

ranges) at value of parameter  $\gamma = 2\pi/L\tau = 1000$  rad/m and a varied parameter  $\beta$ . Range of rotation of fiber circuit in space during modeling made – 0–90 deg with an increment of 9 deg,  $\beta$  increment – 50 rad/m.

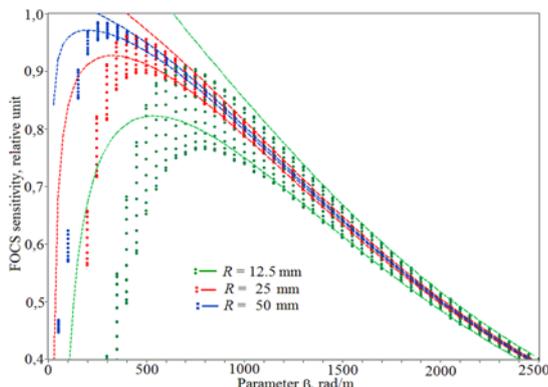


Figure 2 – FOCS sensitivity with *spun* fiber

When the condition of  $\beta^2 > 20\gamma\beta R$  is met the results of modeling and calculation for formulas almost meet. Modeling results correlate with the results of experiments on a model sample of FOCS well [4].

**Conclusions.** Simple formulas for the description of sensitivity of the polarimetric fiber optic cur-

rent sensors are presented. Estimates of limit of their applicability are given.

#### References

1. Ulrich R., Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibers // Appl. Opt. – 1979. – Vol. 18. – № 13. – P. 2241–2251.
2. Nguyen T.X., Ely J.J., Szatkovski G.N. A fiber-optic current sensor for lighting measurement applications // Proc. SPIE 9480, Fiber optic Sensors and Applications XI (13 may 2015).
3. Lovchii I.L. Modelling the parameters of a polarimetric ac magneto-optical sensor with a sensitive loop made from a twist-type lightguide // J. Opt. Technol. – 2010. – Vol. 77. – № 6. – P. 376–386.
4. Lovchii I.L. Numerical modelling and investigation of a polarimetric current transducer with a spun-type lightguide // J. Opt. Technol. – 2010. – Vol. 77. – № 12. – P. 755–761.
5. Rashleigh S.C., Ulrich R. Magneto-optic current sensing with birefringent fibers // Appl. Phys. Lett. – 1979. – Vol. 34. – № 11. – P. 768–770.
6. Smith A.M. Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber // Appl. Opt. – 1980. – Vol. 19. – № 15. – P. 2606–2611.
7. Ulrich R., Rashleigh S.C., Eickhoff W. Bending-induced birefringence in single mode fibers // Opt. Lett. – 1980. – Vol. 5. – P. 273–275.

УДК 614.842

### ГЕТЕРОГЕННОЕ ИНГИБИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ ПЛАМЕНИ ЧАСТИЦАМИ ОГНЕТУШАЩЕГО ПОРОШКА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ Кицак А.И.

Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем  
чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь  
Минск, Республика Беларусь

**Введение.** Тушение пожара огнетушащим порошком обеспечивается двумя основными процессами: передачей тепла частицам порошка посредством их нагрева и химическим ингибированием продуктов горения либо поверхностью частиц порошка (гетерогенное ингибирование), либо веществами, образующимися при их испарении или разложении в результате поглощения тепла (гомогенное ингибирование).

Анализ схем тушения пожара порошками с применением струйных пневматических устройств доставки частиц порошка в зону горения показывает, что скорость частиц порошка, в газообразном горячем слое может достигать нескольких метров в секунду. [1]. При данных скоростях длительность  $t_{\text{int}}$  взаимодействия частиц порошка с активными центрами пламени в этой зоне составляет  $\sim 10^{-4}$ – $10^{-5}$  с [1]. Примерно такого же порядка являются времена длительности реакции ингибирования активных центров пламени частицами порошка и их нагрева. В связи с этим можно предполо-

жить, что процесс тушения пожара огнетушащим порошком с применением установок пожаротушения со струйной подачей порошка во фронт пламени часто происходит в нестационарных условиях.

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в нестационарных условиях взаимодействия.

**Физическая модель тушения пожара.** Рассмотрим схему тушения пожара струей огнетушащего порошка, подаваемой в зону горения по направлению к фронту пламени.

В некоторый момент времени в этой зоне, которая состоит из областей подогрева горячей среды, реакции горения и собственно пламени (светящейся зоны), сформируется дисперсный слой частиц порошка. Этот слой за промежуток времени  $t_{\text{вз}} = l_{\text{вз}}/v$ , зависящий от скорости частиц порошка  $v$  и эффективной толщины зоны реакции  $l_{\text{вз}}$ , покинет ее. Частицы слоя безвоз-

вратно покидают реакционную область, если горючим веществом является горючий газ (ГГ) или легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ). Когда осуществляется тушение твердого горючего материала (ТГМ), часть частиц порошка может осесть в обуглившимся зазорах материала, а часть, обладающая достаточной кинетической энергией, может отразиться от материала и снова попасть в реакционную область горения или покинуть ее.

За время пребывания частиц порошка в реакционной области они нагреваются до определенной температуры, в соответствии с их теплофизическим и дисперсным характеристикам, и адсорбируют на своей поверхности с некоторой вероятностью, зависящей от физико-химических характеристик материала и состояния их поверхности, активные центры пламени, состоящие из свободных атомов и радикалов горючего вещества.

Адсорбированные поверхностью частиц порошка активные центры пламени рекомбинируют с другими активными частицами пламени, достигших этой поверхности. В результате формируются неактивные частицы (молекулы) из родственных или неродственных атомов или радикалов продуктов горения. Процесс гетерогенного ингибирования приводит к обрыву цепей горения и в конечном результате к снижению тепловыделения.

Реакция гетерогенного ингибирования активных центров пламени осуществляется в каналах слоя, образованных частицами огнетушащего порошка.

**Результаты и обсуждение.** В предположении нестационарности процесса гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка получены зависимости скоростей  $dC/dt$  ( $C$  – концентрация активных частиц, адсорбированных поверхностью частиц слоя огнетушащего порошка) реакции ингибирования в кинетической и диффузионной областях ее протекания от дисперсных характеристик частиц порошка, их динамических параметров и кинетических параметров активных центров пламени.

В кинетической области скорость реакции в заданный момент времени  $t$  равна:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3}{2\Phi d} \gamma u V_0 C_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right) \right), \quad (1)$$

где  $\gamma$  – вероятность адсорбции активных частиц поверхностью частицы порошка;  $u$  – средняя тепловая скорость активной частицы, м/с;  $\Phi$  – фактор формы частиц (для шарообразных частиц  $\Phi = 1$ );  $V_0$  – объем, занимаемый частицами порошка в слое, м<sup>3</sup>;  $C_0$  – концентрация активных частиц в объеме горючего газа, кг/м<sup>3</sup>;

$d$  – диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка, м;  $\Delta\tau$  – эффективное время длительности реакции, равное:

$$\Delta\tau = \frac{1}{9} \frac{d^2}{\text{Nu}D} \frac{\varepsilon^2 \Phi^2}{(1-\varepsilon)^2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon = (V - V_0)/V$  – порозность слоя;  $V$  – общий объем, занимаемый слоем частиц порошка, м<sup>3</sup>;  $\text{Nu}$  – критерий Нуссельта для процесса диффузии;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;

В диффузионной области:

$$\frac{dC}{dt} = 9 \frac{\text{Nu}D}{d^2} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon \Phi^2} \times V_0 C_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right) \right), \quad (3)$$

где  $\Delta\tau$  равно:

$$\Delta\tau = \frac{1}{9} \frac{d^2}{D} \frac{\varepsilon^2 \Phi^2}{(1-\varepsilon)^2}. \quad (4)$$

Из выражений (1), (3) следует, что скорость реакции ингибирования определяется не только дисперсными характеристиками огнетушащего порошка и кинетическими параметрами активных центров, но и условиями тушения. Процесс обрыва цепей реакции горения частицами огнетушащего порошка происходит тем эффективнее, чем больше время взаимодействия  $t_{\text{вз}} = l_{\text{вз}}/v$ , где  $l_{\text{вз}}$  – эффективная (зависящая от наклона оси струи порошка) длина взаимодействия частиц порошка с активными частицами в зоне реакции, м;  $v$  – скорость частиц в реакционной зоне, м/с) их с активными центрами пламени и, чем меньше эффективная длительность реакции ингибирования  $\Delta\tau$ .

Время взаимодействия  $t_{\text{вз}}$  тем больше, чем больше эффективная длина взаимодействия  $l_{\text{вз}}$  частиц порошка с активными центрами пламени и, чем меньше их скорость  $v$  в зоне реакции.

Эффективное время длительности реакции тем меньше, чем меньше размер частиц огнетушащего порошка и чем меньше их порозность.

Зависимость эффективности гетерогенного ингибирования активных центров пламени от эффективной длины взаимодействия их с частицами огнетушащего порошка подтверждается результатами экспериментальной работы [2], в которой наблюдалось более быстрое тушение пламени горючей жидкости огнетушащим порошком, когда струя порошка направлялась в зону горения под углом к нормали поверхности горения. Наклонная подача струи огнетушащего порошка в зону горения приводила к увеличению эффективной длины взаимодействия  $l_{\text{вз}}$ , а, следовательно, и к увеличению времени взаимодействия  $t_{\text{вз}}$ .

Полученные результаты дают также более естественное объяснение известного в пожаротушении парадокса, заключающегося в увеличении удельного расхода огнетушащего порошка при повышении интенсивности подачи порошка в зону горения. Этот эффект можно объяснить увеличением скорости частиц порошка при увеличении интенсивности подачи его в зону горения и, следовательно, уменьшением эффективности тушения пожара вследствие сокращения времени пребывания частиц порошка в зоне горения.

Уменьшение эффективности тушения пожара ведет к росту времени тушения и, соответ-

ственно, увеличению удельного расхода огнетушащего порошка.

Полученные результаты позволяют оптимизировать условия и режимы подачи огнетушащего порошка в зону горения с целью достижения максимального эффекта тушения пожара.

#### Литература

1. Абдурагимов И.М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность, 2012. – Т. 21, №4. – С. 60–82.
2. Баланюк В.М. Определение эффективности тушения огнетушащим аэрозолем горючей жидкости на открытом пространстве // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2015. – С. 4–10.