

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ НА ЗАЖИГАНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

K. Hüttenbrenner, H. Kern, S. Tomasch, H. Raupenstrauch

Горный университет Леобена, 8700 Леобен, Австрия, katja.huetttenbrenner@unileoben.ac.at

Негорючие материалы в качестве инертных добавок играют важную роль в предотвращении взрывов. Несмотря на очевидную важность и прикладное значение таких материалов, механизмы, приводящие к подавлению взрыва, до сих пор изучены недостаточно. Это относится, в частности, к инертным материалам с высокой удельной площадью поверхности, а также к влиянию содержания влаги в инертном материале. Работа посвящена экспериментальному и численному исследованию влияния инертных добавок на зажигание и распространение пламени во взвесьях диспергированного ликоподия в воздухе. Влияние удельной площади поверхности исследовано для инертного порошкового материала клиноптилолит (Clinoptilolith).

Ключевые слова: инертные частицы, пылевоздушная смесь, зажигание, пламя, взрывобезопасность.

DOI 10.15372/FGV20200406

ВВЕДЕНИЕ

Предотвращение пожаров и взрывов является важнейшей задачей в области промышленной безопасности. Концепция обеспечения взрывобезопасности включает в себя три основные задачи: предотвращение образования взрывоопасной смеси, исключение источников зажигания и конструктивные меры по ослаблению воздействия взрыва [1]. Исследования последних десятилетий выявили несколько механизмов предотвращения взрывов, в числе которых потери тепла из зоны горения, вытеснение кислорода, разбавление, блокирование теплопередачи излучением [2], а также обрыв цепных реакций за счет гибели радикалов [3]. Эффективным альтернативным методом может стать применение сухих тушащих агентов, частицы которых служат стоками тепла [4]. Добавление в горючую пыль достаточного количества инертного порошка приводит к поглощению значительного количества тепла, выделяющегося при горении [5]. Механизмы ингибирования и полного гашения пламени инертными добавками могут быть как тепловыми, так и химическими. Действие тепловых ингибиторов обусловлено их охлаждающим эффектом, т. е.

понижением температуры реагирующих газов вследствие частичного испарения или плавления частиц. Действие химических ингибиторов обусловлено рекомбинацией химических компонентов, ответственных за продолжение цепей протекающих реакций [6]. В данной работе основное внимание уделяется потерям тепла в зоне горения, т. е. тепловому ингибированию.

В соответствии с теорией Семенова [7], если скорость теплопотерь превышает скорость выделения тепла в химических реакциях, горение не может быть самоподдерживающимся и происходит погасание пламени. Поскольку реакции горения газообразных углеводородов сильно экзотермические, для гашения таких пламен требуются эффективные стоки тепла. Важную роль также играет временной фактор, поскольку скорость тепловыделения при горении очень велика. Таким образом, ключевыми характеристиками тушащих агентов являются их быстрый отклик на выделяющееся тепло и способность поглощать значительное количество тепла [4]. В данной работе представлены оценки характеристик взаимодействия горючей пыли и дисперсных инертных добавок, полученные в результате экспериментальных и численных исследований воспламенения различных пылевоздушных смесей.

ИНЕРТНЫЕ ДОБАВКИ

В экспериментах в качестве инертной дисперсной добавки использовался кристаллический минерал клиноптилолит (Clinoptilolith), известный благодаря широкому применению в промышленности. Этот минерал относится к вулканическим породам и характеризуется трехмерной структурой соединений кремния и алюминия [8]. Естественная пористость материала обеспечивает высокую удельную площадь поверхности $400 \div 600 \text{ м}^2/\text{кг}$.

В соответствии с [5] эффективность ингибирования определяется количеством ингибитора, необходимым для предотвращения взрыва в пылевоздушной смеси. Поскольку более мелкие частицы имеют большую удельную площадь поверхности, следует ожидать, что они лучше подходят для использования в качестве тушащего агента. Однако лимитирующим фактором при этом является агломерация ультрадисперсных частиц, которую необходимо принимать во внимание [5]. Кроме того, при одинаковой массе материала количество мелких частиц в пылевоздушном облаке больше, чем крупных в аналогичном облаке. Следовательно, среднее расстояние между частицами ингибитора будет меньше, а расстояние между горючими частицами при этом возрастет. Это препятствует распространению пламени от частицы к частице [9]. В работе [9] введен так называемый индекс инерттизации Z , определенный как отношение массы минеральной пыли (инерта) к массе горючей угольной пыли, и показано, что имеет место соотношение

$$Z = \frac{385.5}{\text{SSA}^{0.638}}, \quad (1)$$

где SSA — удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{кг}$. В соответствии с равенством (1) индекс инерттизации Z увеличивается с уменьшением удельной площади поверхности. Это значит, что для достижения заданного инерттизирующего эффекта при использовании крупнодисперсной пыли потребуется большая масса материала, чем в случае мелкодисперсной пыли.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения эффективности негорючих порошков в подавлении взрывов пыли или гашении пламени сначала были проведены исследования поглощения энергии частицами порошка при горении. Чтобы выявить влияние

добавок на процесс воспламенения, были выполнены измерения минимальной энергии зажигания с помощью установки Kuhner AG® MIKE III по методике EN ISO 80079-20-2. Для измерения скорости распространения пламени в пылевоздушных смесях в условиях слабой турбулентности применялась нестандартная методика, предложенная в [10]. Установка состояла из вертикальной взрывной трубы длиной 2 м с искровым воспламенителем непрерывного действия, расположенным у нижнего торца. Для снижения уровня турбулентности система подачи порошка была установлена у верхнего торца трубы, этим также обеспечивалось надлежащее распределение частиц по объему. Эксперименты и оптические измерения выполнялись при концентрациях пыли $200 \div 300 \text{ г}/\text{м}^3$. Скорость роста давления измерялась в камере Siwek 20-L Chamber (по методике EN ISO 80079-20-2) с искровым воспламенителем непрерывного действия, в котором выделяется суммарная энергия 10 Дж.

Исследовалась эффективность инерта для одного вида горючих частиц — ликоподия (*Lycopodium Clavatum*). Ликоподий представляет собой споры плауна, он имеет сетчатую структуру поверхности и содержит олеиновую кислоту, поэтому легко воспламеняется и интенсивно горит [11]. Ликоподий характеризуется очень малым разбросом размеров частиц, среднее значение составляет порядка 30 мкм.

Численные расчеты взрывов пылевоздушных смесей с добавками инертных частиц осуществлялись с помощью программы OpenFOAM® с открытым кодом. Применялся эйлерово-лагранжевый подход, в рамках которого газовая фаза считается непрерывной средой, в которую погружены индивидуально отслеживаемые твердые частицы дисперсной фазы. В уравнениях сохранения массы, импульса и энергии учитывается взаимное влияние фаз за счет их двустороннего взаимодействия [12]. В модели учитывается двусторонний обмен импульсом и передача кинетической энергии турбулентности между газом и твердыми частицами, а также тепло- и массообмен частиц с газом, в том числе за счет испарения [13]. Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса для турбулентного течения решаются совместно с k - ε -моделью турбулентности [14]. Все расчеты проведены при одинаковой концентрации инертной добавки $750 \text{ г}/\text{м}^3$.

Для частиц, содержащих воду, можно

ожидать проявления двух механизмов воздействия на распространение пламени. Во-первых, испарение воды сопровождается потреблением тепла (сток энергии). Во-вторых, производство пара приводит к разбавлению смеси, снижению концентрации и вытеснению кислорода. В численной реализации модели модуль `MultiphaseReactionCloud` программы `OpenFOAM®` был модифицирован, чтобы учесть многокомпонентность, испарение и реакции на поверхности частицы [14]. Как для испаряющихся, так и для твердых инертных частиц принимались фиксированные плотность 2200 кг/м^3 и удельная теплоемкость $900 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНЫХ ДОБАВОК НА ЗАЖИГАНИЕ

На первом этапе был исследован инертизирующий эффект добавления пористого материала, вызванный взаимодействием горючей пыли и инертных дисперсных добавок при различных составах смесей. Энергетической характеристикой способности смеси к воспламенению является минимальная энергия зажигания. На первой стадии трехступенчатого процесса зажигания частица, находящаяся перед распространяющимся пламенем, поглощает энергию, поступающую от фронта пламени за счет излучения и конвективного теплообмена [15]. С увеличением количества инерта поглощение тепла становится достаточным для того, чтобы зажигание частиц горючего не происходило [15].

В качестве ингибитора с малой удельной площадью поверхности использовались монодисперсные керамические шарики, для которых эффекты гетерогенного ингибирования не должны играть существенной роли. Эксперименты подтверждают это предположение (рис. 1). Напротив, порошки инертного материала (клиноптилолита) отличаются большой удельной площадью поверхности. Ингибирующее действие клиноптилолита начинается при его содержании в пылевом облаке $C_{inert} \approx 55 \%$, т. е. при меньшей концентрации, чем для керамических шариков. Однако для обоих видов частиц наблюдается схожий резкий рост минимальной энергии зажигания $E_{ign,min}$ в начале интервала концентраций, вызывающих ингибирование [16, 17]. В качестве эталонного материала в экспериментах использовался огнетушащий порошок, применяемый на практике (смесь дигидроортофосфата аммония

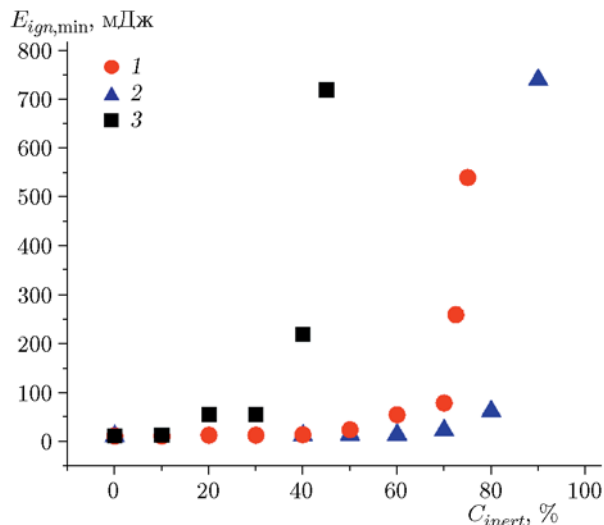


Рис. 1. Минимальная энергия зажигания в зависимости от количества инертного материала (эксперименты на установке МИКЕ III) [16, 19]:

1 — клиноптилолит (сухой), 2 — керамические шарики, 3 — огнетушащий порошок

и сульфата аммония). Чтобы получить сопоставимые результаты, все эксперименты выполнялись для одного и того же распределения частиц по размерам ($32 \div 63 \text{ мкм}$).

Наряду с экспериментальными исследованиями, влияние дисперсных добавок изучалось также методами численного моделирования. Минимальная энергия зажигания определялась для модельной цилиндрической геометрии, представляющей собой часть трехмерной геометрии установки МИКЕ III. Поскольку интерес вызывал лишь процесс зажигания, рассматривалась расчетная область длиной 6 мм и диаметром 16 мм.

Исследовались как сухие частицы клиноптилолита, так и насыщенные водой. Это позволило установить, как быстро испаряется содержащаяся в естественных порах минерального материала вода и как она усиливает ингибирование горения за счет испарения при нагреве. При численном моделировании минимальная энергия зажигания определялась как среднее значение между вкладом энергии, при котором смесь зажигалась, и вкладом, при котором зажигания не происходило. В большинстве расчетов разность соответствующих значений была порядка 2 мДж. В таблице приведены результаты расчета минимальной энергии зажигания для двух материалов в зависимости от

Результаты расчета минимальной энергии зажигания для двух видов добавок при разных размерах частиц [16]

Инертные частицы	$E_{ign,min}$, мДж, при диаметре частиц, мкм			
	50	30	20	15
Сухие	25	26	29 ÷ 30	29 ÷ 30
Насыщенные водой	17	17	27 ÷ 28	25

диаметра частиц при постоянной концентрации добавки $C_{inert} = 750 \text{ г/м}^3$. Рассчитанное значение минимальной энергии зажигания для ликоподия составило 25 мДж, что примерно вдвое превышает экспериментальное значение (13 мДж). Известно, что минимальная энергия зажигания увеличивается с ростом влагосодержания в частицах горючего [18]. Однако в наших расчетах обнаружена противоположная тенденция (см. таблицу). Наблюдается небольшое увеличение минимальной энергии зажигания с уменьшением диаметра частиц. Так, для сухих инертных частиц такое увеличение составило 5 мДж. Это можно объяснить ростом числа частиц более чем в 37 раз при постоянной концентрации 750 г/м^3 .

На самой ранней стадии зажигания вокруг области электрической искры формируется горячая зона. Последующее резкое расширение газа вызывает возникновение волны давления, а также приводит к уменьшению концентрации частиц в данной области. Таким образом, на начальной стадии в горячей зоне находится мало топлива и его концентрация, по всей вероятности, контролирует, наряду с диффузией, скорость реакций. На рис. 2 приведены зависимости скорости тепловыделения $\frac{dQ}{dt}$ от времени t для смеси без добавок (кривая 1) и с добавками частиц размером 50 мкм при концентрации 750 г/м^3 (кривые 2, 3). Тепловыделение источника искрового зажигания составляет 28 мДж. Видно, что в системе, содержащей насыщенные водой частицы (кривая 2), горение начинается очень быстро. Поскольку единственным отличием этих частиц является наличие массопереноса в газовую фазу, естественно предположить, что выброс пара интенсифицирует горение, улучшая перемешивание на молекулярном уровне, что и приводит к устойчивому горению уже на первых шагах по времени.

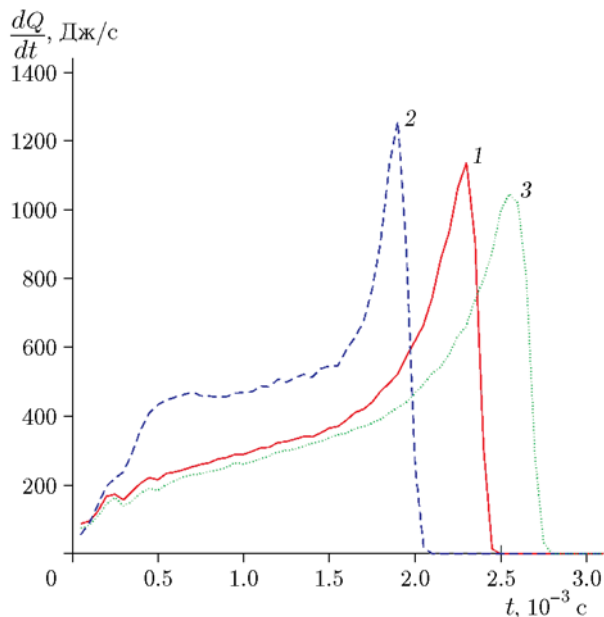


Рис. 2. Расчетная зависимость скорости тепловыделения от времени [19]:

1 — смесь без добавок, 2, 3 — с добавкой частиц 50 мкм, 2 — насыщенные водой частицы, 3 — сухие частицы

Чтобы проанализировать зависимость реакций от турбулентного смешения, рассмотрим кинетическую энергию турбулентности на нескольких первых шагах расчета. В случае насыщенных водой частиц расчетный уровень турбулентной кинетической энергии оказывается выше, чем в других случаях. Общее выделившееся в реакциях тепло, которое на рис. 2 равно площади под соответствующей кривой, несколько отличается в двух рассмотренных случаях. Причина этого может быть заключена либо в зависящей от температуры энтальпии реакций, либо в том, что часть частиц могла быть вытолкнута из трубы волной давления.

Зависимость скорости тепловыделения от времени для пылевоздушной смеси с простыми инертными частицами (линия 3 на рис. 2) имеет аналогичный вид. В течение первых миллисекунд эта кривая демонстрирует линейный рост и весьма близко подходит к кривой для горения смеси частиц ликоподия с воздухом без добавок (кривая 1). Далее, однако, кривая 1 идет вверх круче, чем зависимость для сухих инертных частиц, что можно объяснить различиями в скорости распространения пламени. При добавке сухих инертных частиц, как показывают расчеты, фронт пламени облада-

ет сильными неоднородностями на протяжении нескольких первых расчетных шагов.

Еще один эффект можно наблюдать, анализируя распределения массовой доли кислорода в газовой фазе, представленные в разные моменты времени на рис. 3. При взрыве горение сосредоточено в небольшой цилиндрической области. После зажигания зона реакции формируется вокруг искры и существует лишь до тех пор, пока имеется достаточное количество кислорода. Для большинства горючих смесей эта реакция длится лишь в течение несколько первых расчетных шагов (<0.5 мс), на протяжении которых зона реакции практически не расширяется, поскольку поглощение кислорода происходит слишком быстро. Для смесей, содержащих насыщенные водой частицы, ситуация отличается тем, что выделяющийся пар толкает зону реакции по направлению свежей смеси [16, 19]. Поэтому зона реакции увеличивается, и скорость тепловыделения здесь превышает аналогичные значения для других смесей. После того как фронт пламени окончательно формируется, скорость тепловыделения увеличивается одинаково как для

смесей с инертными частицами, так и без них (см. рис. 2). Слабый, практически линейный рост скорости тепловыделения после зажигания связан, по всей вероятности, с увеличением диаметра цилиндрического фронта пламени. Быстрый рост скорости тепловыделения в конце каждого графика обусловлен ускорением движения фронта пламени.

ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНЫХ ДОБАВОК НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ

Чтобы прояснить влияние удельной площади поверхности на ингибирующие свойства добавок, рассмотрим баланс энергии. Принимая во внимание теплоперенос за счет излучения и конвекции, получаем уравнение энергии частицы в виде [15]

$$V c_p \rho_p \frac{dT_p}{dt} = -A_f (\alpha_{fp} \sigma T_p^4 - \varepsilon_f \sigma T_f^4) - \alpha A (T_p - T_f), \quad (2)$$

где V — объем, c — удельная теплоемкость, ρ — плотность, T — температура, A — площадь поверхности частицы, σ — постоянная Стефана — Больцмана, ε — степень черноты, α — коэффициент теплоотдачи ($\alpha = \lambda \text{Nu} / 2r$, λ — температуропроводность, Nu — число Нуссельта, r — радиус), индексы f и p обозначают пламя и частицы. При выводе данного уравнения температура смеси считалась постоянной, а кинетика реакций не принималась во внимание [20]. Поскольку частицы нагреваются за счет излучения, можно ожидать увеличения поглощения тепла частицами с ростом удельной площади поверхности. В расчетах все частицы пыли предполагались сферическими. Кроме того, считалось, что загоревшаяся частица ведет себя как рассеивающий излучатель, для которого необходимо учитывать угловой коэффициент. Энергия, передаваемая излучением от площади поверхности горячей частицы пыли A_1 к площади поверхности другой частицы A_2 , может быть вычислена через поток тепла \dot{Q} по следующей формуле [21]:

$$d^2 \dot{Q}_{dA_1 \rightarrow dA_2} = I_1 \cos \Psi_1 dA_1 d\omega_{21}, \quad (3)$$

где телесный угол $d\omega$ равен

$$d\omega = \frac{dA \cos \Psi}{r^2}. \quad (4)$$

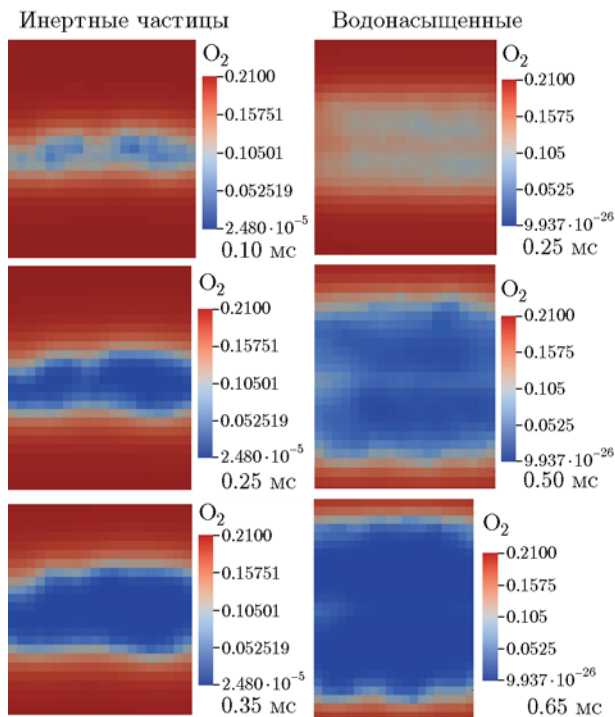


Рис. 3. Расчетные распределения массовой доли кислорода в межэлектродном пространстве для сухих и водонасыщенных частиц в момент зажигания смеси [16]

Здесь I_1 — интенсивность излучения, Ψ — угол между нормалью к поверхности и направлением переноса излучения, r — расстояние между двумя поверхностями. Рассмотрим одну частицу ликоподия, реагирующую в зоне горения, и одну инертную частицу. В отсутствие теплопотерь энергия излучения, покидающая поверхность частицы ликоподия и падающая на поверхность инертной частицы, описывается уравнением

$$\dot{Q}_{lyco \rightarrow inert} \rightarrow \iint_{A_{inert}} \left[\iint_{A_{lyco}} \left(\frac{1}{r^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times I_{lyco} \cos \Psi_{lyco} \cos \Psi_{inert} \right) dA_{lyco} \right] dA_{inert}. \quad (5)$$

Удельная площадь поверхности керамических шариков значительно меньше, чем площадь поверхности частиц порошка клиноптилолита. Поэтому площадь поверхности, поглощающей излучение, и количество энергии, переданное инертным частицам, также должны быть больше в случае клиноптилолита. При рассмотрении удельной площади поверхности частицы и пор в ее объеме необходимо принимать во внимание, что лишь очень малая доля излучения проникает во внутренние поры частицы. Это учитывается коэффициентом K , который показывает, что на внутреннюю поверхность пористой частицы попадает лишь небольшая часть излучения:

$$A_{ceramic\ bead} \approx A_{Clinoptilolith} K. \quad (6)$$

Как показано в [6], гашение пламени происходит, когда средняя температура в зоне реакции T_m падает до предельного значения $T_{m,lim}$, ниже которого самоподдерживающееся горение невозможно. В [6] приведено значение $T_{m,lim} = 1170$ °C, в [20] — 1000 °C, а в [22] указано, что распространение пламени прекращается, если его температура падает до 1000 ÷ 1200 °C, и на пределе распространения скорость пламени может быть очень низкой (порядка нескольких сантиметров в секунду).

Результаты измерения скорости пламени v_f показаны на рис. 4. В экспериментах фронт дефлаграционного горения, распространяющийся по трубе, имел параболическую форму [10]. При добавке инертных частиц к горючей пыли происходит замедление пламени,

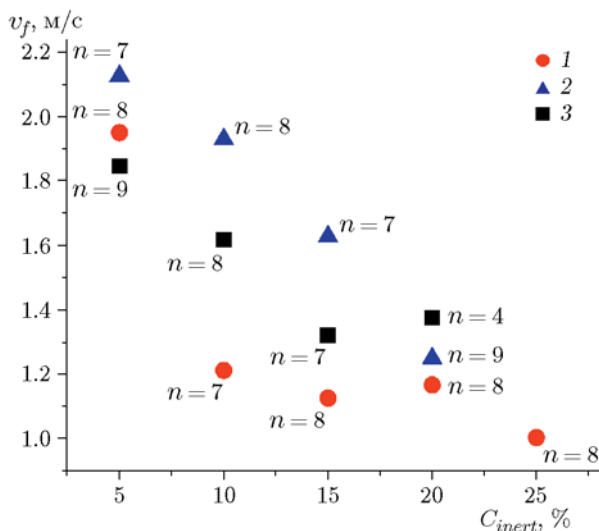


Рис. 4. Результаты измерения скорости распространения пламени в трубе [16, 19]:

1 — клиноптилолит (сухой), 2 — керамические шарики, 3 — огнетушащий порошок

тем более сильное, чем выше концентрация добавки [16, 19]. Дополнительные эксперименты, направленные на выяснение влияния удельной площади поверхности на скорость роста давления $\frac{dp}{dt}$, проводились в закрытой камере Siwek 20-L Chamber. Для всех изучаемых смесей, что также подтверждается экспериментами других авторов [5], получена отрицательная корреляция между количеством инертных частиц в пылевом облаке и величиной $\frac{dp}{dt}$ (рис. 5). Это может означать, что на интенсивность взрыва влияет взаимодействие со стенками резервуара [16]. Однако результаты, полученные для минеральной пыли клиноптилолита (с большой удельной площадью поверхности) и керамических шариков (с малой удельной площадью), оказались весьма близки. Возможное объяснение заключается в том, что скорость движения зоны реакции слишком велика, чтобы успевала проходить рекомбинация радикалов на поверхности инертных частиц, а радикалы успевали достигать внутренней поверхности. Таким образом, частицы ведут себя как сток тепла для протекающих цепных реакций независимо от удельной площади поверхности.

Следует ожидать, что удельная площадь поверхности должна быть адекватной характеристикой эффективности инерта. В самом деле, наши эксперименты подтверждают общую

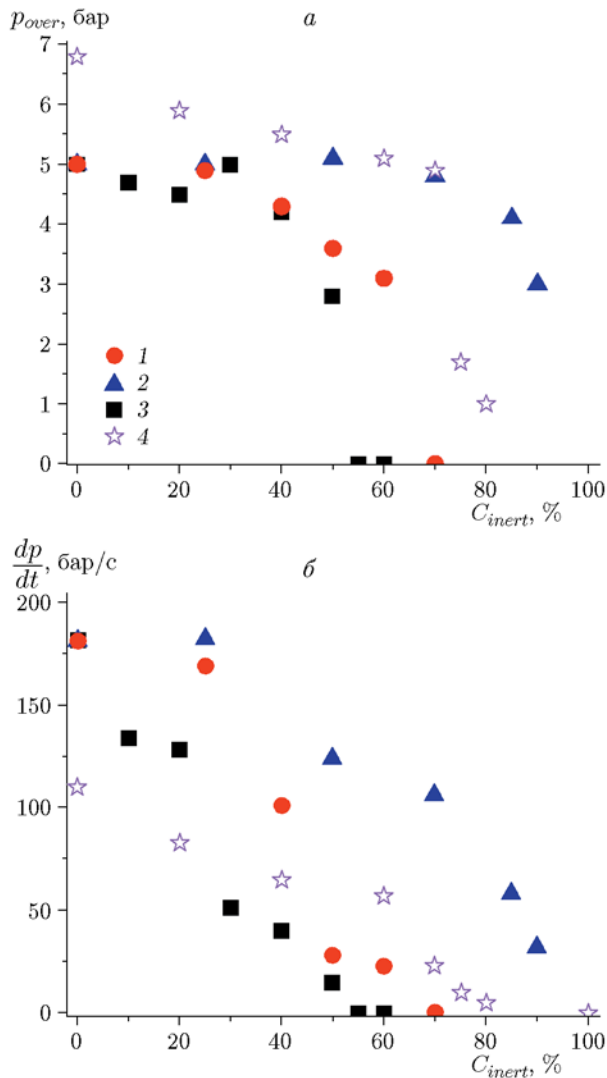


Рис. 5. Экспериментальные результаты, полученные в камере объемом 20 л, и результаты работы [5]:

a — избыточное давление взрыва, *b* — скорость роста давления [16]; 1 — клиноптилолит (сухой), 2 — керамические шарики, 3 — огнетушащий порошок, 4 — доломит и угольная пыль [5]

тенденцию повышения ингибирующей способности инертных порошков при увеличении удельной площади поверхности. Однако такая тенденция наблюдается только до определенного ее значения. В отличие от указанной тенденции и от равенства (1), наши результаты для клиноптилолита не свидетельствуют о повышении ингибирующей способности. Это может быть связано с тем, что значительная доля поверхности частиц клиноптилолита оказывается не задействованной за короткое время про-

хода частицы через фронт горения. Результаты других авторов [5] также подтверждают это предположение. Малое время пребывания частиц в зоне реакции ослабляет теплоперенос и снижает полноту их термического разложения при нагреве [5]. Так, температура разложения материала минеральной пыли составляет около 1 100 К [15], что является слишком высоким значением, которое не может быть достигнуто за такое короткое время.

Для изучения влияния пористых частиц на распространение пламени по горючей пылевоздушной смеси были проведены двумерные численные расчеты горения в трубе длиной 32 см и диаметром 8 см. Горение инициировалось заданием круглой горячей области со стехиометрической смесью, расположенной в нижней части расчетной области. Для обоих видов частиц, ликоподия и инертных добавок, диаметр частицы полагался равным 50 мкм. Достаточно большая концентрация частиц снижает скорость распространения пламени и может привести к погасанию. Неравномерность распределения концентраций в смеси, случайное пространственное распределение частиц, качество смешения горючего и окислителя, а также температура влияют на распространение пламени. Зависимость скорости распространения пламени от времени показана на рис. 6. Во всех случаях, т. е. для смесей с испаряющимися водонасыщенными частицами, с сухими частицами и для смеси без добавок, скорость распространения пламени растет с высотой. Фронт пламени с водонасыщенными испаряющимися ча-

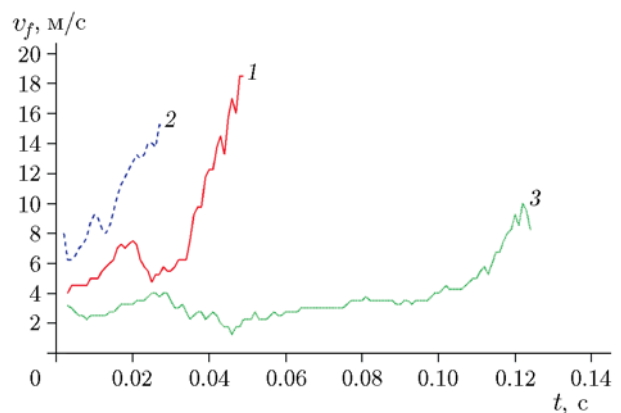


Рис. 6. Результаты численного расчета скорости распространения пламени в смеси без добавок (кривая 1), с добавкой насыщенных водной частиц (кривая 2) и сухих частиц (кривая 3)

стищами первым достигает торца трубы, а его скорость монотонно увеличивается до 18 м/с к моменту выхода из трубы. Вода является дополнительным стоком тепла, поэтому следовало ожидать, что она усилит отбор тепла частицами из зоны горения. Ранее также было принято считать, что пары воды уменьшают скорость реакции [6]. Однако наши расчеты дают противоположный результат: при наличии добавок, частицы которых насыщены водой, фронт пламени ускоряется. Для системы, содержащей сухие инертные частицы, скорость пламени остается постоянной в течение длительного времени, а фронт пламени достигает открытого конца трубы со значительным отставанием по сравнению с двумя другими случаями. Только на последних нескольких сантиметрах скорость пламени возрастает до максимального значения 11 м/с. Ускорение пламени при приближении к открытому концу может быть объяснено выбросом частиц из трубы под действием волны давления: покинувшие трубу частицы не могут участвовать в замедлении пламени.

Расчетные мгновенные поля температуры представлены на рис. 7. В первой колонке рис. 7 показано распространение пламени по смеси ликоподия с воздухом без инертных добавок. В смеси, содержащей сухие инертные частицы (вторая колонка на рис. 7), распространение пламени происходит с постоянной скоростью и медленнее, чем в других смесях. Скорость реакции лимитируется диффузией, а инертные частицы взаимодействуют с газовой фазой, отбирая часть тепла, выделяемого при горении. Кинетические ограничения, связанные с понижением температуры, не играют существенной роли в горении. В смесях, содержащих насыщенные водой частицы (третья колонка на рис. 7), фронт пламени имеет форму почти идеального купола, в верхней части которого четко видна тонкая горячая зона, в которой протекают реакции. Скорость горения лимитируется поступлением кислорода, который полностью расходуется во фронте. Интенсивное испарение имеет место только позади фронта горения. Это можно объяснить более медленным нагревом водонасыщенных частиц, чем частиц ликоподия. Высокая теплоемкость и большая теплота испарения также замедляют испарение воды. Позади горячей области вся олеиновая кислота, содержавшаяся в ликоподии, уже испаряется. Поэтому тепловая энергия расхо-

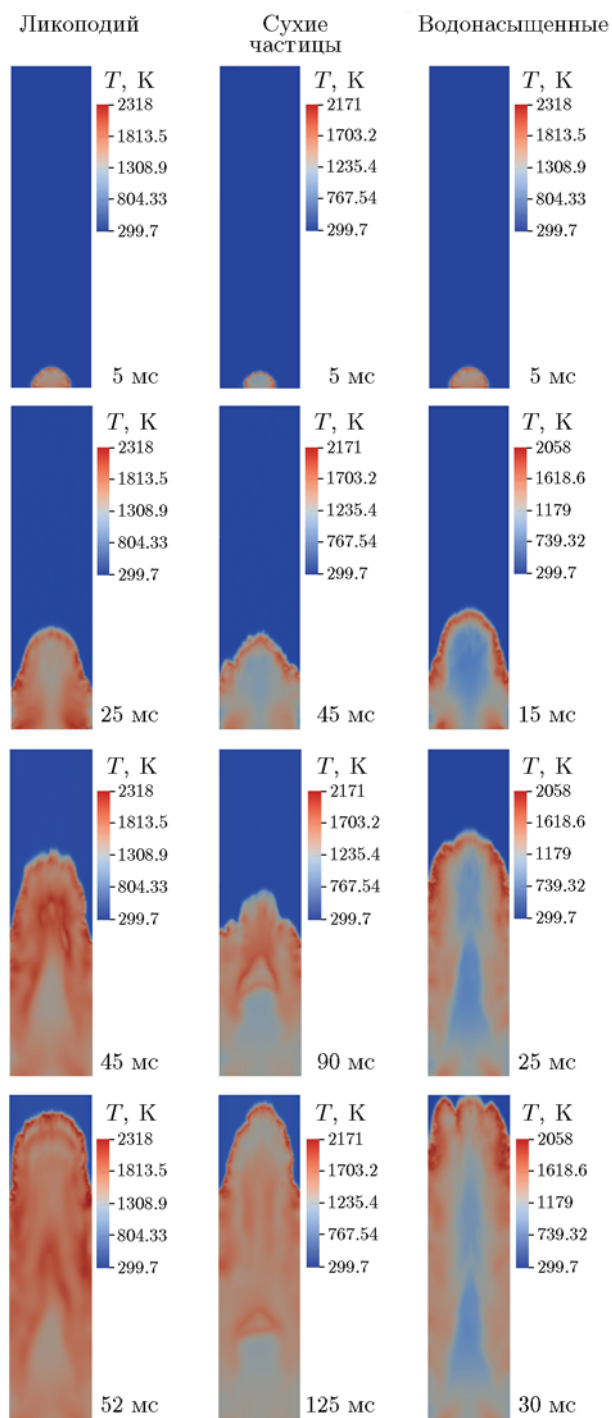


Рис. 7. Распространение пламени по пылевоздушной смеси с разными добавками. Расчетные мгновенные распределения температуры [16, 19]

дуется преимущественно на испарение воды, что приводит к охлаждению смеси. Образующийся пар выталкивает зону горения вперед, по направлению к свежей смеси, действуя совместно с эффектом теплового расширения газа вследствие увеличения температуры и уменьшения плотности. Это способствует ускорению пламени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние инертных дисперсных добавок на горение пылевоздушных смесей. Основное внимание уделено роли удельной площади поверхности пористых инертных материалов в процессах зажигания и распространения пламени. С этой целью проведены эксперименты по горению ликоподия в качестве горючей пыли, при наличии мелкодисперсных (с размером частиц $32 \div 63$ мкм) добавок с различной площадью поверхности. Эксперименты сопровождались численными расчетами, проясняющими процессы взаимодействия горящих и инертных частиц. Для изучения эффектов, связанных с испарением, рассмотрены также пористые инертные частицы, насыщенные водой, и учтено испарение воды при нагреве. Показано, что наличие развитой внутренней поверхности у пористых частиц не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на инертизирующую эффективность добавок. Это связано с тем, что за время пребывания частицы в быстро движущемся фронте пламени лишь тонкий слой у внешней поверхности частицы успевает вступить во взаимодействие с горячим газом. Проникновение тепла или реакционных компонентов к внутренней поверхности частиц ограничено медленными процессами диффузии и не играет заметной роли.

В численных расчетах изучено и другое, кроме инертизирующего, воздействие водяного пара, выделяемого при нагреве частиц. Показано, что даже небольшие объемы водяного пара, образующегося в зоне реакции, стабилизируют и ускоряют распространение пламени за счет интенсификации перемешивания реагентов вблизи его фронта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Steen H.** Handbuch des Explosionsschutzes. — Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
2. **Operation of Fire Protection Systems.** A Special Edition of the Fire Protection Handbook / A. E. Cote (Ed.). — Quincy Mass, 2003.
3. **Krasnyansky M.** Studies of fundamental physical-chemical mechanisms and processes of flame extinguishing by powder aerosols // Fire Mater. — 2008. — V. 32, N 1. — P. 27–47.
4. **Friedrich M.** Untersuchungen über das Verhalten und die Wirkungsweise verschiedener Trockenlöschmittel // Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. — 1960. — N 1168.
5. **Amyotte P. R.** Solid inertants and their use in dust explosion prevention and mitigation // J. Loss Prev. Proc. Ind. — 2006. — V. 19, N 2-3. — P. 161–173.
6. **Dewitte M., Vrebosch J., van Tiggelen A.** Inhibition and extinction of premixed flames by dust particles // Combust. Flame. — 1964. — V. 8, N 4. — P. 257–266.
7. **Semenoff N.** Zur Theorie des Verbrennungsprozesses // Z. Phys. — 1928. — Bd 48, N 7-8. — S. 571–582.
8. **Dyer A.** An Introduction to Zeolith Molecular Sieves. — J. Wiley, 1988.
9. **Harris M. L., Sapko M. J., Zlochower I. A., Perera I. E., Weiss E. S.** Particle size and surface area effects on explosibility using a 20-L chamber // J. Loss Prev. Proc. Ind. — 2015. — V. 37. — P. 33–38.
10. **Kern H.** Explosible dust/air mixtures. Investigations on flame propagation under non atmospheric conditions: Dissertation. — Leoben: Montanuniversität Leoben, 2013.
11. **Skold T.** Selected aspects of turbulence and combustion in 20-litre explosion vessels: development of experimental apparatus and experimental investigation: Master Thesis. — Bergen: Univ. of Bergen, 2003.
12. **Fluent 6.0 User's Guide.** — Lebanon, NH, USA, 2001. — V. 4, Ch. 18.
13. **Bakker A.** Multiphase Flows. Lecture Notes — Dartmouth College. — <http://bakker.org/dartmouth06/engs150/> — checked on 01.08.2016.
14. **Tomasch S.** Numerische Untersuchung der Wechselwirkung zwischen explosionsfähigen Lycopodium/Luft-Gemischen und inerten partikulären Additiven mittels Euler — Lagrange — Ansatz in OpenFOAM // Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag. — 2017.
15. **Chatrathi K., Going J.** Dust deflagration extinction // Process Saf. Prog. — 2000. — V. 19, N 3. — P. 146–153.
16. **Hüttenbrenner K., Kern H., Tomasch S., Raupenstrauch H.** Effects of inert particles with high specific surface on ignition and flame propagation in dust/air mixtures // Proc. of the 9th Int. Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9). — St Petersburg Polytech. Univ. Press, 2019. — V. 1. — P. 376–385.
17. **Hüttenbrenner K., Donner C., Kern H., Raupenstrauch H.** Investigations on the influence of the specific surface on the ignition

- and flame behavior of combustible dust/air mixtures // 11th Int. Symp. on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions. — Dalian, 2016.
18. **Bartknecht W.** Staubexplosionen. — Heidelberg, Berlin: Springer, 1987.
 19. **Hüttenbrenner K., Kern H.** Entzündbarkeit von Staub/Luft-Gemischen bei Verwendung von Inertstäuben mit hoher Porosität // Tech. Sicherheit. — 2018. — P. 25–30.
 20. **Kalkert N.** Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Explosionskenndaten von Mischungen aus mehreren gas- und staubförmigen Brennstoffkomponenten und Luft: Dissertation. — Dortmund, 1980.
 21. **Marek R., Nitsche K.** Praxis der Wärmeübertragung. — Carl Hanser Fachbuch Verlag, 2015.
 22. **Jarosinski J.** A survey of recent studies on flame extinction // Prog. Energy Combust. Sci. — 1986. — V. 12, N 2. — P. 81–116.

Поступила в редакцию 22.01.2020.

Принята к публикации 19.02.2020.
