

ФІЗИКА ГОРІННЯ

УДК: 621.791; 533.9

Буланин Ф.К.¹, Нимич А.В.², Опарин А.С.¹, Сидоров А.Е.¹, Шевчук В.Г.¹

¹Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, ул. Дворянская 2, г. Одесса, Украина, 65026. E-mail: takload@gmail.com

²Военная академия, ул. Фонтанская дорога 10, г. Одесса, Украина, 65026.

Физические аспекты пожаро-взрывобезопасности горючих пылей. Часть 1. Воспламенение

Исходя из основополагающих свойств горючих систем – распределенных нелинейных источников энергии и потоковой связи между элементами среды – представлен анализ различных режимов горения пылей. В зависимости от соотношений характерных времен горения (термокинетические характеристики) и теплопередачи (масштабные характеристики) рассматриваются предельные режимы – самовоспламенение, диффузионное горение и авто волновое горение. В отличие от газов, для пылей все характеристики воспламенения и горения существенным образом зависят от внутренних масштабов системы – размеры частиц и расстояния между ними. В первой части работы анализируются зависимости критической температуры воспламенения и времени задержки воспламенения от всех физико-химических параметров пыли. Показано, что все эти характеристики для различных горючих возможно описать единым образом, исходя из законов окисления (линейного и параболического), причем систематизирующим параметром является отношение реакционной поверхности твердого горючего к внешней поверхности теплообмена.

С учетом параметра f , который является отношением реакционной поверхности пыли к внешней поверхности теплообмена газозвеси, получены критические условия воспламенения в виде критерия, который аналогичен таковому для одиночных частиц. Показано, что его можно использовать для пылей как с линейным, так и с параболическим законом окисления. Разные горючие одинаково реагируют на изменение параметра f , так как он не содержит характеристик топлива и отображает способность взвеси к накоплению тепла. Таким образом, температура воспламенения является линейной функцией величины $1/lnf$, а период индукции – $1/f$.

Температура воспламенения и время задержки воспламенения не являются физико-химическими характеристиками взвеси, а отражают активность пылей в процессе воспламенения, так как они зависят от размера реакционного сосуда.

Ключевые слова: *металлические пыли, аэрозвеси металлов, воспламенение взвесей, режимы реагирования пылей, самовоспламенение взвесей.*

Введение. Пыли, наряду с газами, жидкостями и твердыми веществами, являются одним из четырех классов горючих веществ и материалов и подлежат, в соответствии с номенклатурой [1] определению показателей их пожаро-взрывоопасности.

Сжигание твердых горючих в дисперсном виде является наиболее распространенным способом их преобразования в энергосиловых установках, позволяющим достичь высоких скоростей процесса вследствие большой реакционной поверхности, получаемой при дроблении. По той же причине все техноло-

гические процессы, связанные с горючими пылями, являются существенно пожаро-взрывоопасными. В отличие от газов, где горючее и окислитель способны перемешиваться на молекулярном уровне, для пылей характерны дополнительные пространственные и временные масштабы, обусловленные размерами исходных частиц и конденсированных продуктов сгорания (если такие образуются) и расстояниями между ними. Это приводит к тому, что все характеристики воспламенения, горения и распространения пламени в пылях зависят не только от состава горючей смеси, но и, зачастую в определяющей степени, от параметров функции распределения частиц по размерам. Это предопределяет целый ряд трудностей, связанных с исследованием горения пылей. С теоретической точки зрения – это сложная взаимосвязь процессов кондуктивной, конвективной и радиационной теплопередачи в условиях межфазного массового, энергетического и силового обмена; наличие разнообразных законов окисления твердого горючего (линейных, степенных, логарифмических); различных механизмов горения частиц (гетерогенного, газофазного, парофазного); существенной роли радиационных потоков в тепло потерях или прогреве исходной пыли и само формирование этих потоков с учетом излучения, рассеивания и поглощения излучения в дисперсной среде и др. Это приводит к необходимости постановки и решения как минимум двухтемпературных, двухскоростных задач, а в случае полидисперсных пылей и многокомпонентных задач. При этом подходы механики многофазных реагирующих сред не являются панацеей, поскольку зачастую детальная информация о вышеперечисленных процессах или отсутствует, или противоречива. В качестве примера приведем ситуацию, которая возникает при описании турбулентного горения пылей. Из общих физических соображений следует, что в инертных двухфазных средах наличие мелкодисперсного порошка может гасить турбулентные пульсации вследствие расхода энергии на увлечение частиц, а крупнодисперсная фракция – способствовать развитию турбулентности вследствие сдвиговых течений вокруг крупных частиц. В то время как для реагирующих частиц может сложиться обратная ситуация – быстрогорящие мелкие частицы способны интенсифицировать переход к турбулентности вследствие быстрого выделения тепла и газообразных продуктов.

Обратимся к проблемам, связанным с экспериментальным исследованием параметров горения пылей. Важнейшая и самая трудная проблема, в отличие от газовых смесей - создание дезагрегированных и равномерно запыленных сред. Это – необходимое условие для получения достоверной и воспроизводимой информации. Приходится констатировать, что универсальные методы получения таких сред отсутствуют. Горение пылей изучается в реакционных полукрытых трубах с зажиганием у верхнего или нижнего открытого или закрытого конца; шахтных галереях, где порошок сначала распределяется вдоль дна галереи; пылевых горелках; сосудах постоянного объема или давления. Зачастую взвесь создается пневматическим импульсом. В таких условиях крайне важно производить зажигание спустя время, необходимое для затухания начальных турбулентных пульсаций, в противном случае начальный уровень турбулентности и равномерность запыления остаются под вопросом. Например, хорошо известно [2], что во взрывных цилиндрах максимальная скорость нарастания дав-

ления в зависимости от времени задержки зажигания может изменяться во много раз. В условиях реакционных труб с использованием непрерывной дозированной подачи порошка приходится иметь дело с проблемой учета скорости стоковоского оседания пыли, особенно крупнодисперсной. Действительно, в полуоткрытых трубах, с подачей пыли у верхнего закрытого и зажиганием у нижнего открытого конца, скорость оседания взвеси как целого может превосходить видимую скорость распространения пламени. Такое явление наблюдается при больших концентрациях пыли и может существенно превышать скорость оседания отдельных частиц в тех же условиях, это приводит к тому, что организовать горение взвеси в таких условиях становится невозможно. В случае подачи пыли у нижнего закрытого конца трубы и зажигания у верхнего, для выноса крупнодисперсного порошканеобходим поток газа, скорость которого также может превосходить скорость пламени, и пламя не способно проникнуть внутрь трубы. Кроме того, за счет различия скоростей газового и твердого компонента эффективная концентрация горючего для пламени, распространяющегося против вектора силы тяжести, может в несколько раз превосходить концентрацию в исходной смеси. Это связано с тем, что при воспламенении частиц происходит их торможение в зоне горения (поскольку взаимодействие с газом осуществляется не на поверхности частицы, а на поверхности зоны горения), в результате массовый поток горючего, поступающего в зону горения, может в несколько раз возрасти по сравнению с «замороженной» пылью. Это может приводить к тому, что нижние концентрационные пределы распространения пламени в условиях пламен, распространяющихся против вектора силы тяжести, могут быть в несколько раз ниже, чем те, которые реализуются в зоне горения. Соответственно, для пламен, распространяющихся вдоль вектора силы тяжести (вниз), они могут быть существенно завышены.

Другая проблема – дезагрегация исходного порошка. Хорошо известно [2], что пневмораспылом достичь дезагрегации порошков размером меньше нескольких микрон невозможно. То есть, в этих условиях пыль может представлять собой совокупность различных агломератов, условия воспламенения и горения которых существенно отличаются от таковых для индивидуальных частиц. Например, в работе [3] приведены данные для максимальной скорости нарастания давления для нанодисперсных порошков алюминия ($d = 35, 75$ и 100 нм). Они оказываются практически одинаковыми, несмотря на то, что их размер меняется почти в три раза. Это невозможно объяснить ничем иным, как их существенной агломерацией.

Отметим также, что определяющее значение для реализуемых параметров горения пыли имеют исходные размеры частиц. Вместе с тем для большинства сведений о параметрах взрываемости пыли подробная информация о дисперсных характеристиках пыли не приводится, в лучшем случае указан диапазон размеров или размер сит, через которые просеивался порошок. Это приводит к тому, что в некоторых случаях для одного и того же горючего материала эти данные могут отличаться почти на порядок. В последнее время появился целый ряд очень серьезных работ [4-9], в которых изучаются взрывные характеристики максимальное давление P_{\max} и максимальная скорость нарастания давления

взрыва $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ для алюминиевых пылей, в зависимости от концентрации, размера частиц, дисперсии функции распределения частиц по размерам, начального уровня турбулентности. Результаты этих исследований свидетельствуют о том, что P_{\max} , будучи термодинамической характеристикой, зависит от состава пыли и слабо зависит (в пределах 30%) от дисперсных характеристик и начального уровня турбулентности $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$, будучи динамической характеристикой, зависящей от режима распространения пламени, существенно зависит от концентрации горючего (достигая максимальных значений для концентрации в несколько раз превышает стехиометрические) возрастает с уменьшением размера частиц и дисперсии функции распределения и начального уровня турбулентности (до 6 раз), обусловленного пневмоимпульсным методом создания пыли. По нашему мнению, объективные данные о параметрах взрываемости пыли должны сопровождаться именно информацией о распределении частиц по размерам. При этом важнейшей характеристикой дисперсности должен быть $r_{32} = \frac{r_{30}^3}{r_{20}^2}$, поскольку массовая концентрация горючего пропорциональна среднекубическому размеру - $\overline{r_{30}}$, а характеристики воспламенения и горения частиц среднеквадратичному - r_{20} .

Еще одна проблема, которую нельзя оставить без внимания – это зажигание пыли. В отличие от газовых горючих систем, где вопрос зажигания решается элементарно, в пылях приходится зачастую использовать достаточно мощные источники зажигания – мощные электрические разряды, накалившую спираль или взрывающиеся проволоки, пламя газовых горелок, пиротехнические составы и т.п. Если в трудновоспламеняемой пыли не удастся организовать процесс распространения пламени, приходится решать дилемму – обеспечен ли собственно процесс воспламенения, либо скорости распространения пламени очень малы и в условиях эксперимента, например, вследствие естественной конвекции, пламя не способно распространяться по данной пыли. Например, в газозвесах бора (кристаллический бор, $d = 6.2$ мкм) организовать распространение пламени в воздушных смесях не удается вплоть до концентрации $B \approx 400$ г/м³, а при концентрации кислорода свыше 70% пламя распространяется со скоростью всего около 8 см/с [23]. И это при том, что бор является одним из наиболее высокоэнергетических горючих. Однако, высокие температуры воспламенения ($T_{\text{ign}} \approx 1920$ К) и большие времена горения частиц создают очень большие проблемы в реализации его высоких потенциальных возможностей. Еще более показательна ситуация со сжиганием угольной пыли. Несмотря на огромный интерес к сжиганию угля в пылевидной форме и огромное количество работ, посвященных этому вопросу, никому не удалось организовать сжигание пылевоздушной смеси угля в нормальных условиях (атмосферном давлении и температуре). Для его сжигания используются различные методы интенсификации [10] – дежурное газовое пламя, газовая «подсветка», предваритель-

ный нагрев пыли, обогащение кислородом, рециркуляция и смешение с продуктами горения и др.

Проблемам пылевых взрывов посвящено достаточно большое количество монографий и обзоров [2, 11-16], особо выделим монографию [2], которую в определенной мере можно рассматривать как энциклопедию, посвященную данной проблеме. Тем не менее, по нашему мнению, многие именно физические аспекты остаются недостаточно изученными. Обсуждению некоторых из них и посвящена данная работа.

1. Режимы горения пылей. Горючие пыли, как и аэрозоли и газофазные предварительно перемешанные смеси горючего с окислителем, принадлежат к так называемому классу активных систем, то есть систем с распределенными нелинейными источниками энергии и потоковой (диффузионной) связью между элементами среды. Математической базой для их изучения являются уравнения диффузионной кинетики – уравнения диффузии и теплопроводности с источниками энергии и массы, представляющие собой параболические квазилинейные уравнения второго порядка в частных производных. Поскольку процессы пожаров и взрывов зачастую сопровождаются вынужденными течениями исходной смеси и продуктов сгорания, либо эти течения возникают в процессе горения, то базовые уравнения дополняются уравнениями гидродинамики (для пылей уравнениями для твердых и газообразных компонентов). Эти уравнения, кроме нелинейности термокинетического вида, содержат также и нелинейность гидродинамического типа. Указанные нелинейности являются принципиальной особенностью процессов горения.

В простейшем случае уравнения диффузионной кинетики имеют следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{f(T)}{\tau_r}, \quad (1)$$

где $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ – коэффициент температуропроводности, τ_r – характерное время

химической реакции (горения), $f(T) \sim e^{E/RT}$ – термокинетическая нелинейность Аррениусовского типа.

Поскольку тепломассоперенос совершается в определенных геометрических масштабах (граничные условия), то необходимо ввести еще и характерное время тепломассопередачи в системе $\tau_h = L^2/a$, где L – характерный размер системы.

В зависимости от соотношения между τ_r и τ_h возможны следующие предельные режимы:

- а) $\tau_h \ll \tau_r$ – теплообмен происходит очень быстро, процесс лимитируется скоростью химической реакции. К этому классу режимов относятся процессы теплового взрыва (самовоспламенения) одиночных капель, частиц,

конгломератов, газозвесей. Базовое уравнение упрощается - нелинейное уравнение первого порядка по времени $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{f(T)}{\tau_p}$;

- b) $\tau_h \gg \tau_r$ – реакция протекает очень быстро, процесс лимитируется физическими процессами теплопереноса. К этому классу режимов относятся диффузионное горение частиц и капель, диффузионные двухфазные факела и др. Базовое уравнение – линейное уравнение теплопроводности $\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$;
- с) $\tau_h \approx \tau_r$ – оба процесса одинаково важны. Это волновые процессы горения. Базовое уравнение (1), скорость распространения пламени (скорость автоволны) является собственным значением задачи (1) и определяется только внутренними параметрами системы (a и τ_r) не зависит от начальных и граничных условий и по порядку величины $V_n \approx \sqrt{a/\tau_r}$. Это выражение отражает основное свойство активных систем – диффузионный перенос (a) и нелинейные источники (τ_r).

Используем следующую механическую аналогию. Представим реакционную систему в виде цепочки стоящих вертикально костяшек домино. В исходном состоянии система обладает распределенным запасом потенциальной энергии. При достаточно мощном (критическом) воздействии на подложку все костяшки упадут одновременно – аналог теплового взрыва. При слабом воздействии на одну костяшку (зажигание) по цепочке будет распространяться волна падения, скорость которой зависит только от внутренних свойств системы (вдали от границы) – высоты костяшек и периода цепочки. Это аналог автоволны горения.

В свою очередь, для автоволнового горения в зависимости от воздействия различных нелинейных возмущающих факторов, всегда присутствующих в горячей системе, возможно существование различных предельных в гидродинамическом отношении режимов распространения пламени – ламинарного, вибрационного, турбулентного, детонационного и переходных между ними. Ламинарный режим горения характеризуется ламинарным течением исходной смеси и гладкой поверхностью фронта горения. Именно для этого режима можно ввести понятие нормальной скорости пламени, как скорости перемещения фронта пламени по нормали к поверхности. Вибрационный режим может иметь место в стесненных условиях (каналах), когда в системе вследствие акустической неустойчивости пламени могут возникать стоячие акустические волны. Этот режим характеризуется периодическим изменением параметров волны горения и является результатом наложения акустических колебаний на распространяющийся фронт пламени. Турбулентное горение является либо результатом исходного турбулентного течения смеси, либо результатом развития гидродинамической неустойчивости фронта пламени (когда характерные числа Рейнольдса превышают критические значения в данных условиях), либо турбулизацией на препятствиях. Турбулентное горение характеризуется случайными крупно- и мелкомасштабными пульсациями параметров фронта пламени. Скорости турбу-

лентного горения на порядки превосходят скорости ламинарного пламени. Детонационное горение со скоростями, превышающими скорость звука в смеси, может являться либо результатом подрыва горючей смеси достаточно мощной ударной волной, либо в стесненных условиях в результате генерации волн сжатия нестационарным пламенем, их последующим слиянием с образованием ударного фронта и детонационной волны.

Остановимся подробнее на особенностях вышеперечисленных режимов в пылях.

2. Критические условия самовоспламенения пылей. В соответствии с [1] температура самовоспламенения – наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний (электронагревательной печи) наблюдается воспламенение вещества во всем реакционном объеме. Определяющее влияние на температуру самовоспламенения оказывают состав горючего и окислителя, дисперсность и концентрация горючего и окислителя. При этом очевидно, что чем выше реакционная поверхность пыли, тем интенсивнее и при более низкой температуре протекает ее воспламенение и горение. Характерная особенность механизма воспламенения пыли заключается в тепловом взаимодействии частиц с газом-окислителем и облака, как целого, со стенками сосуда.

При теоретическом описании система исходных уравнений, как известно, включает в себя уравнения прогрева частицы, закон ее окисления и уравнение разогрева газовой среды (двухтемпературное приближение). В качестве признака воспламенения выступают условия потери устойчивости стационарных режимов (кинетический закон окисления, $n = 0$), либо условия срыва теплового квазистационарного равновесия системы (степенной закон окисления, $n \geq 1$). Аналитический и численный анализ дают следующие соотношения для определения температур самовоспламенения пылей и их зависимостей от параметров системы [17]:

$$n = 0: \quad \delta_{cr} = \frac{1}{e(1 + A)}, \quad (2)$$

$$n = 1: \quad A \frac{B}{1 - B} \Omega_{cr} \approx 1.2, \quad (3)$$

$$A = 1.5 \frac{\rho_g}{\rho_f} \frac{B}{1 - B} \frac{Nu}{Nu_w} \left(\frac{L}{d} \right)^2, \quad B = \frac{C_f}{C_f + \rho_g}, \quad \delta = \frac{QEd_p C_{ox}^\infty}{Nu \lambda RT_*^2} z e^{-\frac{E}{RT_*}},$$

$$\Omega = \left(\frac{3QE}{cRT_*^2} \right)^2 \frac{2cC_{ox}^2}{3\lambda d_p} De^{-\frac{E}{RT_*}}.$$

Здесь ρ – плотность, Nu – число Нуссельта, L – характерный размер газовой взвеси, d_p – диаметр частиц, C – массовая концентрация, Q – тепловой эффект, E – энергия активации, z – предэкспоненциальный множитель, T_* – значение температуры, относительно которой проводится разложение экспоненты по Фанк-Каменецкому, c – удельная теплоемкость, R – универсальная газовая постоянная.

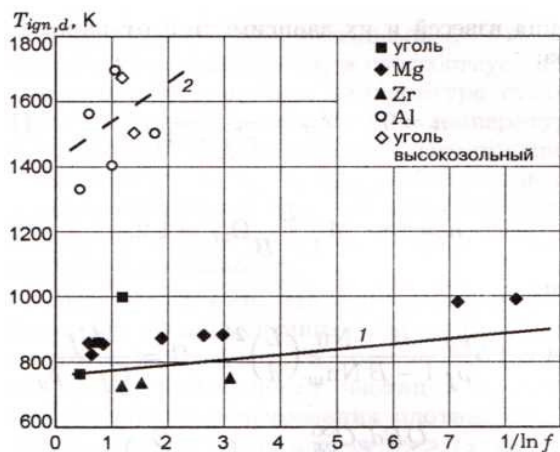


Рис. 1. Зависимость температуры воспламенения взвесей различных горючих от параметра f : 1 – линейный закон окисления частиц, 2 – параболический закон окисления частиц

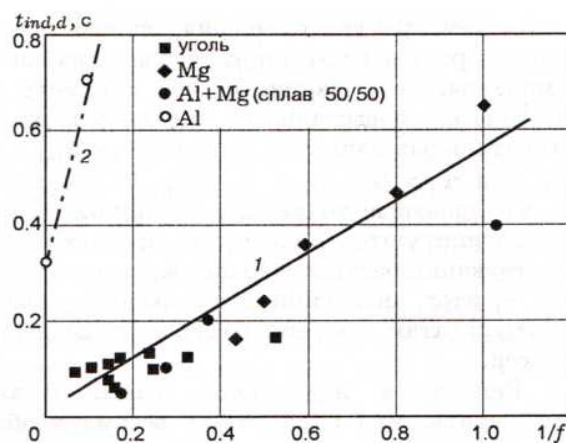


Рис. 2. Зависимость времени задержки воспламенения взвесей различных горючих от параметра f : 1 – линейный закон окисления частиц, 2 – параболический закон окисления частиц

ная, λ – коэффициент теплопроводности, D – коэффициент диффузии; индексом g - обозначены параметры газа, f – горючего, w – стенки, ox - окислителя, ∞ – условия на бесконечности, cr – критические значения величин.

Соотношения (2) и (3) с соответствующими константами хорошо описывают опытные данные и отражают физическую природу воспламенения, которое реализуется, когда скорость тепловыделения в системе превосходит скорость теплопотерь. Обычно роль коллективного эффекта в формулах (2) и (3) качественно и количественно характеризуются параметром A . Этот параметр удобно представить в виде:

$$A = \frac{\alpha}{\alpha_w} \frac{S_r}{S_h}, \quad (4)$$

где α , α_w – коэффициенты теплообмена от частицы к газу и от газа к стенке соответственно, S_r – реакционная поверхность, S_h – поверхность теплообмена, т.е. поверхность, с которой взвесь, как целое, отдает тепло в стенки или окружающую среду.

Если представить критические условия воспламенения (2) и (3) с учетом параметра $f = S_r / S_h$, то они приобретут вид, аналогичный критериям воспламенения одиночных частиц:

$$\delta_{cr}^s f = 1/e \text{ при } n = 0; \quad \Omega_{cr}^s f^2 \approx 2.34 \text{ при } n = 1. \quad (5)$$

Это позволяет удобно представлять экспериментальные данные для температур воспламенения пылей $T_{ign}(d)$ различных горючих в зависимости от $1/\ln f$ (рис. 1).

Как видно из рис. 1, экспериментальные точки для различных горючих [18-21], группируются вблизи двух кривых, кривой 1 (для $n = 0$) и кривой 2 (для $n = 1$), что указывает на соответствующие механизмы воспламенения разных горючих и подтверждает справедливость предлагаемого подхода к анализу критических условий воспламенения газозвесей. Интересно, что разные горючие

одинаково реагируют на изменения отношения $f = S_r / S_h$. Это связано, на наш взгляд, с тем, что это отношение не содержит характеристик конкретного горючего (в том числе и кинетических) и отражает только особенности пыли к накоплению тепла. Этот факт подтверждает активную роль реакционной поверхности дисперсной системы в процессе ее воспламенения.

Аналогичные закономерности проявляются и для другой важнейшей характеристики процесса воспламенения пыли – времени задержки воспламенения. В работах [22-26] аналитически установлена связь времени задержки воспламенения взвеси t_{ign} с параметрами дисперсной системы для линейного и параболического закона окисления:

$$t_{ign}^{n=0} \sim \frac{1}{f} e^{\frac{E}{RT_{mix}}}, \quad t_{ign}^{n=1} \sim \frac{1}{f^2} e^{\frac{E}{RT_{ign}}}, \quad (6)$$

где $T_{mix} = T_0^g - B(T_0^g - T_0^f)$ – температура смешения в начальный момент создания взвеси.

Графическое представление имеющихся экспериментальных данных (рис. 2) в координатах $T_{ign}(d) - 1/f$ показывает, что опытные данные для различных горючих группируются вблизи двух прямых, аппроксимирующих разные законы окисления.

Выводы. В заключение подчеркнем, что T_{ign} и t_{ign} являются не абсолютными (т.е. чисто физико-химическими), а относительными характеристиками активности пыли по отношению к процессу их воспламенения, поскольку зависят от внешнего параметра – размера реакционного сосуда. Поэтому сопоставление результатов, получаемых различными исследователями, возможно только при учете этого обстоятельства.

Показано, что характеристики воспламенения для различных горючих можно теоретически описать единым образом, исходя из законов окисления (линейного и параболического). Причем системообразующим параметром является отношение реакционной поверхности горючего к внешней поверхности теплообмена.

Литература:

1. ДСТУ 8829: 2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номеклатура показників і методи їх визначення. Класифікація. Київ, 2020
2. *Eckhoff, Rolf K.* Dust explosions in Processes Industries. – Cambridge. University Press, 1997. – 643p.
3. *Б.-Ц. Линь, В.С. Лу, И.З. Чжу.* Характеристики взрыва смесей наночастиц алюминия в воздухе // Физика горения и взрыва. – 2010, – Т.46, №6, – С.73 - 77.
4. *Castellanos, D., Carreto – Vazquez, V., Mashuga, C., Trother, R., Mejia, A. and Mannan, M.* The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminum dust // Powder Technology. – 2014, – V.254. – P.331 - 345.

5. *Li O., Wang K., Zheng Y., Mei and B. Lin* Explosions severity of micro-sized aluminum dust and its flame propagation properties in 20L spherical vessel // *Powder Tech.* – 2016, – V.301, – P.1299 - 1308.
6. *Dufaund O., Traore, M., Perrin, L., Chazelet S. and Thomas, D.* Experimental investigation and modeling of aluminum dusts explosions in the 20L sphere // *Journal of loss prevention the Process Industries.* – 2010, – V.23(2), – P.226 - 236.
7. *Santhanam, P., Hoffmann, V., Trunov, V., and Dreizin, E.* Characteristics of Aluminum Combustion Obtained from Constant - Volume Explosion Experiments // *Comb. Science and Technology.* – 2010, – V187(7), – P. 904-921.
8. *Liu, X. and Zhang, Q.* Influence of turbulent flow on the explosion parameters in micro- and nano- aluminum powder - air mixtures // *Journal of Hazardous Materials.* – 2015, – V.299, –P. 603-607.
9. *Опарин А.С., Буланин Ф.К., Сидоров А.Е., Полетаев Н.И., Шевчук В.Г.* Взрывные характеристики алюминиевой пыли // *Горение и плазмохимия* // – 2019, – С.86-94.
10. *D Bredly, M. Jawes, Ho – Young Park, N. Usta.* Modeling of laminar pulverized coal flame with speciated devolatilization and compressions with experiments // *Comb. and Flame.* – 2006, – V.144, –P.190 - 204.
11. *Недин В.В., Нейков О.Д., Алексеев А.Г., Кривцов В.А.* Взрывоопасность металлических порошков. – Киев: Наукова думка, 1971, – 118с.
12. *Корольченко А.Я.* Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник в 2-х томах // *Корольченко А.Я., Корольченко Д.А.: Пожнаука -2004г. 1-й том - 713 с., 2-й том - 774 с*
13. *Bartknecht W.* Dust Explosions. Course, Prevention, Protection – Springer Berlin, Heidelberg, – 1989, –270p.
14. *Ягодников Д.А.* Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах. – М.:Из-во МГТУ им. Н.Э Баумана, – 2018г. – 444с.
15. *Шевчук В.Г., Полищук Д.Д.* Фізичні основи пожежовибухонебезпеки. – Одеса: Астропринт, 2010, – 243 с.
16. *Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., Кулеши Дж., Стрелов У.* Взрывные явления. Оценки и последствия, в 2-х кн., –М.:Мир, 1986. 319с.
17. *Золотко А.Н., Вовчук Я.И., Шевчук В.Г., Полетаев Н.И.* Воспламенение и горение газозвеси // *Физика горения и взрыва,* – 2005, – Т.41, №6, – С.3-14.
18. *Киро С.А., Вовчук Я.И., Золотко А.Н., Клячко Л.А.* Воспламенение частиц зольного угля // *Физика горения и взрыва.* –1983.–Т.19, №5. – С.36-39
19. *Ежовский Г.К., Мочалова А.С., Озеров Е.С.* О возможности моделирования процессов воспламенения газодисперсных систем // *Горение конденсированных систем.* – Черногоровка:РИО ОИХФ, 1997. – С.84-87.
20. *Великанова В.Л., Золотко А.Н., Копейка К.М., Полищук Д.И.* Критические условия воспламенения взвеси частиц алюминия // *Физика аеродисперсных систем.* –1978. №17. – С.54-58.
21. *Копейка К.М., Золотко А.Н., Полищук Д.И.* Воспламенение совокупности частиц магния в воздухе // *Физика аеродисперсных систем.* –1974. №11. –С. 54-57.

22. Клячко Л.А. Воспламенение совокупности частиц при гетерогенной реакции // Теплотехника. – 1966. №8. – С.65-68.
23. Либрович В.Б., Лисицын В.И., Хайкин Б.И. Воспламенение газовой взвеси частиц металлов // ПМТФ. – 1974. №1. – С.75-83.
24. Лисицын В.И., Руманов Э.Н., Хайкин Б.И. О периоде индукции при воспламенении частиц // Физика горения и взрыва. – 1971. – Т.7, №1. – С.3-9.
25. Гуревич М.А., Озерова Г.Е., Степанов А.М. Расчет гетерогенного воспламенения совокупности частиц // Физика горения и взрыва. – 1971. – Т.7, №4. – С.518-527.
26. Полищук Д.И., Золотко А.Н., Копейка К.М. О природе индукции воспламенения взвеси частиц бора // Arch. Termodyn. i Spalania. – 1979. V.4.
27. Бойчук Л.В., Шевчук В.Г., Швець А.И. Распространение пламени в двухкомпонентных составах газовой взвесей алюминия и бора // Физика горения и взрыва. – 2002, – Т. 38, №6, – С.51-54.

Буланин Ф.К., Німич А.В., Опарін А.С., Сидоров О.Е., Шевчук В.Г.

**Фізичні аспекти пожежо- вибухонебезпечності горючого пилу.
Частина 1. Займання.**

Анотація

Виходячи з основних властивостей горючих систем – розподілених нелінійних нелінійними джерелами енергії і потокового зв'язку між елементами середовища – подано аналіз різних режимів реагування горючого пилу. В залежності від співвідношення характерного часу горіння (термокінетичні характеристики) та теплопередачі (масштабні характеристики) розглядаються граничні режими – самоспалахування, дифузійне горіння і автохвильове горіння. На відміну від газів, для пилу всі характеристики спалахування і горіння суттєво залежать від внутрішніх масштабів системи – розміру частинок і відстані між ними. В першій частині роботи аналізуються залежності температури самоспалахування й часу затримки спалахування від всіх фізико-хімічних характеристик пилу. Показано, що всі параметри для різних палив можливо описати єдиним способом, виходячи з законів окислення (лінійним чи параболічним), причому систематизуючим параметром f виявляється відношення реакційної поверхні твердого пального до зовнішньої поверхні теплообміну.

З врахуванням параметру f , що є відношенням реакційної поверхні пилу до зовнішньої поверхні теплообміну газозавису, отримані критичні умови займання у вигляді критерію, що аналогічний для займання одиночних частинок. Показано, що його можна використовувати для пилу як з лінійним, так і з параболічним законом окислення. Різні палива однаково реагують на зміну f , який не містить характеристик палива і відображає особливості пилу до накопиченню тепла. Так, температура займання є лінійною функцією від величини $1/\ln f$, а період індукції – $1/f$.

Температура займання і час затримки займання не є фізико-хімічними, а є відносними властивостями активності пилу по відношенню до процесу їх займання. Адже вони залежать від розміру реакційної посудини.

Ключові слова: металевий пил, аерозавис металів, займання суспензій, режими реагування пилу, самозаймання суспензій.

Bulanin F.K. , Nimich A.V., Oparin A.S., Sydorov A.E., Shevchuk V.G.
Physical aspects of fire and explosion hazard of combustible dust.
Part 1. Ignition.

SUMMARY

Based on the fundamental combustible systems properties - distributed nonlinear energy sources and flow connection between the environment elements - an analysis of various combustion dust modes is presented. Depending on the ratio between characteristic burning times (thermokinetic characteristics) and heat transfer (scale characteristics), limiting modes are considered as self-ignition, diffusion combustion and auto-wave combustion. Unlike gases, for dusts all the characteristics of ignition and combustion essentially depend on the internal system scales - particle sizes and distances between them. In presented part of the study, the critical ignition temperature dependences and the ignition delay time on all physicochemical dust parameters are analyzed. It is shown that these characteristics for various fuels can be described in a unified way, based on the laws of oxidation (linear and parabolic), with the systematizing parameter being the ratio of the solid fuel reaction surface to the external heat exchange surface.

Taking into account the parameter f , which is the ratio of the dust reaction surface to the external aerosuspension heat exchange surface of the dust, the critical ignition conditions are obtained in the form of a criterion similar to the single particles ignition. It is shown that it can be used for dust with both a linear and a parabolic oxidation law. Different fuels react in the same way to a change in f , which does not contain fuel characteristics and reflects the dust-heat accumulation capability. Thus, the ignition temperature is a linear function of $1/\ln f$, and the induction period is $1/f$.

The ignition temperature and ignition delay time are not physical or chemical, but are relative dust activity properties in relation to their ignition process. After all, they depend on the size of the reaction vessel.

Key words: *metal dusts, air suspensions of metals, ignition of suspensions, modes of reaction of dusts, self-ignition of suspensions.*