

ЧИСЛЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МЕТОДА ИСПЫТАНИЯ ОГNETУШАЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОРОШКОВ

А. А. Чернов^{1,2,a}, А. Г. Шмаков¹, О. П. Коробейничев¹,
Т. А. Большова¹, В. И. Татаренко², Н. В. Петрова^{2,3}

¹Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

^achernov@kinetics.nsc.ru

Совершенствование средств пожаротушения и методов измерения их эффективности является важной задачей в области пожарной безопасности. В работе представлены результаты экспериментальных измерений минимальной огнетушащей концентрации порошковых смесей, которые могут быть применены в качестве эффективных взрыволокализирующих заслонов. Измерения минимальной огнетушащей концентрации исследуемых порошков проводились с помощью лабораторного метода с импульсной их подачей в микроочаг пожара класса В с помощью сжатого воздуха. С целью обоснования и оценки возможных ошибок указанного лабораторного метода измерения огнетушащей эффективности порошков выполнено численное 3D-моделирование взаимодействия многофазного потока с модельным очагом горения. Анализ результатов численного моделирования показал, что для применённого лабораторного метода практически вся порция исследуемого порошка поступает в зону горения. Также результаты численных расчётов показали, что в указанных экспериментальных условиях отсутствует заметное влияние размера частиц порошка на их потери в окружающее пламя пространство. Таким образом, эти результаты позволили обосновать применение указанного лабораторного метода для сравнительной оценки огнетушащих порошков с широким диапазоном дисперсности. Использование указанного лабораторного метода оценки эффективности огнетушащего порошка позволило разработать для взрыволокализирующего заслона оптимальный порошковый состав, включающий в качестве основного компонента инертные минеральные частицы и добавку химически активного калийсодержащего ингибитора горения.

Ключевые слова: пожарная безопасность, порошковые огнетушащие вещества, минимальная огнетушащая концентрация, жёлтая кровяная соль, пожаротушение.

Введение

Пожарная защита производственных процессов, помещений и зданий является важной составляющей экономического развития страны. Ещё большую актуальность она приобретает для угольных шахт. К числу эффективных средств пожаротушения относятся огнетушащие порошки. Они обладают высокой огнетушащей способностью, универсальностью, возможностью применения в условиях арктического климата. В то же время огнетушащие порошковые составы на фосфорно-аммонийной и хлоридной основе могут быть использованы в качестве сырья для

производства удобрений, а порошок на бикарбонатной основе может быть использован в качестве компонента для производства бытовых чистящих средств или для нейтрализации кислых сточных вод, что говорит о широких возможностях экономически выгодной утилизации огнетушащих порошков после потери их функциональных характеристик. Согласно исследованиям, порошки CaCO_3 , SiO_2 , NaHCO_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NaCl , порошки диатомита, боксита и другие используются для предотвращения взрывов метана в шахтах [1–12].

Успешное тушение пожаров порошками во многом зависит от их огнетушащих свойств. Исследованию подавления пламени различными ингибиторами посвящено огромное количество работ. Одной из наиболее важных характеристик огнетушащих веществ является минимальная огнетушащая способность. Эффективность действия огнетушащих веществ может различаться более, чем в 1000 раз [13]. Для порошковых огнетушителей применяют смесь инертного порошка с добавками различных химически активных ингибиторов в виде солей металлов, соединений фосфора и хлора. В [13–17] в модельных условиях было исследовано значительное число ингибиторов такого типа и их смесей.

Из большого числа различных способов определения минимальной огнетушащей эффективности порошков наиболее близким к реальным условиям пожара является лабораторный метод [18–23]. Этот же метод, но несколько в большем масштабе применяется при сертификации переносных огнетушителей [24]. В этом методе определяют огнетушащую способность испытываемого порошка в зависимости от интенсивности его подачи в очаг горения, представляющий собой круглый резервуар с горючей жидкостью. При воздействии огнетушащего порошка происходит снижение температуры очага пожара. При достаточном количестве порошка может возникнуть эффект огнепреграждения из-за отсутствия доступа воздуха к поверхностному горящему слою. На этом принципе основано тушение пожара водой и пеной всех типов. Механизм воздействия огнетушащих порошков на очаг пожара зависит от размера и химического состава частиц. Механизм тушения пожаров класса А и В следует считать комбинированным, так как в них происходят следующие процессы [25–27]:

- 1) поглощение тепла при нагревании, плавлении и разложении частиц;
- 2) ингибирование/рекомбинация атомов и радикалов на поверхности частиц;
- 3) ингибирование/рекомбинация атомов и радикалов продуктами разложения частиц;
- 4) разбавление горючей смеси малогорючими и негорючими веществами, образующимися при разложении частиц.

Эффективность огнетушащих порошковых составов, определяемая комплексом их свойств, является важной составляющей в обеспечении пожаро- и взрывобезопасности в быту и на производстве. Разработка новых и определение ключевых характеристик существующих средств пожаротушения во многом зависит от дизайна лабораторных установок для оценки огнетушащей эффективности порошковых составов.

Цель работы заключалась в комплексном исследовании воздействия порошковых составов на основе смеси инертных частиц и химически активных ингибиторов на микроочаг пожара класса В. Была измерена минимальная огнетушащая концентрация исследуемых порошковых составов. Выполнен численный расчёт динамики движения частиц порошкового состава в окрестности модельного очага пожара, в результате которого показано влияние размера частиц порошка на фронт пламени.

1. Экспериментальная установка

Для сравнительной оценки эффективности огнетушащих порошков используется лабораторный метод, предложенный в [18–23]. В лабораторной установке подача порошковой смеси в микроочаг пожара класса В с эффективной площадью горения $6,36 \text{ см}^2$ производится в импульсном режиме. Микроочаг пожара имеет диаметр 9 см. При проведении измерений через форсунку с бункером и находящимся в нём порошком подают порцию воздуха объёмом 1 литр за время $10 \pm 0.01 \text{ с}$, в результате чего создаётся облако частиц общей массой от 0.2 до 1 г, что соответствует их концентрации на выходе из сопла форсунки от 200 до 1000 г/м^3 . На рис. 1 показаны мгновенные фотографии процесса тушения микроочага пожара. Облако частиц огнетушащей порошковой смеси направляется на диффузионный факел пламени бензина марки А92. За время менее 1 секунды наблюдается его погасание. Масса бункера с огнетушащей порошковой смесью измеряется до и после продувки воздухом. Таким образом оценивается полнота выноса порции порошковой смеси из форсунки и контейнера, которая используется для расчёта концентрации порошка в окрестности микроочага пожара.



Рис. 1. Последовательные фотографии процесса тушения микроочага пожара класса В

2. Методика численного моделирования

Для расчёта взаимодействия многофазного потока частиц порошка и воздуха с очагом пламени использовался пакет программ Ansys CFX на основе стационарной модели дискретной фазы лагранжевых частиц. Эффект влияния частиц на газовую фазу не учитывался. Частицы порошка вводятся в газовую фазу с помощью точечного источника с углом распыла 30° (рис. 2, а). Расчётная область имела цилиндрическую форму, на верхней границе которой расположена форсунка, а на дне — микроочаг пожара (рис. 2, б). Вид области, моделирующей микроочаг пожара, представлен на рис. 3. Геометрические размеры области микропожара соответствуют экспериментальным: внешний диаметр — 10 см, внутренний — 9 см, высота — 1 см. Использована структурированная расчётная сетка со сгущением к оси с общим количеством ячеек 1.64 млн. Минимальный размер ячейки составлял $5 \times 10^{-4} \text{ м}$.

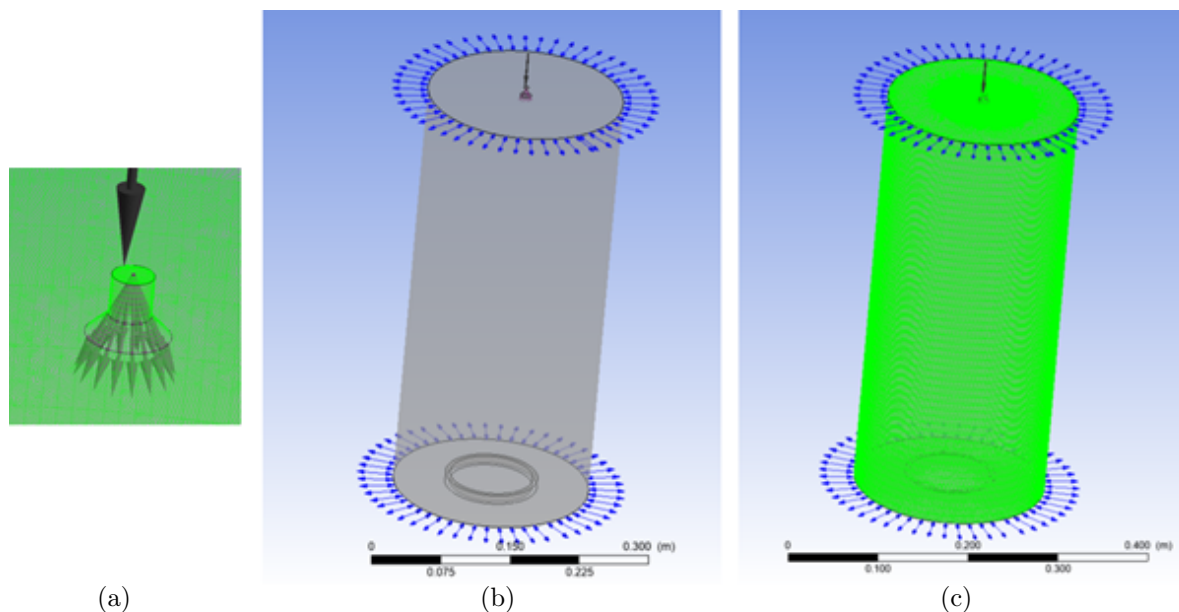


Рис. 2. Схема форсунки с направлением впрыска частиц огнетушащего порошка (а), расположение форсунки относительно очага микропожара (б), расчётная сетка (с)

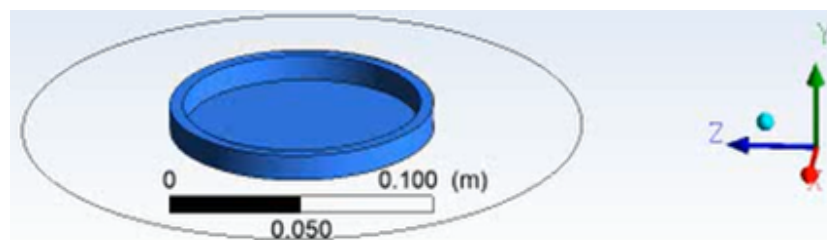


Рис. 3. Геометрия микроочага пожара

В качестве краевых условий на верхней границе задан расход воздуха 1 л/с и его температура 300 К. Массовый расход частиц равен 0.01 г/с, частицы имели одинаковый размер, который изменялся от 1 до 40 мкм. Частицы порошка переносятся к микроочагу пожара потоком воздуха. Боковые поверхности цилиндра предполагаются проницаемыми, и через них многофазный поток может покидать расчётную область. Нижняя граница вне области пожара является стенкой с температурой 300 К, что допустимо, поскольку расчёт ведётся на интервале времени 1 с. Этот интервал времени достаточен для тушения микроочага пожара в эксперименте. На данном этапе взаимодействие частиц порошка с пламенем и процесс тушения не моделируются, поскольку основной задачей численных расчётов являлась оценка скорости движения частиц порошка и их концентрации над поверхностью очага пожара.

3. Результаты и обсуждение

С помощью использованного лабораторного метода была исследована огнетушащая эффективность порошка известняка, близкого по химическому составу к чистому карбонату кальция, который широко применяется в угольных шахтах в качестве взрывоподавляющего сланцевого заслона. Был также изучен эффект добавки к порошку химически активного ингибитора горения — жёлтой кровяной соли $K_4[Fe(CN)_6]$. Полученные результаты позволили определить наиболее оптимальный состав смеси порошка известняка и жёлтой кровяной соли [28]. Результаты оценки минимальной удельной огнетушащей концентрации смесей разного состава в сравнении с нормативным значением [24] представлены на рис. 4. Наиболее эффективным является огнетушащий порошок с минимальным удельным расходом.

Необходимый для тушения микроочага пожара удельный расход известняка, который используется в сланцевом заслоне, всего на 10 % больше, чем требуется в [24]. Тем не менее при указанных расходах порошок известняка не способен потушить пожар класса 55В при реальных испытаниях. Как видно из рис. 4, добавление химически активного ингибитора (жёлтой кровяной соли) к порошку известняка приводит к значительному увеличению эффективности порошковой смеси. Увеличение массовой доли ингибитора в порошковой смеси способствует уменьшению её удельного расхода, причём компоненты данной порошковой смеси проявляют взаимный синергический эффект. В эксперименте после погасания пламени на поверхности жидкого топлива остаётся некоторое количество огнетушащего порошка, что может быть связано с его вторичным поступлением из окружающего микроочага пожара воздушно-порошкового облака.

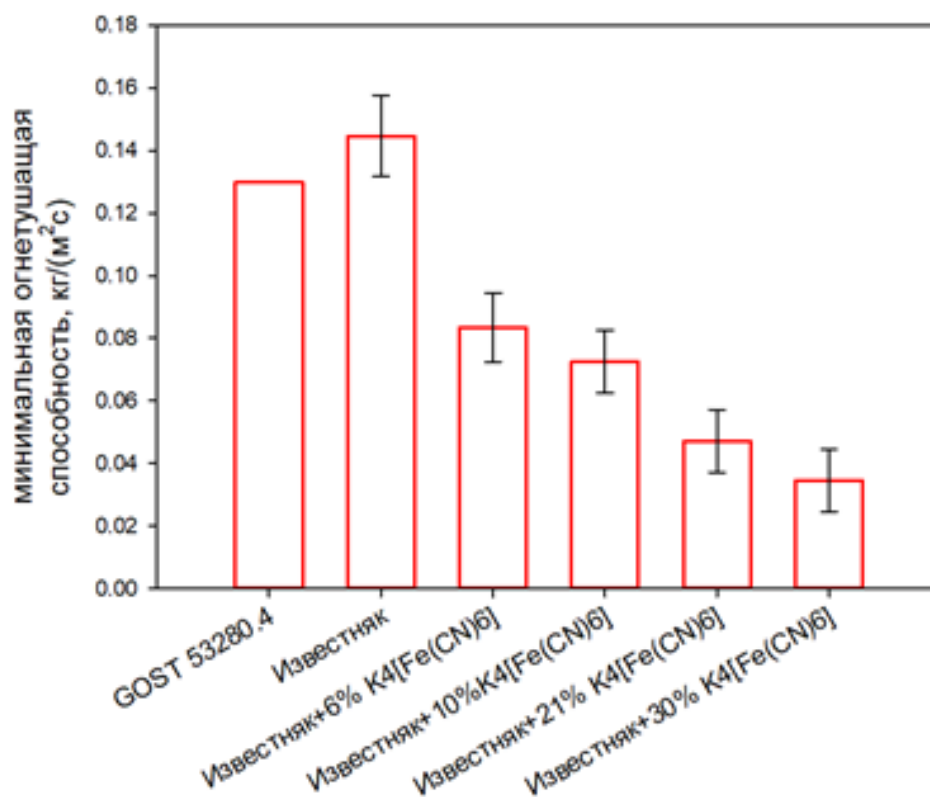


Рис. 4. Результаты измерения минимального удельного расхода огнетушащих порошков разного состава в сравнении с нормативным значением

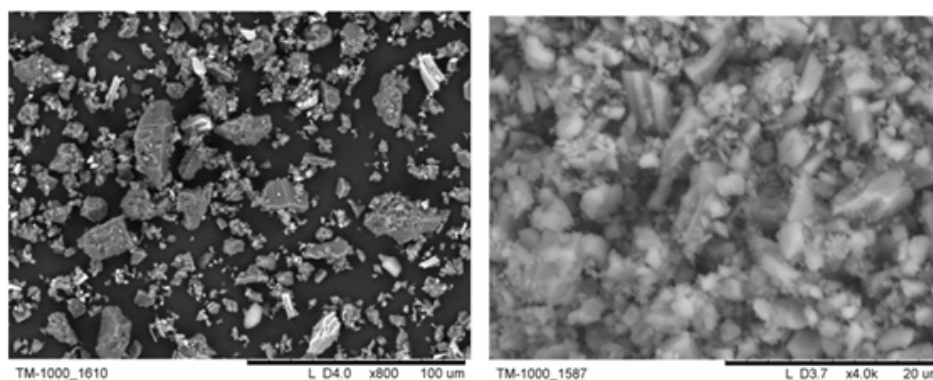


Рис. 5. Фотографии порошковой смеси из известняка и K₄[Fe(CN)₆], сделанные с помощью электронного микроскопа

Изученная в эксперименте порошковая смесь состояла из частиц разного размера. На рис. 5 представлены фотографии, сделанные с помощью электронного микроскопа, которые показывают, что частицы имеют размер от 5 до 40 мкм. В численном моделировании исследованы монодисперсные смеси сферических частиц с диаметрами 5, 10, 20 и 40 мкм.

На рис. 6, а представлено полученное в расчёте поле скорости и линии тока воздуха. На рис. 6, б–е показаны скорости частиц разных размеров на фоне поля температуры. Пламя над микроочагом пожара растянуто и прижато к поверхности горячей жидкости. Максимальная температура достигает 1600 К. На верхней границе частицы порошка имеют скорость 18 м/с. Из-за расширения в радиальном направлении струи и торможения в воздушной среде скорость частиц падает по мере приближения к очагу пожара. Мелкие частицы заметно быстрее теряют скорость по сравнению с крупными. После достижения равновесия воздух и частицы имеют скорость 2 м/с. Непосредственно вблизи поверхности микроочага пожара многофазный поток меняет направление в сторону боковой поверхности. Результаты расчёта показывают, что частицы порошка практически не проходят через фронт пламени и не осаждаются на поверхности жидкости, т. е. огнепреградительный эффект не наблюдается в данной постановке численного эксперимента.

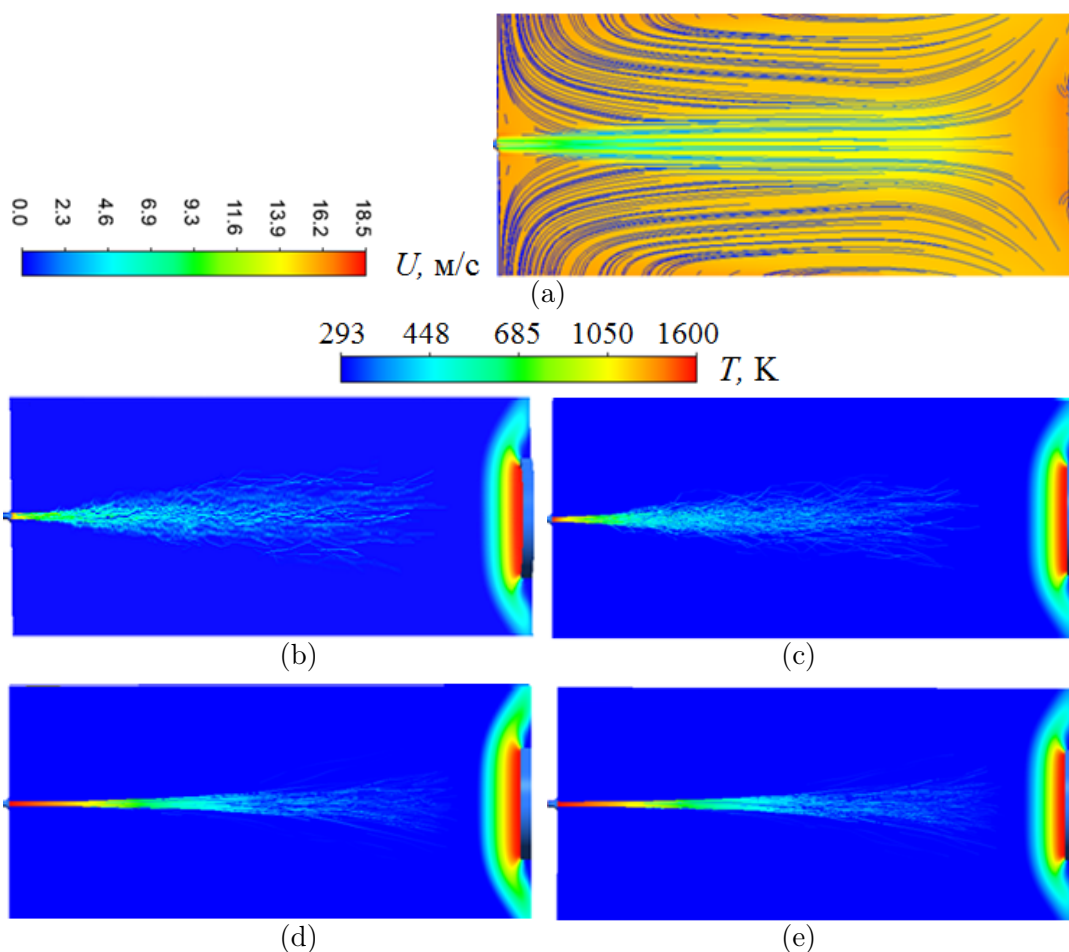


Рис. 6. Результаты численного расчёта: поле скоростей и линии тока воздуха (а), треки частиц и поле температуры для частиц размером 5 (б), 10 (с), 20 (д) и 40 мкм (е)

В работе [29] экспериментально и теоретически было показано, что на высоте 10 см над поверхностью горящего жидкого топлива восходящий поток имеет скорость около 1 м/с при тепловой мощности пламени более 14 кВт. На рис. 7 представлены результаты расчёта векторного поля скоростей, из которых видно, что

скорость конвективного подъёма продуктов сгорания также равна 1 м/с. Рис. 7 показывает, что в области столкновения потоков топлива и воздуха наблюдается растяжение пламени.

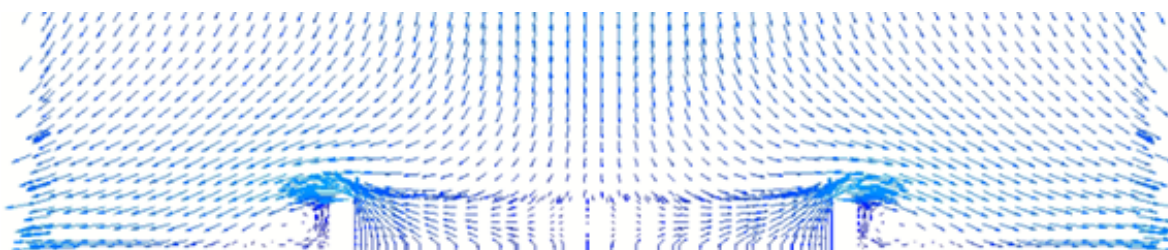


Рис. 7. Расчётные векторы скорости над микроочагом пожара

Микроочаг пожара имеет круглую форму, что обеспечивает симметрию относительно вертикальной оси. На рис. 8 представлены зависимости безразмерной концентрации частиц разного диаметра над очагом от расстояния до оси. Средняя концентрация частиц относительно начальной на выходе из сопла (n_i/n_0) падает в 25 раз вблизи поверхности микроочага пожара независимо от их размера. Это связано с разбавлением струи окружающим воздухом. Таким образом, если расход частиц и воздуха составляет 1 г/с и 1 л/с соответственно, то массовая концентрация порошка при его расходе 1 г/с над микроочагом будет равна 40 г/м³. Однако рис. 6 и рис. 8 показывают, что крупные частицы диаметром 20 и 40 мкм формируют в зоне горения более компактную область, чем частицы 5 и 10 микрон.

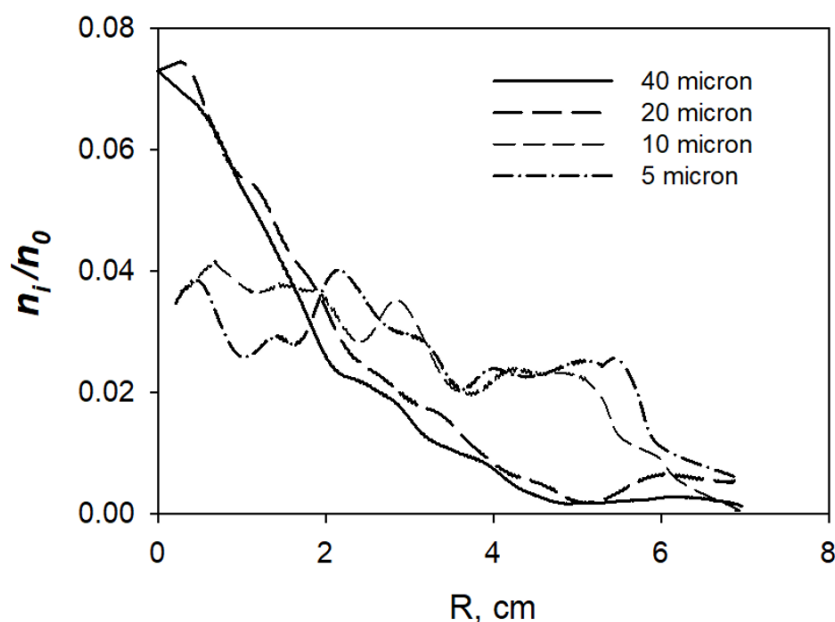


Рис. 8. Безразмерная концентрация частиц разного размера над микроочагом пожара в зависимости от расстояния до оси

Заключение

Экспериментально и численно обоснован лабораторный метод определения огнетушащей эффективности порошков, предложенный в [19; 20]. Использованный метод оценки эффективности порошковых составов при тушении микроочага пожара класса В позволил разработать оптимальную для взрыволокализирующего заслона смесь, включающую порошок известняка и химически активный калийсодержащий ингибитор горения.

Результаты экспериментов свидетельствуют о синергетическом эффекте инертного компонента (известняк) и химически активного ингибитора (жёлтая кровя-

ная соль) при тушении модельного очага пожара. Результаты численных расчётов показали, что частицы порошка не проходят через фронт пламени и не осаждаются на поверхности жидкого топлива, поэтому в данной постановке получен низкий огнепреградительный эффект. Численная модель будет расширена путём учёта других физико-химических процессов и использована в дальнейших исследованиях импульсного тушения микроочага пожара с помощью порошковой смеси.

Список литературы

1. **Laffitte P., Bouchet R.** Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders // 7th Symposium (International) on Combustion. 1959. P. 504–508.
2. **Kauffman C. W., Wolanski P.** Dust, hybrid and dusty detonations. Dynamics of shock waves, explosions and detonations // Progress of AIAA. 1984. Vol. 94. P. 221–239.
3. **Ju Y., Law C. K.** Propagation and quenching of detonation waves in particle laden mixtures // Combustion and Flame. 2002. Vol. 129. P. 356–364.
4. **Krasnyansky M.** Prevention and suppression of explosions in gas–air and dust–air mixtures using powder aerosol–inhibitor // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2006. Vol. 19. P. 729–735.
5. **Yu M., Wang T., You H., An A.** A study on the effect of thermal property of powder on the gas explosion suppression // Procedia Engineering. 2011. Vol. 26. P. 1035–1042.
6. **Zhang Y., Zhang J. L., Zhang B. M., Wang J. J.** A study on explosion suppression effect of No. 92 gasoline vapor–air mixture using ABC and BC dry powders // China Safety Science Journal. 2013. Vol. 23. P. 53–58.
7. **Luo Z., Wang T., Tian Z., Cheng F., Deng J., Zhang Y.** Experimental study on the suppression of gas explosion using the gas+solid suppressant of CO₂/ABC powder // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. Vol. 30. P. 61–67.
8. **Huang D., Wang X., Yang J.** Influence of particle size and heating rate on decomposition of BC dry chemical fire extinguishing powders // Particulate Science and Technology. 2015. Vol. 33. P. 488–493.
9. **Jiang B., Liu Z., Tang M., Yang K., Lv P., Lin B.** Active suppression of premixed methane/air explosion propagation by non-premixed suppressant with nitrogen and ABC powder in a semi-confined duct // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 29. P. 141–149.
10. **Luo Z. M., Cheng F. M., Wang T., Deng J., Shu C. M.** Suppressive effects of silicon dioxide and diatomite powder aerosols on coal mine gas explosions in highlands // Aerosol and Air Quality Research. 2016. Vol. 16. P. 21190–22128.
11. **Wang Y., Cheng Y.-S., Yu M.-G., Li Y., Cao J.-L., Zheng L.-G., Yi H.-W.** Methane explosion suppression characteristics based on the NaHCO₃/red mud composite powders with core–shell structure // Journal of Hazardous Materials. 2017. Vol. 335. P. 84–91.
12. **Zhao T., Chen X., Cheng F., Lu K., Shi X., Yu W.** Study on the synergistic inhibition mechanism of multicomponent powders on methane explosions // Powder Technology. 2023. Vol. 418. P. 118326.
13. **Babushok V., Tsang W.** Inhibitor rankings for alkane combustion // Combustion and Flame. 2000. Vol. 123. P. 488–506.
14. **Jensen D. E., Jones G. A., Mace A., Christopher H.** Inhibiting the flame by a potassium // Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions. 1979. Vol. 10. P. 2377–2385. .
15. **Pak V., Hieftje G. M.** Evaporation of particles of chlorides of alkaline metals in a flame // Spectrochimical Acta. 1985. Vol. 40. P. 209–216.

16. Шмаков А. Г., Коробейничев О. П., Шварцберг В. М., Якимов С. А., Князьков Д. А., Комаров В. Ф., Сакович Г. В. Исследование фосфорорганических, фторорганических, металлосодержащих соединений и твердотопливных газогенераторных составов с добавками фосфорсодержащих соединений в качестве эффективных пламегасителей // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 6. С. 64–73.
17. Анцупов Е. В. Синергизм и антогонизм в смесях порошковых ингибиторов в пропановоздушных пламенах // Хим. физика. 2010. Т. 29, № 1. С. 64–69.
18. Волков В. К., Вогман Л. П., Михайлов В. Г., Голев Л. Б. Лабораторная установка для исследования огнетушащей эффективности порошковых составов // Пожарная техника и тушение пожаров. Вып. 12. М. : ВНИИПО, 1974. С. 74–77.
19. Баратов А. Н., Добриков В. В., Куликов В. Н. Лабораторный метод испытания огнетушащей эффективности порошков // Горючесть веществ и химические средства пожаротушения. Вып. 5. М. : ВНИИПО, 1978. С. 83–89.
20. Баратов А. Н., Вогман Л. П. Огнетушащие порошковые составы. М. : Стройиздат, 1982. 72 с.
21. Сабинин О. Ю. Экспериментальное изучение влияния технологических свойств порошковых составов на их огнетушащую способность при импульсном способе пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17, № 6. С. 64–73.
22. Мисников О. С., Дмитриев О. В., Попов В. И. Исследование свойств огнетушащих порошков, модифицированных торфяными гидрофобными добавками // Тр. Инсторфа. 2013. Т. 8. С. 23–32.
23. Корольченко Д. А. Оценка времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в зданиях и сооружениях с учётом механизма тушения пламени веществами различной природы и степени дисперсности: дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2021.
24. ГОСТ Р 53280. 4–2009. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Ч. 4. Порошки огнетушащие общего назначения. Общие технические требования и методы испытаний.
25. Rosser W. A., Inami S. H., Wise H. The effect of metal salts on premixed hydrocarbon air flame // Combustion and Flame. 1963. Vol. 7, no. 2. P. 107–119.
26. Burke R., van Tiggelen A. Kinetics of laminar premixed methane-oxygen-nitrogen flames // Bulletin des Socits Chimiques Belges. 1965. Vol. 74, no. 9–10. P. 426–449.
27. Баратов А. Н. Горение — пожар — взрыв — безопасность. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003.
28. Шмаков А. Г., Коробейничев О. П., Шварцберг В. М., Сидельников А. А. Огнетушащий порошок многоцелевого назначения и способ его получения. Патент РФ № 2719680, дата регистрации 21.04.2020.
29. Cox G., Chittya R. Study of the deterministic properties of unbounded fire plumes // Combustion and Flame. 1980. Vol. 39. P. 191–209

Поступила в редакцию 01.12.2023.

После переработки 06.04.2024.

Сведения об авторах

Чернов Анатолий Альбертович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории кинетики процессов горения, Институт химической кинетики и горения имени В. В. Воеводского СО РАН; доцент кафедры техносферной безопасности, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия; e-mail: chernov@kinetics.nsc.ru.

Шмаков Андрей Геннадьевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией кинетики процессов горения, Институт химической кинетики и горения имени В. В. Воеводского СО РАН, Россия; e-mail: shmakov@kinetics.nsc.ru.

Коробейничев Олег Павлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории кинетики процессов горения, Институт химической кинетики и горения имени В. В. Воеводского СО РАН, Россия; e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru.

Большова Татьяна Анатольевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории кинетики процессов горения, Институт химической кинетики и горения имени В. В. Воеводского СО РАН, Россия; e-mail: bolshova@kinetics.nsc.ru.

Татаренко Валерий Иванович, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной безопасности, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия; e-mail: kaf.bgd@ssga.ru.

Петрова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Сибирский государственный университет геосистем и технологий; доцент кафедры безопасности труда Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия; e-mail: natalyavpetrova@mail.ru.

NUMERICAL JUSTIFICATION OF THE LABORATORY TECHNIQUE FOR TESTING OF FIRE-EXTINGUISHING POWDERS

A.A. Chernov^{1,2,a}, A.G. Shmakov¹, O.P. Korobeinichev¹,
T.A. Bolshova¹, V.I. Tatarenko², N.V. Petrova^{2,3}

¹*Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russia*

²*Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia*

³*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

^a*chernov@kinetics.nsc.ru*

Improvement of firefighting means and methods for measuring their effectiveness are important tasks in the field of fire safety. The paper presents the results of experimental measurements of the minimum extinguishing concentration of powder mixtures that can be applied as effective explosion-suppressing barriers. Measurements of the minimum extinguishing concentration of the investigated powders were carried out using a laboratory method with their pulsed delivery to a microfire of class B using compressed air. In order to justify and assess possible errors of the mentioned laboratory method for measuring extinguishing efficiency, numerical 3D modeling of the interaction of a multiphase flow with a model combustion focus was performed. The analysis of the numerical modeling results has shown that, for the applied laboratory method, almost the entire portion of the investigated powder enters the combustion zone. Additionally, the numerical calculations indicate that under the specified experimental conditions, the particle size of the powder has no noticeable effect on their loss into the surrounding flame space. Thus, these results justified the use of the mentioned laboratory method for the comparative evaluation of fire-extinguishing powders with a wide range of dispersity. The application of this laboratory method for assessing the effectiveness of the fire-extinguishing powder allowed for the development of an optimal powder composition for explosion suppression, incorporating inert mineral particles as the main component and an additive of a chemically active potassium-containing combustion inhibitor.

Keywords: *fire safety, powder extinguishing agents, minimum extinguishing concentration, potassium ferrocyanide, fire fighting.*

References

1. **Laffitte P., Bouchet R.** Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders. *Seventh Symposium (International) on Combustion*, 1959, pp. 504–508.
2. **Kauffman C.W., Wolanski P.** Dust, hybrid and dusty detonations. Dynamics of shock waves, explosions and detonations. *Progress of AIAA*, 1984, vol. 94, pp. 221–239.
3. **Ju Y., Law C.K.** Propagation and quenching of detonation waves in particle laden mixtures. *Combustion and Flame*, 2002, vol. 129, pp. 356–364.
4. **Krasnyansky M.** Prevention and suppression of explosions in gas-air and dust-air mixtures using powder aerosol-inhibitor. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, vol. 19, pp. 729–735.
5. **Yu M., Wang T., You H., An A.** A study on the effect of thermal property of powder on the gas explosion suppression. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 26, pp. 1035–1042.
6. **Zhang Y., Zhang J.L., Zhang B.M., Wang J.J.** A study on explosion suppression effect of no. 92 gasoline vapor-air mixture using ABC and BC dry powders. *China Safety Science Journal*, 2013, vol. 23, pp. 53–58.

7. **Luo Z., Wang T., Tian Z., Cheng F., Deng J., Zhang Y.** Experimental study on the suppression of gas explosion using the gas+solid suppressant of CO₂/ABC powder. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, vol. 30, pp. 61–67.
8. **Huang D., Wang X., Yang J.** Influence of particle size and heating rate on decomposition of BC dry chemical fire extinguishing powders. *Particulate Science and Technology*, 2015, vol. 33, pp. 488–493.
9. **Jiang B., Liu Z., Tang M., Yang K., Lv P., Lin B.** Active suppression of premixed methane/air explosion propagation by non-premixed suppressant with nitrogen and ABC powder in a semi-confined duct. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 29, pp. 141–149.
10. **Luo Z.M., Cheng F.M., Wang T., Deng J., Shu C.M.** Suppressive effects of silicon dioxide and diatomite powder aerosols on coal mine gas explosions in highlands. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, vol. 16, pp. 21190–22128.
11. **Wang Y., Cheng Y.-S., Yu M.-G., Li Y., Cao J.-L., Zheng L.-G., Yi H.-W.** Methane explosion suppression characteristics based on the NaHCO₃/red mud composite powders with core-shell structure. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, vol. 335, pp. 84–91.
12. **Zhao T., Chen X., Cheng F., Lu K., Shi X., Yu W.** Study on the synergistic inhibition mechanism of multicomponent powders on methane explosions. *Powder Technology*, 2023, vol. 418, p. 118326.
13. **Babushok V., Tsang W.** Inhibitor rankings for alkane combustion. *Combustion and Flame*, 2000, vol. 123, pp. 488–506.
14. **Jensen D.E., Jones G.A., Mace A., Christopher H.** Inhibiting the flame by a potassium. *Journal of the Chemical Society-Faraday Transactions*, 1979, vol. 10, pp. 2377–2385.
15. **Pak V., Hieftje G.M.** Evaporation of particles of chlorides of alkaline metals in a flame. *Spectrochimical Acta*, 1985, vol. 40, pp. 209–216.
16. **Shmakov A.G., Korobeinichev O.P., Shvartsberg V.M., Yakimov S.A., Knyazkov D.A., Komarov V.F., Sakovich G.V.** Testing ogranophosphorus, organofluorine, and metal-containing compounds and solid-propellant gas-generating compositions doped with phosphorus-containing additives as effective fire suppressants. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2006, vol. 42, no. 6, pp. 678–687.
17. **Antsupov E.V.** Synergism and antagonism in the action of powder inhibitors in propane-air flames. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 75–80.
18. **Volkov V.K., Vogman L.P., Mikhaylov V.G., Golev L.B.** Laboratornaya ustanovka dlya issledovaniya ognetushashchey effektivnosti poroshkovykh sostavov [Laboratory device for studying the fire extinguishing effectiveness of powder compositions]. In: *Pozharnaya tekhnika i tusheniye pozharov* [Fire equipment and fire extinguishing], iss. 12. Moscow, VNIPO Publ., 1974. Pp. 74–77.
19. **Baratov A.N., Dobrikov V.V., Kulikov V.N.** Laboratornyy metod ispytaniya ognetushashchey effektivnosti poroshkov [Laboratory method for testing the fire extinguishing effectiveness of powders]. In: *Goryuchest' veshchestv i khimicheskiye sredstva pozharotusheniya* [Flammability of substances and chemical fire extinguishing agents], iss. 5. Moscow, VNIPO Publ., 1978. Pp. 83–89.
20. **Baratov A.N., Vogman L.P.** *Ognetushashchiye poroshkovye sostavy* [Fire extinguishing powder compositions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982.
21. **Sabinin O.Yu.** Eksperimental'noye izucheniye vliyaniya tekhnologicheskikh svoystv poroshkovykh sostavov na ikh ognetushashchuyu sposobnost' pri impul'snom sposobe pozharotusheniya [Experimental study of the influence of technological properties of powder compositions on their fire extinguishing ability in the pulsed fire extinguishing method]. *Pozharovzryvobezopasnost* [Fire and explosion safety], 2008, vol. 17, no. 6. pp. 64–73.

22. **Misnikov O.S., Dmitriev O.V., Popov V.I.** Issledovaniye svoystv ognetushashchikh poroshkov, modifitsirovannykh torfyanyimi gidrofobnymi dobavkami [Study of the properties of fire extinguishing powders modified with peat hydrophobic additives]. *Trudy Instorfa* [Proceedings of Instorf], 2013, vol. 8, pp. 23–32.
23. **Korolchenko D.A.** *Otsenka vremeni blokirovaniya putey evakuatsii opasnymi faktorami pozhara v zdaniyakh i sooruzheniyakh s uchyotom mekhanizma tusheniya plameni veshchestvami razlichnoy prirody i stepeni dispersnosti* [Estimation of the time of blocking evacuation routes by fire hazards in buildings and structures, taking into account the mechanism of extinguishing flames with substances of different nature and degree of dispersion]. Thesis, Moscow, 2021.
24. **GOST R 53280. 4–2009.** Ustanovki pozharotusheniya avtomaticheskoye. Ognitushashchiye veshchestva. Chast' 4. Poroshki ognitushashchiye obshchego naznacheniya. Obshchiye tekhnicheskoye trebovaniya i metody ispytaniy [Automatic fire extinguishing devices. Fire extinguishing agents. Part 4. General purpose fire extinguishing powders. General technical requirements and test methods].
25. **Rosser W.A., Inami S.H., Wise H.** The effect of metal salts on premixed hydrocarbon air flame. *Combustion and Flame*, 1963, vol. 7, no. 2, pp. 107–119.
26. **Burke R., van Tiggelen A.** Kinetics of laminar premixed methane–oxygen–nitrogen flames. *Bulletin des Socits Chimiques Belges*, 1965, vol. 74, no. 9–10, pp. 426–449.
27. **Baratov A.N.** Gorennye — pozhary — vzyryv — bezopasnost' [Combustion — fire — explosion — safety]. Moscow, FGU VNIPO MChS Rossii, 2003.
28. **Shmakov A.G., Korobeinichev O.P., Shvartsberg V.M., Sidelnikov A.A.** *Ognitushashchiy poroshok mnogotselevogo naznacheniya i sposob yego polucheniya* [Multi-purpose fire extinguishing powder and method for its production]. RF Patent No. 2719680, registration date 04/21/2020.
29. **Cox G., Chittya R.** Study of the deterministic properties of unbounded fire plumes. *Combustion and Flame*, 1980, vol. 39, pp. 191–209.

Article received 01.12.2023.

Corrections received 06.04.2024.