

Доклад-4: ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЫЛИ С НИЗКОЙ ВЗРЫВООПАСНОСТЬЮ В 20-Л КАМЕРЕ

Полетаев Н.Л.

ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Московская область, г.Балашиха

nlpvniipo@mail.ru

Известно [1], что экспериментальное исследование взрывов пыли с низкой взрывоопасностью в камере объемом 20 л приводит к завышенным показателям взрыва. Поскольку исследования пыли в данной камере включены в стандарты многих стран, появляется риск качественной ошибки, когда невзрывоопасную, но горючую пыль (НГП) сочтут взрывоопасной горючей пылью (ВГП), чем вызовут неоправданные затраты на обеспечение безопасности производств с участием этой пыли. Имеется три эмпирических правила "недоверия" результатам, полученным в 20-л камере:

1) если при исследовании в 20-л камере US Bureau of Mines (USBM) пыль взрывается при энергии пиротехнического источника зажигания $E_{ig} = 5$ кДж, но индекс взрывоопасности пыли $K_{st} < 0,15$ МПа·м·с⁻¹, то весьма вероятно, что данная пыль по результатам испытаний в 1-м³ камере будет отнесена к НГП [2];

2) если пыль в 20-л камере Р. Сивека не взрывается при $E_{ig} = 2,5$ кДж, но взрывается при $E_{ig} = 5$ кДж или $E_{ig} = 10$ кДж, рекомендуется исследовать пыль в камере объемом 1 м³ [3];

3) если в 20-л камере Р. Сивека при использовании ИЗ с $E_{ig} = 10$ кДж получено значение $K_{st} < 4,5$ МПа·м·с⁻¹, то весьма вероятно, что данная пыль по результатам испытаний в камере объемом 1 м³ будет отнесена к НГП [4].

Последнее правило в стандарте [5] формулируется в менее жесткой, но обидной для использующих 20-л камеру форме: "Данная камера предназначена для имитации результатов исследований в 1-м³ камере. Если исследование пыли в 20-л камере приводит к значению $K_{st} < 5$ МПа·м·с⁻¹, то тестирование этой пыли в 1-м³ камере может привести к более низкому значению K_{st} ". Возможность превращения недостатка 20-л камеры в ее преимущество будет рассмотрено ниже.

Рекомендации, основанные на предположении "весьма вероятно, пыль будет отнесена к НГП", не достаточно убедительны для обоснования необходимости проведения дорогостоящих исследований взрывоопасности пыли в 1000-л камере.

В настоящей работе выполнен количественный анализ причин завышения взрывоопасности пыли. Показано, что тестирование в 20-л камере (в отличии от тестирования в 1000-л камере) не отвечает заявленным в методиках нормальным начальным условиям исследования (давлению 100 кПа, температуре 25 °С) и является исследованием взрывов пыли при повышенной на несколько десятков градусов начальной температуре и повышенном начальном давлении в камере. К росту начальной температуры взрывов пыли на величину порядка нескольких десятков градусов приводят два процесса:

- распыление дисперсного материала в предварительно вакуумированной камере импульсом сжатого воздуха из ресивера с одновременным восстановлением абсолютного давления в камере до величины порядка 100 кПа;

- адиабатическое сжатие аэрозвеси при срабатывании источника зажигания и местном выгорании пыли, оказавшейся в пламени или вблизи пламени источника зажигания.

Последний процесс приводит к росту начального давления в камере.

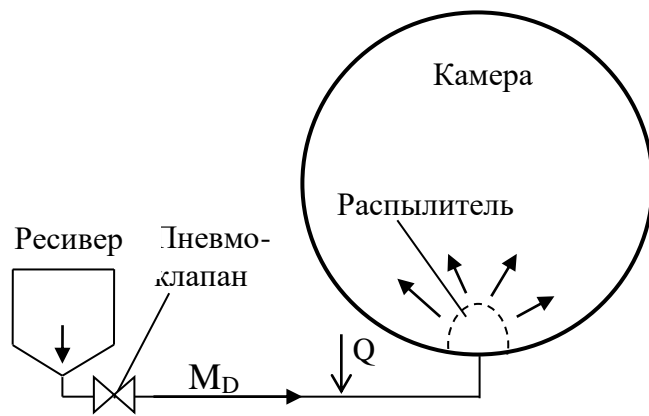


Рис. 1. Схема распыления

Схема распыления навески MD дисперсного материала, размещаемого, как правило, в ресивере (у его выходного патрубка) или в трубопроводе, соединяющем выход ресивера с камерой (рис 1.) Параметры нескольких известных методик исследования взрывоопасности пыли приводятся в табл. 1. (список обозначений приводится в конце текста доклада)

Таблица 1. Основные параметры методик исследования взрывоопасности пыли

Камера		Ресивер		Время распыления, 10^{-3} с	Энергия ИЗ E_{ig} , кДж	Задержка зажигания t_d , 10^{-3} с	Автор или фирма
V_c , 10^{-3} м ³	$P_{c,0}$, кПа	V_R , 10^{-3} м ³	$P_{R,0}$, МПа				
20	40	0,6	2,1	40 ¹	2; 10	60	Р. Сивек [6]
20	14	16	1	300 ²	2,5; 5; 10	400	USBM [2]
18,7	65	0,76	1	100 ^{1,2}	2,5; 5	110	ВНИИПО (№ 1)
17,6	40	0,76	1,5	100 ^{1,2}	2,5; 5	110	ВНИИПО (№ 2)

Место начального размещения образца пыли: ¹ - ресивер, ² - трубопровод.

Начальная температура пыли, воздуха в камере и воздуха в ресивере равна комнатной температуре, однако процесс распыления приводит увеличению температуры среды в камере. Действительно, за время процесса распыления (см. рис. 1) воздух в ресивере совершает работу по вытеснению определенной части своей массы и образца пыли M_D в камеру, вследствие чего охлаждается. Работа переходит в кинетическую энергию потока вытесняемого в камеру воздуха и пыли, а затем в тепловую энергию среды в камере из-за вязкости воздуха. Дополнительная энергия Q поступает к охлажденному потоку воздуха из ресивера путем теплопередачи от конструкций установки (на узком участке от выхода из ресивера до отверстий распылителя). К концу процесса распыления вложенная в

поток энергии приведет к росту температуры воздуха и пыли в камере по отношению к начальной температуре. Оценки прироста температуры имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Для методик Р. Сивека и ВНИИПО:} \\ \Delta T_{1,\min} \approx T_0(1 + \Theta)^{-1}[(P_{R,0}/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1](V_R/V_C), \\ \Delta T_{1,\max} \approx T_0(1 + \Theta)^{-1}(\gamma - 1)(P_0 - P_{C,0})/(\gamma P_0). \\ \text{Для методики USBM:} \\ \Delta T_1 \approx T_0(1 + \Theta)^{-1}(\gamma - 1)(P_0 - P_{C,0})/[P_0 + (\gamma - 1)P_{C,0}], \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\Theta = c_D M_D / (c_V M_{C,1})$; значения $\Delta T_{1,\min}$ и $\Delta T_{1,\max}$ отвечают оценке ΔT_1 , выполненной для случая $Q = 0$ и $Q = Q_{\max}$ соответственно; различие между $\Delta T_{1,\min}$ и $\Delta T_{1,\max}$ для методики USBM пренебрегается из-за незначительного изменения T_R при распылении. Результат оценок приводится в табл.1.

Проверку расчетной оценки ΔT_1 осуществляли на установках ВНИИПО косвенно: по снижению давления в камере после распыления. Релаксацию давления объясняли охлаждением среды до температуры T_0 стенками камеры.

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные оценки прироста начальной температуры в камере ΔT_1 , град при заполнении ее воздухом из ресивера

	USBM	Р. Сивек		ВНИИПО (№1)		ВНИИПО (№2)	
	ΔT_1	$\Delta T_{1,\min}$	$\Delta T_{1,\max}$	$\Delta T_{1,\min}$	$\Delta T_{1,\max}$	$\Delta T_{1,\min}$	$\Delta T_{1,\max}$
Расчет ($\Theta = 0$)	97	12	51	12	34	15	51
Опыт ($\Theta = 0$)	...	...	...	$\Delta T_{1,\exp} = 16$		$\Delta T_{1,\exp} = 22$	
Расчет ($\Theta = 0,4$)	69	9	36	9	24	11	36
Опыт ($\Theta = 0,4$)	...	...	...	...		$\Delta T_{1,\exp} = 16$	

Оценка температуры аэровзвеси T_2 после срабатывания ИЗ и локального выгорания пыли вблизи ИЗ предполагает адиабатический характер процесса

$$T_2 = T_1 \cdot (P_{m,1}/P_1)^{(\gamma-1)/(\gamma+\Theta)}, \quad (2)$$

где T_1 , P_1 - температура и абсолютное давление аэровзвеси к моменту зажигания, $P_{m,1}$ - наибольшее экспериментально измеренное абсолютное давление аэровзвеси к моменту достижения температуры T_2 .

Значение T_1 учитывает прирост начальной температуры аэровзвеси за время распыления, $P_1 \approx 100$ кПа в соответствии с методикой исследования в 20-л камере. Оценка $P_{m,1}$ иллюстрируется информацией об испытаниях пыли антрацита на рис.2. Пыль антрацита относится к НГП и не взрывается в камере объемом 1 м^3 , в которой начальные условия испытаний совпадают с нормальными условиями.

Согласно данным рис.2, результаты испытаний можно разделить на два вида: пыль антрацита либо не взрывается (нижняя ветвь значений P_m), либо взрывается (верхняя ветвь значений P_m). Отсюда следует, что для антрацита $P_{m,1} \approx 300$ кПа. С учетом данных табл.1 и (2) получим для аэровзвеси антрацита $T_2 \approx 140$ °С.

Рассмотренный пример показал возможность оценки условий возникновения

взрывоопасности у НГП благодаря "недостаткам" 20-л камеры.

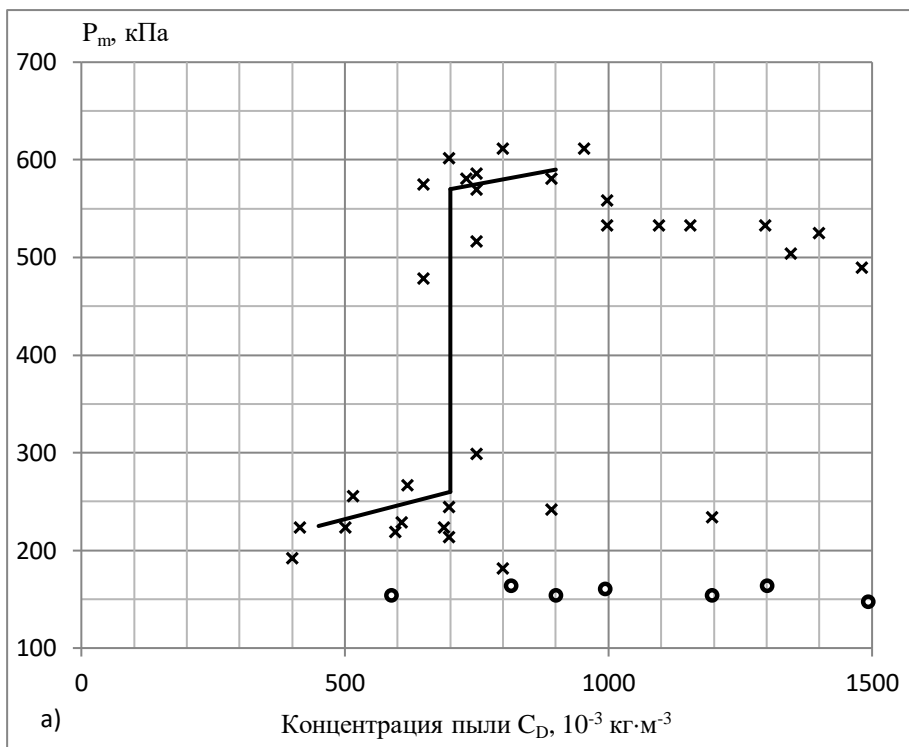


Рис. 2. Зависимость максимального давления (а) и нормированной максимальной скорости его нарастания (б) от концентрации антрацита, полученная на установке USBM для двух энергий источника зажигания (О- 2,5 кДж; X- 5 кДж) [3].

Выводы работы также можно проиллюстрировать на примере аэровзвеси меламина, для которого минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) в воздухе лишь незначительно превышает нормальное содержание кислорода в воздухе $20,7 \pm 0,1$ % об. [7]. Поскольку с ростом температуры аэровзвеси МВСК снижается, взрывобезопасный (по результатам исследования в 1000-л камере) меламин оказывается взрывоопасным по результатам исследования в 20-л камере.

Перечень использованных сокращений, обозначений и индексов

Сокращения	Значение	
ВГП	-	Взрывоопасная горючая пыль
НГП	-	Невзрывоопасная горючая пыль
ИЗ	-	Пиротехнический источник зажигания
USBM	-	US Bureau of Mines
Символы	Значение	
C_D	-	Концентрация пыли в аэровзвеси
c_D, c_v	-	Средняя теплоемкость пыли и воздуха
E_{ig}	-	Энергия источника зажигания
K_{st}	-	Индекс взрывоопасности пыли
M_D	-	Масса пыли для единичного опыта
P	-	Давление, без индекса "R" относится к камере
P_m	-	Максимальное значение $P(t)$ в опыте
ΔP	-	Изменение давления в камере
Q	-	Энергия, переданная теплопередачей
R	-	Универсальная газовая постоянная
t	-	Время
t_d	-	Задержка зажигания
T	-	Температура, без индекса "R" относится к объектам в камере
ΔT	-	Изменение температуры аэровзвеси в камере
V	-	Объем
$V_{0,R}$	-	Начальный объем воздуха, не покидающего ресивер
Θ	-	Отношение теплосодержаний фаз аэровзвеси
γ	-	Показатель адиабаты для воздуха
Индексы	Принадлежность параметров	
0, 1, 2	-	к моменту: начальному, завершения распыления и срабатывания ИЗ и локального выгорания аэровзвеси
C, D, R	-	к камере, пыли и ресиверу
max (min)	-	максимальное (минимальное) значение

Список литературы

1. Eckhoff R. K. Dust explosions in the process industries 3rd edition, 720 pages, Gulf Professional Publishing/Elsevier, Boston, 2003. - 720 p. ISBN 0-7506-7602-7
2. Hertzberg M., Cashdollar K. L., Zlochower I. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences / Twenty-first Symposium (International) on Combustion /The Combustion Institute, 1986. Pp. 303-313. doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80258-3
3. Cashdollar, K. L., Chatrathi, K., “Minimum Explosible Dust Concentrations Measured in 20-L and 1-m³ Chambers,” Combustion Science and Technology, Vol. 87, pp. 157–171, 1993. doi.org/10.1080/00102209208947213
4. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the "20 l sphere" and with the standard "ISO 1m³ vessel". Systematic comparison and analysis of the discrepancies / Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 20 (2007) 599–606. doi:10.1016/j.jlp.2007.04.032
5. NFPA 68: Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, 2013.
6. Cesana C., Siwek R. Operating Instructions 20-l-Apparatus. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden, 2009.
7. Полетаев Н.Л. О взрывоопасности аэровзвеси меламина – Пожаровзрывобезопасность, 2017, Т. 26, № 9, с. 15-28.
DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28.