

# Горение аэрозолей и гибридных смесей

Лекция 8 по теории горения и взрыва для гр. ДБЖ-09

Горючая пыль – это дисперсная система, состоящая из твердых частиц размером менее 850 мкм, находящихся во взвешенном или осевшем состоянии в газовой среде, способная к самостоятельному горению в воздухе нормального состава.

Пыли по общей классификации коллоидно-дисперсных систем относятся к аэрозолям, в которых дисперсной средой является воздух, а дисперсной фазой – твёрдое вещество в раздробленном состоянии.

Пыль образуется при механическом измельчении твёрдых тел, а также при получении порошкообразных и пылеобразных веществ методами кристаллизации и сублимации.

Осевшая пыль называется аэрогелем (пыль – гель), пыль, находящаяся во взвешенном состоянии, называется аэрозолем (пыль – аэровзвесь); аэрогели и аэровзвеси являются гетерогенными системами.

Пыли горючих веществ являются пожаро- и взрывоопасными.

ГОСТ 12.1.044-84 ССБТ регламентирует следующие показатели пожаро- и взрывоопасности горючих аэрозолей и аэрогелей:

для горючих пылей во взвешенном состоянии: нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР), минимальная энергия зажигания, максимальное давление взрыва, скорость нарастания давления при разрыве, минимальное взрывоопасное содержание кислорода;

для пылей, находящихся в осевшем состоянии: температура воспламенения, температура самовоспламенения, температура самонагрева, температура тления, температурные условия теплового самовозгорания, минимальная энергия зажигания, способность гореть и взрываться при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами.

# Свойства, определяющие пожаро- и взрывоопасность пылей

Наиболее важными свойствами горючих пылей являются: дисперсность, химическая активность, адсорбционная способность, склонность к электризации.

Дисперсность – степень измельчённости частиц, чем меньше размеры частиц, тем выше дисперсность.

Химическая активность – способность пыли вступать в различными веществами, в том числе и в реакции окисления и горения.

Адсорбционная способность – это способность поверхности твёрдых частиц пыли поглощать пары и газы из окружающей среды.

Склонность пыли к электризации – способность пыли приобретать заряды статического электричества, которое возникает при размоле твердых веществ, транспортировании их по трубопроводам, а также при движении пылинок по воздуху.

## Горение аэродисперсных систем.

Дисперсная фаза представляет собой твердое или жидкое вещество, поэтому рассматривается как горение пыли или капель. Взвеси твердой фазы – взвеси аэрозолей диспергирования (получают при всех размольных процессах) – обычно получают неправильной формы:

аэрозоли конденсации получают при конденсировании пара или затвердевании разбрызгивающего жидкого металла, шарообразная форма частиц;

аэрозоли, полученные в результате дробления или измельчения стружки или пластинок приобретают своеобразную форму (игольчатая или шаровая), чаще всего форму частиц рассматривают как шарообразная.

Введем понятие «эквивалентный диаметр частиц»:

$$d_{\text{эке}} = \sqrt{\frac{6m}{n \cdot \rho \cdot \pi}}$$

где  $m$  – масса навески вещества;  $n$  – число частиц навески;  $\rho$  – плотность частицы.

Обычно используют другое соотношение: удельная поверхность порошка – поверхность, отнесенная к единице массы, которую определяют экспериментально\*. Масса одной частицы:

$$\frac{3}{4} \pi \cdot R^3 \cdot \gamma = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \gamma$$

Число частиц можно рассчитать по формуле:

$$\frac{1}{\pi \cdot d^3 \cdot \gamma / 6} = \frac{6}{\pi \cdot d^3 \cdot \gamma}$$

Удельную поверхность можно рассчитать по формулам:

$$S_{\text{уд}} = \frac{6}{\pi \cdot d^3 \cdot \gamma}$$

$$\pi \cdot d^2 = \frac{6}{\gamma \cdot d}$$

$$d = \frac{6}{\gamma \cdot S_{\text{уд}}}$$

Скорость осаждения одиноких частиц при низких значениях числа Рейнольдса оценивают по закону Стокса:

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} (\rho_m - \rho_v) \cdot g = 3 \cdot \pi \cdot V_0 \cdot d \cdot \mu_v,$$

где  $\rho_m$  – плотность частиц;  $\rho_v$  – плотность воздуха;  $3 \cdot \pi \cdot V_0$  – скорость осаждения частиц;  $d$  – диаметр частиц;  $\mu_v$  – вязкость воздуха;

Если пренебречь плотностью воздуха ( $\rho_v$ , значительно меньше плотности частиц), то:

$$V = \frac{\rho_m \cdot d^2 \cdot g}{18 \cdot \mu_v}$$

Зная скорость осаждения частицы, можем оценить время существования аэрозоли. Особенности процесса осаждения: нагретые частицы увеличивают устойчивость и скорость горения аэрозвеси (выделяется большое количество тепла, и аэрозвеси становятся более устойчивыми, чем предсказывал Стокс).

Горение в слое аэрозвесей – гетерогенное горение, скорость горения будет определяться скоростью движения воздуха над металлом (с увеличением скорости движения воздуха скорость горения сначала увеличивается до определенной величины, а затем уменьшается).

Направление движения потока воздуха также влияет на скорость горения, если поток воздуха совпадает с направлением горения, то скорость горения увеличивается, если же движение воздуха противоположно направлено, то скорость горения может и увеличиваться и уменьшаться.

Направленность горения в пространстве, для пыли горение снизу вверх распространяется гораздо быстрее, чем сверху вниз. По поверхности порошка скорость распространения пламени на порядок выше, чем внутрь порошка, так как увеличивается диффузия воздуха.



## Факторы, влияющие на характеристики горения аэровзвесей

Концентрационные пределы распространения пламени – НКПР – определяются температурой горения; эта величина зависит от вида порошков и дисперсности (минимальное значение НКПР – 30-40 г/м<sup>3</sup>).

ВКПР для рассмотренных твердых аэровзвесей равен 30-40 кг/м<sup>3</sup>, однако на практике этими значениями практически не пользуются (~ 60 кг/м<sup>3</sup> – критическое значение ВКПР).

НКПР зависит от дисперсности, с уменьшением степени дисперсности аэровзвесей уменьшается скорость горения аэровзвесей. Эта зависимость необходима, чтобы оценить пожаровзрывобезопасность, так как крупные частицы оседают быстрее, чем мелкие пропорционально квадрату их диаметра. Если система большая, то сначала сгорают более крупные частицы.

Зависит от направления потока воздуха, если поток окислителя направлен снизу вверх, то пыль больше времени находится в воздухе и поток препятствует ее оседанию.

зависит от геометрических параметров системы.

Зависит от мощности зажигаемого импульса.

Зависит от концентрации кислорода в воздухе (если концентрация кислорода в воздухе уменьшается, то уменьшается скорость горения аэровзвесей).

Скорость горения аэровзвесей зависит от тех же факторов, что и НКПР и приблизительно такого же порядка, как для горения пыли; наличие конвекции (горение снизу –вверх это и есть, собственно, конвекция), процесс перехода горения в детонацию идентичен таким же процессам в газовых системах, кроме наличия вторичных взрывов.

Вторичные взрывы – горение в слое окислителя отдельно в газовой среде.

Первичный взрыв сам создает взрывоопасную среду и инициирует процессы в нем, взмучивает осевшую пыль в имеющемся объеме и вызывает вторичный взрыв, тогда пыль частично оседает.

Существуют гетерогенные взрывные процессы, которые существенно отличаются от вторичных взрывов, эти гетерогенные взрывы характерны для осевшей пыли. Взрывной процесс сам себе подготавливает среду. Скорость гетерогенного взрывного процесса равен 800-1000 м/с.

## При переходе от горения одиночной частицы к горению аэровзвесей следует отметить:

- коллективный эффект – наличие взаимодействия между частицами в аэровзвесах; для металлов коллективный эффект проявляется сильнее, чем для органической пыли; органическая пыль – легкокипящая, легко разлагающаяся, быстро переходит в газ. Металл горит в твердой фазе, это означает, что для него появление коллективного эффекта более важно (коллективный эффект исчезает только после сгорания металла);
- масштабный фактор рассматривает зависимость давления взрыва от масштаба системы, чем меньше система, тем больше теплотери; при увеличении размеров системы увеличивается взрывное давление, уменьшается НКПР; твердые частицы находятся во взвешенном состоянии, поэтому увеличивается время осаждения, и, чем лучше защитные свойства оксидной пленки металла, тем дольше она не загорается; чем больше геометрические размеры системы, тем опаснее последствия взрыва. При увеличении масштабов системы уменьшается скорость нарастания давления, образуется воспламенение в определенной точке объема и затем распространяется по системе, а максимальное давление достигается только при полном выгорании системы.  
$$\frac{dP}{dt} \cdot R^3 = const$$
- где  $\frac{dP}{dt}$  – скорость нарастания давления, чем больше объем системы, тем меньше скорость нарастания давления и меньше динамическая нагрузка.

Гибридными смесями называются пылевоздушные смеси – тройные смеси, образующиеся при сушке органических материалов; угольные пыли очень часто образуются пылевоздушные смеси метан – уголь – воздух. Гибридные смеси также образуются при взаимодействии порошков металлов с водой.

### Особенности горения гибридных смесей:

- наличие горючего газа, даже при незначительной его концентрации в 2-3 раза снижает нижний концентрационный предел распространения пламени пыли;
- наличие горючего газа увеличивает скорость нарастания давления и значение взрывного давления пыли воздушной смеси;
- наличие горючего газа снижает минимальное взрывоопасное содержание кислорода и увеличивает флегматизирующую концентрацию инертных газов; для порошков металлов минимальное взрывное содержание кислорода 6 %, в присутствии азота концентрация кислорода увеличивается;
- вероятность возникновения взрыва увеличивается при увеличении энергии зажигания. Для газов она на два порядка выше, чем для пыли, поэтому наличие газов в смеси резко увеличивает вероятность взрыва.