern. Symp. «Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries», Paper Full Texts Section D / Н. J. Pasman, J. Škarka, F. Babinec (Eds). Praha: PCHE-PetroChemEng, 2004. P. 4395–4400.
5. **Babkin V. S.** The problems of porous flame arresters // Prevention of Hazardous Fires and Explosions / V. E. Zarko et al. (Eds). Kluwer Academic Publ., 1999. P. 199–213.
6. **Babkin V. S.** Some problems of critical diameter // Proc. of the Second Seminar on Fire and Explosion Hazards / V. Molkov (Ed.). Moscow, 1997. P. 113–125.
7. **Розловский А. И.** Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М.: Химия, 1980.
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. **Потытняков С. И., Лаевский Ю. М., Бабкин В. С.** Влияние теплопотерь на распространение стационарных волн при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 1. С. 19–26.
11. **Zhdanok S. A., Dobrego K. V., Foutko S. I.** Effect of porous media transparency on spherical and cylindrical filtrational combustion heaters performance // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2000. V. 43. P. 3469–3480.
12. **Доброго К. В., Жданок С. А.** Физика фильтрационного горения газов. Минск: НАН Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, 2002.

13. Zhdanok S., Kennedy L. A., Koester G. Superadiabatic combustion of methane air mixtures under filtration in a packed bed // *Combust. Flame*. 1995. V. 100. P. 221–231.
14. **Лаевский Ю. М., Бабкин В. С.** Фильтрационное горение газа // *Распространение тепловых волн в гетерогенных средах* / Ред. Ю. Ш. Матрос. Новосибирск: Наука, 1988.
15. **Добрего К. В., Жданок С. А.** Инженерный расчет характеристик фильтрационного горения на основе двухтемпературной одномерной модели // *Инж.-физ. журн.* 1998. Т. 71, № 3. С. 424–432.
16. **Минаев С. С., Потытняков С. И., Бабкин В. С.** О неустойчивости фронта пламени при фильтрационном горении газов // *Физика горения и взрыва*. 1994. Т. 30, № 3. С. 49–54.
17. **Минаев С. С., Потытняков С. И., Бабкин В. С.** Тепловая устойчивость искривленного газового пламени в пористых средах // *Физика горения и взрыва*. 1994. Т. 30, № 6. С. 39–42.
18. **Какуткина Н. А.** Некоторые аспекты устойчивости горения газа в пористых средах // *Физика горения и взрыва*. 2005. Т. 41, № 4. С. 39–49.
19. НПБ 254-99. Огнепреградители и искрогасители. Общие технические требования. Методы испытаний. М.: МВД РФ, Гос. противопожарная служба, 1999.
20. **Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А.** Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1979.
21. **Какуткина Н. А., Коржавин А. А., Мбарова М.** Особенности фильтрационного горения водородо-, пропано- и метановоздушных смесей в инертных пористых средах // *Физика горения и взрыва*. 2006. Т. 42, № 4. С. 8–20.
22. **Гликин М. А.** Эффективность и взрывобезопасность процессов химической технологии. 2000. ISBN-966-95741-1-0.
23. **Какуткина Н. А., Бабкин В. С.** Характеристики стационарных сферических волн горения газа в инертных пористых средах // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34, № 2. С. 9–19.
24. **Таблицы физических величин: Справочник** / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
25. **Лыков А. В.** Тепломассообмен: Справочник. М.: Энергия, 1978.

*Поступила в редакцию 11/IV 2006 г.*

---