

Н. Л. ПОЛЕТАЕВ, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: nlpvniipo@mail.ru)

УДК 614.841.4

О ПРОБЛЕМЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ НИЗКОЙ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ГОРЮЧЕЙ ПЫЛИ В 20-ЛИТРОВОЙ КАМЕРЕ

Выполнен количественный анализ причин ошибочного отнесения невзрывоопасной, но горючей пыли к взрывоопасной по результатам исследования в 20-л камере. Показано, что тестирование аэровзвеси в 20-л камере происходит при повышенных по сравнению с нормальными (25 °С, 100 кПа) начальной температуре среды и начальном давлении в камере. Показано также, что к росту начальной температуры аэровзвеси приводят два процесса: распыление дисперсного материала в камере импульсом сжатого воздуха из ресивера; адиабатическое сжатие аэровзвеси при срабатывании источника зажигания и локальном выгорании пыли, оказавшейся в пламени и/или вблизи пламени источника зажигания, причем последний процесс вызывает рост начального давления в камере. Предложен новый надежный критерий взрыва пыли, основанный на ограничении разнообразия развития зажигания аэровзвеси двумя сценариями (Cashdollar and Chatrathi, 1993), а именно локальным выгоранием пыли в некоторой окрестности источника зажигания и взрывом пыли, охватывающим весь объем камеры, и на существенном отличии скачков давления в камере, ожидаемых для разных сценариев. На основе данных результатов для аэровзвеси антрацита, исследованной в 20-л камере US Bureau of Mines, предсказана взрывоопасность при температуре 140 °С, а также предложены способы реализации экспериментального исследования пыли с низкой взрывоопасностью при начальных условиях, близких к нормальным.

Ключевые слова: взрыв пыли; 20-л камера; критерий взрыва; низкая взрывоопасность; высокое LOC; антрацит.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20

Введение

Известно [1], что при высокой степени измельчения твердого горючего материала может образоваться дисперсный материал, способный распространять волну горения в состоянии аэровзвеси при нормальных условиях (давлении воздуха $P = 100$ кПа, температуре аэровзвеси $T = 298$ К, или 25 °С) и объемном содержании кислорода в воздухе (представляющем собой для простоты смесь кислорода и азота) $C_{O_2} = 0,21$. Такой дисперсный материал называют взрывоопасной горючей пылью (ВГП), а распространяющую пламя аэровзвесь — взрывоопасной аэровзвесью. Полагают, что распространение пламени по аэровзвеси ВГП при нормальных условиях возможно лишь при значении C_{O_2} в воздухе, превышающем критическое значение, именуемое минимальным взрывоопасным содержанием кислорода (LOC, от англ. *limiting oxygen concentration*), и в определенном диапазоне концентраций взвешенной пыли, зависящем от C_{O_2} . Границы указанного диапазона называют нижним (LEL, от англ. *lower explosion limit*) и верхним концентрационны-

ми пределами распространения пламени. Вне этого диапазона концентраций пыли аэровзвесь не распространяет горение, т. е. является невзрывоопасной. Для ВГП, очевидно, при нормальных условиях $LOC \leq 0,21$.

Наряду с ВГП, встречаются невзрывоопасные горючие пыли (НГП), аэровзвеси которых при нормальных условиях и $C_{O_2} = 0,21$ не распространяют горения ни при какой концентрации взвешенной пыли (LEL отсутствует). Взрывобезопасность горючих пылевидных материалов может быть вызвана, например, недостаточно малым размером частиц или присутствием в составе этих материалов компонентов, оказывающих флегматизирующее или ингибирующее воздействие на распространение пламени по аэровзвеси [2]. Широко известной НГП является антрацит [1]. Очевидно, что для НГП при нормальных условиях $LOC > 0,21$.

Естественно предположить, что всякая конкретная горючая пыль по результатам экспериментального исследования должна быть однозначно классифицирована, т. е. отнесена либо к ВГП, либо к НГП.

Данная процедура не вызывает у экспериментаторов сомнений при ярко выраженной взрывоопасности пыли или при отсутствии признаков взрыва в испытаниях, заведомо способствующих завышению взрывоопасности пыли. Проблема классификации пыли возникает лишь в том случае, когда ее аэровзвесь проявляет низкую взрывоопасность. Последнее указывает на принадлежность “проблемной” пыли к приграничной области между ВГП и НГП. Близость пыли к этой границе разумно характеризовать величиной LOC, которая для “проблемной” пыли, очевидно, удовлетворяет соотношению $LOC \approx 0,21$.

Как будет показано ниже, реальные условия стандартного исследования взрывоопасности пыли в силу различных обстоятельств отличаются от нормальных. Это влияет на величину LOC пыли и, следовательно, может привести к ошибочной классификации “проблемной” пыли. Классификация такой пыли усложняется еще из-за того, что параметры P и T , по значениям которых определяются нормальные условия испытаний, не являются исчерпывающей характеристикой всех факторов, влияющих на взрывоопасность пыли в конкретных экспериментах. К важнейшим из таких факторов относится склонность частиц пыли к агломерации и несовпадение дисперсного состава образца полидисперсной пыли от опыта к опыту.

Таким образом, проблему экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли следует считать весьма сложной. Цель настоящей работы — исследование некоторых аспектов этой проблемы, формулировку которых целесообразно предварить уточнением определения термина ВГП и кратким изложением истории возникновения современных методов ее исследования.

1. История проблемы и постановка задачи

Термин ВГП не имеет единого определения в действующей нормативной литературе, но можно выделить два основных варианта его толкования. Пример одного из толкований имеется в стандарте [3]. Комбинированием определений терминов “combustible dust” и “explosive dust atmosphere”, приведенных в данном стандарте, получим первое определение ВГП: “Твердые частицы размером не более 500 мкм, способные при нормальных условиях образовывать в открытом воздушном пространстве взвесь, в которой после воспламенения происходит самоподдерживающееся, т. е. ограниченное только габаритами аэровзвеси, распространение пламени”.

Другой вариант толкования термина ВГП имеется в стандарте [4]. Путем комбинирования определений терминов “combustible dust” и “dust explosion hazard area” получим второе определение ВГП:

“Тонкоизмельченный горючий твердый материал, взвесь которого в воздухе внутри герметичного объема при нормальных начальных условиях способна в определенном диапазоне концентраций горючего распространять пламя, представляющее опасность разрушения оболочки данного объема давлением продуктов горения”.

Приведенные определения ВГП не эквивалентны. Из общих соображений следует, что только первое определение, предполагающее стационарные условия движения пламени по аэровзвеси, соответствует теоретическим представлениям о качественном различии ВГП и НГП. Однако трудности создания стационарных (или квазистационарных) условий обращения исследуемых аэровзвесей в гравитационном поле Земли привели к тому, что широко используется в настоящее время лишь второе определение, имеющее, очевидно, прикладной характер. Выбору основного определения ВГП способствовали изменения в области экспериментального изучения горения аэровзвесей за последние несколько десятилетий.

Начало изменениям положило решение фирм BASF, Bayer, Ciba-Geigy и Hoechst об организации в 1966 г. рабочей группы во главе с В. Барткнехтом (W. Bartknecht), перед которой была поставлена задача — создать объективный экспериментальный метод оценки взрывоопасности пыли и разработать надежные методы исключения или ослабления разрушительных последствий взрыва пыли [5]. Данное решение промышленных корпораций было вызвано участвовавшими случаями аварий, сопровождавшихся пылевыми взрывами, и неудовлетворительным состоянием экспериментальных методов исследования взрывоопасности аэровзвесей пылевидных материалов, в которых использовались в основном малообъемные (от 1,3 до 8,0 л) взрывные камеры [1].

Финансируемые упомянутыми фирмами работы завершились созданием метода исследования в герметичной реакционной камере (далее — камере) объемом 1 м³, который впоследствии был стандартизован [6]. Поскольку исследованиями в камере такого объема установлено, что взрывоопасность аэровзвеси нередко проявляется при использовании энергоемкого пиротехнического источника зажигания (ИЗ), источник зажигания в этой камере имеет запас энергии $E_{ig} = 10$ кДж. Проведение исследований в крупномасштабной камере сопровождается значительными расходами дисперсных материалов и высокими затратами. В связи с этим рядом сотрудников рабочей группы во главе с Р. Сивеком (R. Siwek) был разработан метод исследования [7] в сферической или квазисферической камере объемом порядка 20 л, где с учетом упомянутой особенности проявления аэровзвесями взрывоопасно-

сти также используется энергоемкий ИЗ (E_{ig} от 2 до 10 кДж). Как в 20-л, так и в кубометровой камере критерием взрыва исследуемой аэровзвеси является превышение возникающим в камере давлением определенного порогового значения, что отвечает содержанию второго определения ВГП.

В дальнейшем 20-л камера была использована во многих нормативных документах в качестве эквивалентной замены камеры объемом 1 м^3 и оказалась в настоящее время основным инструментом исследования ВГП. Уже на стадии создания 20-л камеры отметили количественные отклонения полученных в ней данных от результатов исследования в камере объемом 1 м^3 . Причины этого несоответствия объяснялись различием удельной площади поверхности разномасштабных камер и турбулентных состояний аэровзвеси [1]. Результаты, полученные в камере объемом 1 м^3 , считают более надежными, поскольку большие размеры камеры, с одной стороны, позволяют улучшить соответствие выводов исследований первому определению термина ВГП, а с другой — сопоставимы с размерами промышленных аппаратов. В связи с этим результаты исследования в 20-л камере подвергаются определенной математической корректировке для приведения в соответствие с результатами, которые ожидают получить в камере объемом 1 м^3 [7].

Впоследствии обнаружили дисперсные материалы, которые по результатам исследований в 20-л камере относили к ВГП, а по более надежным результатам исследования в камере объемом 1 м^3 — к НГП [8–10]. Отмеченные случаи завышения опасности НГП не имели четких признаков, однако способствовали появлению трех эмпирических правил “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 при этом индекс взрывоопасности пыли $K_{st} < 0,15$ МПа·м/с, то весьма вероятно, что данная пыль по результатам испытаний в кубометровой камере будет отнесена к НГП [9];
- 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, то рекомендуется исследовать пыль в камере объемом 1 м^3 [10];
- 3) если в 20-л камере Р. Сивека при использовании ИЗ с $E_{ig} = 10$ кДж получено значение K_{st} менее $4,5$ МПа·м/с, то весьма вероятно, что данная пыль по результатам испытаний в камере объемом 1 м^3 будет отнесена к НГП [8].

Последнее правило в стандарте [11] формулируется в менее жесткой, но обидной для использующих

20-л камеру форме: “Данная камера предназначена для имитации результатов исследований в камере объемом 1 м^3 . Если при исследовании пыли в 20-л камере получено значение K_{st} менее 5 МПа·м/с, то тестирование этой пыли в камере объемом 1 м^3 может привести к более низкому значению K_{st} ”. Возможность превращения недостатка 20-л камеры в ее преимущество будет рассматриваться в разд. 5.

Не отрицая положительной роли эмпирических правил “недоверия”, отметим их серьезный недостаток. Исполнение рекомендации “исследовать взрывоопасность пыли в камере объемом 1 м^3 ” сопряжено с намного большими, чем при исследовании в 20-л камере, финансовыми затратами и требует достаточной уверенности в необходимости такого исследования. Такую уверенность не порождают формулировки правил с расплывчатым оборотом “весьма вероятно”. Необходимо выявлять и анализировать процессы, способствующие качественному завышению опасности НГП в 20-л камере. К настоящему времени известны два таких процесса, ясно сформулированные в [10]:

I — локальное горение НГП в пламени ИЗ, приводящее к такому скачку давления в камере, который может быть принят за взрыв аэровзвеси;

II — существенное изменение начальных условий исследования свежей (т. е. находящейся вне зоны теплового влияния ИЗ) аэровзвеси НГП, которое переводит невзрывоопасную аэровзвесь во взрывоопасную и вызывает взрыв аэровзвеси во всем объеме камеры. Изменение опасности аэровзвеси авторы [10] связывали с повышением температуры свежей аэровзвеси под воздействием скачка давления в камере, вызванного первым процессом.

В то же время анализ процессов I и II, позволяющий выявить надежный признак взрыва НГП в 20-л камере, а также оценить для этого случая реальные начальные условия распространения пламени по свежей аэровзвеси, не был сделан ни в [10], ни в других работах, где завышение опасности НГП в 20-л камере получило название “overdrive”.

Известна оценка влияния энергии ИЗ E_{ig} на температуру исследуемой аэровзвеси в объеме 20-л камеры [8]. Однако пренебрежение неравномерностью нагрева среды в камере приводит к значительному завышению при данной оценке реального увеличения температуры исследуемой аэровзвеси, что препятствует использованию этой оценки. В [12] численно исследовали вытеснение частиц из слоя аэровзвеси, прилегающего к ИЗ, к стенкам камеры ударной волной, порожденной срабатыванием ИЗ. При этом ИЗ, производящий в основном конденсированные продукты горения, заменялся сжатым и нагретым газом с той же массой и тем же запасом энергии, 50 % которой расходуется на создание ударной волны. Хотя результат данной работы может привести

к уточнению массы НГП, выгорающей в области теплового влияния ИЗ, отсутствие экспериментальной проверки этого результата удерживает от его использования.

Таким образом, количественный анализ причин появления качественной ошибки при оценке взрывоопасности пыли в 20-л камере и поиск способов ее устранения представляется весьма актуальным. Настоящая работа посвящена:

- выявлению надежного признака взрыва аэровзвеси в 20-л камере;
- расчетно-экспериментальной оценке начального давления и температуры исследуемой аэровзвеси в 20-л камере; при оценке начальной температуры, наряду с известным механизмом нагрева аэровзвеси при срабатывании ИЗ [10], учитывается предварительный нагрев аэровзвеси, сопровождающий распыление дисперсного материала в 20-л камере;
- обсуждению возможных способов экспериментального выявления низкой взрывоопасности горючей пыли без применения крупномасштабного оборудования.

В качестве примера использования полученных в настоящей работе результатов приводится оценка температуры, при которой аэровзвесь антрацита, исследованная в [10], становится взрывоопасной.

Список использованных сокращений и обозначений приводится в конце работы.

2. Особенности методики исследования

В настоящей работе используются результаты исследований взрывоопасности аэровзвесей в 20-л камере при нормальных начальных условиях. Методика исследований допускает разнообразие парамет-

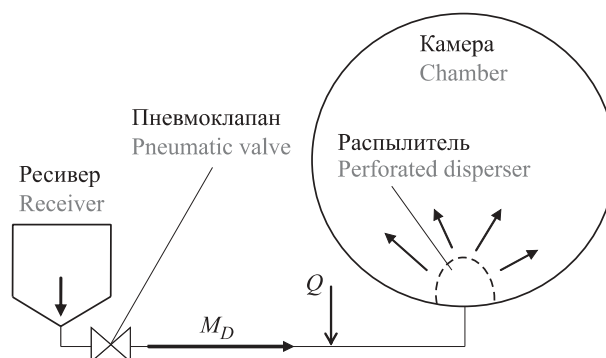


Рис. 1. Схема распыления
Fig. 1. Scheme of dispersing

ров и вспомогательных технических средств, которые влияют на решение поставленных задач. В связи с этим представляется целесообразным привести краткое описание методики с указанием ее возможных особенностей, в том числе особенностей исследования НГП.

2.1. Формирование аэровзвеси

Схема формирования аэровзвеси в камере объемом V_C порядка 20 л приведена на рис. 1. Образец исследуемой пыли массой M_D размещается на дне ресивера объемом V_R вблизи его выходного патрубка или в трубопроводе, соединяющем пневмоклапан с камерой. После размещения вблизи центра камеры ИЗ с энергией E_{ig} камеру вакуумируют до давления $P_{C,0} < P_0 = 100$ кПа.

Давление в ресивере поднимают до $P_{R,0} > P_{C,0}$. По команде с пульта управления открывают клапан на выходе из ресивера, что приводит к возникновению интенсивного потока воздуха из ресивера в камеру и распылению образца дисперсного материала. Параметры V_R , $P_{R,0}$ и $P_{C,0}$ подбирают таким образом, чтобы выравнивание давления в системе ресивер –

Таблица 1. Параметры методик исследования взрывоопасности пыли
Table 1. Parameters of methods for dust explosion investigation

Камера Chamber		Ресивер Receiver		Время распыления, 10^{-3} с Time of dispersing, 10^{-3} s	Энергия ИЗ E_{ig} , кДж Ignition energy E_{ig} , kJ	Задержка зажигания t_d , 10^{-3} с Ignition delay t_d , 10^{-3} s	Автор или фирма Author or firm
V_C , 10^{-3} м ³ V_C , 10^{-3} m ³	$P_{C,0}$, кПа $P_{C,0}$, kPa	V_R , 10^{-3} м ³ V_R , 10^{-3} m ³	$P_{R,0}$, МПа $P_{R,0}$, MPa				
20	40	0,6	2,1	40 ¹	2; 10	60	Р. Сивек [7] R. Siwek [7]
20	14	16	1	300 ²	2,5; 5; 10	400	USBM [9]
18,7 (камера № 1) 18.7 (Chamber No. 1)	65	0,76	1	100 ²	2,5; 5	110	ВНИИПО VNIIP0
17,6 (камера № 2) 17.6 (Chamber No. 2)	40	0,76	1,5				

Примечание. Индексами обозначено место начального размещения образца пыли: ¹ — ресивер, ² — трубопровод.
Note. Place of initial placement of the dust sample: ¹ — receiver, ² — pipeline.

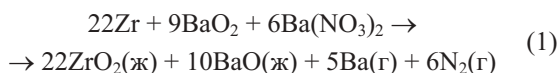
камера приходилось на величину P_0 , а закрытие клапана осуществляют до срабатывания ИЗ. При размещении образца пыли между ресивером и камерой можно снять ограничения на объем ресивера, и тогда закрытие клапана происходит в тот момент, когда давление в камере достигает P_0 . Концентрацию пыли в созданной таким способом аэровзвеси определяют как $C_D = M_D/V_C$. Параметры нескольких известных методик исследования взрывоопасности пыли приводятся в табл. 1.

Начальная температура пыли, воздуха в камере и воздуха в ресивере равна комнатной температуре, однако процесс распыления приводит к повышению 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 энергия приведет к росту температуры воздуха и пыли в камере относительно начальной температуры. Расчет температуры аэровзвеси к моменту окончания распыления приводится в подразд. 4.1.

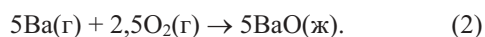
2.2. Срабатывание ИЗ и регистрация давления в камере

С задержкой t_d относительно начала распыления вызывают срабатывание ИЗ. Характерные значения t_d и E_{ig} приведены в табл. 1.

Для зажигания аэровзвеси в 20-л камере используют ИЗ, состоящий из одного или двух пиротехнических зарядов фирмы "Fr. Sobbe GmbH" [6, 7, 13–15]. Зарядом является смесь порошков циркония, диоксида бария и нитрата бария в соотношении масс 4:3:3 в форме таблетки, запрессованной в полуоткрытую оболочку U-образной (в сечении) формы и снабженной электрическим инициатором. Согласно [9] срабатывание ИЗ представляет собой экзотермическую реакцию:



с адиабатической температурой 3870 К. Выгорание образовавшихся паров бария происходит с участием кислорода воздуха:



Наличие газообразных продуктов реакций и перегретого расплава BaO (с температурой кипения около

3000 К) приводит к распылению конденсированных продуктов реакций в виде турбулентного факела. В интересующем нас случае для НГП возможны два сценария развития процесса зажигания с учетом предположений, описанных в работе [10].

Сценарий локального горения. Благодаря тепло- и массообмену продукты реакций (1) и (2) нагревают вовлеченную в факел аэровзвесь НГП и слой аэровзвеси НГП, прилегающий к факелу. Аэровзвесь НГП, нагретая до температуры, достаточной для перехода в состояние горючей аэровзвеси, выжигается вследствие локального распространения пламени. Тепловое расширение газообразных продуктов горения ИЗ и локального горения НГП приводит к скачку давления в камере и сжатию (вытеснению к стенкам камеры) свежей аэровзвеси НГП, которое сопровождается повышением ее температуры. По окончании локального горения НГП происходит снижение давления из-за охлаждения нагретой среды в камере стенками камеры.

Сценарий взрыва отличается от сценария локального горения тем, что изменение параметров свежей аэровзвеси НГП (рост температуры и давления) оказывается достаточным для ее перехода в аэровзвесь, распространяющую пламя. В этом случае процесс горения пыли выйдет за пределы области теплового воздействия ИЗ и приведет к взрыву свежей аэровзвеси в объеме всей камеры.

Единственным источником информации о процессе в камере является график зависимости давления в камере P от времени t . Основные результаты единичного опыта — абсолютное максимальное давление P_m , достигнутое в камере, и нормированное значение максимальной скорости нарастания давления $P'_m = (dP/dt)_m V_C^{1/3}$. Заключение о взрывоопасности пыли формируют на основании результатов, полученных при различных концентрациях пыли в аэровзвеси.

2.3. Критерий взрыва аэровзвеси

Как будет показано в разд. 4, оценка начальной температуры свежей аэровзвеси предполагает надежное разделение опытов в 20-л камере по сценариям развития процесса зажигания (состоялся взрыв аэровзвеси или нет). Такое разделение происходит на основе использования критерия взрыва аэровзвеси. В настоящее время единое мнение о таком критерии отсутствует.

В американских стандартах [13, 15] критерий взрыва в 20-л камере Р. Сивека имеет вид:

$$P_m \geq 200 \text{ кПа} + \Delta P_{ig}, \quad (3)$$

где ΔP_{ig} — экспериментально измеренное максимальное изменение первоначально нормального давления в камере, вызванное срабатыванием ИЗ в отсутствие пыли.

В руководстве [7] и европейских нормах [14] критерий взрыва в 20-л камере Р. Сивека имеет вид:

$$P_m \geq 120 \text{ кПа} + (E_{ig}/10 \text{ кДж}) \cdot 160 \text{ кПа}, \quad (4)$$

где второе слагаемое представляет собой расчетную оценку ΔP_{ig} .

Для 20-л камеры USBM [10] критерий взрыва требует выполнения двух условий, одно из которых совпадает с (3), а другое имеет вид:

$$P'_m \geq 0,15 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}. \quad (5)$$

Отсутствие единого нормативного критерия взрыва вызвано тем, что в основу его формирования принято закладывать формальное соответствие результатов исследования LEL в разномасштабных камерах (20 л и 1 м³) для нескольких видов пылей. При таком подходе на критерий взрыва в 20-л камере окажут влияние особенности методики исследования в камере объемом 1 м³, перечень использованных в сравнительных испытаниях видов пыли и низкая сходимость экспериментальной оценки LEL.

Очевидно, что приведенные варианты критерия взрыва неуниверсальны. В частности, возникает серьезное сомнение в правомерности их использования для случая, когда максимальное давление по всему спектру концентраций пыли в аэрозвеси немногим превосходит 200 кПа. Такое давление свидетельствует о маловероятной для случая взрыва турбулентной аэрозвеси эффективной температуре горения порядка 300 °С.

Объективный критерий взрыва в конкретной камере должен основываться на результатах исследования, полученных только в этой камере. Поиск такого критерия целесообразно связывать с тем обстоятельством, что переход от сценария локального горения к сценарию взрыва сопровождается существенным увеличением количества выгоревшей пыли и, следовательно, характеризуется значительным повышением P_m . По мнению автора, именно этот скачок давления следует использовать при выявлении принадлежности опыта (в том числе опыта с НГП) к случаю взрыва аэрозвеси. Обоснование правомерности такого подхода к формированию критерия взрыва приводится в разд. 3.

3. Уточнение критерия взрыва аэрозвеси

Из приведенного в подразд. 2.2 качественного описания процесса исследования взрывоопасности аэрозвеси НГП следует, что опыты с конкретным образцом НГП можно разделить на две группы в зависимости от сценария горения. Характерное значение P_m для опытов со взрывом должно быть существенно выше этого показателя для опытов с локальным горением.

Данное обстоятельство демонстрируется на графике рис. 2,а, где приводятся результаты исследования взрывоопасности пыли антрацита в 20-л камере USBM с $E_{ig} = 5 \text{ кДж}$ [10]. Краткие сведения о характеристиках исследованной в [10] пыли антрацита представлены в табл. 2.

Несложно разделить рассматриваемые опыты на две группы в зависимости от диапазона давлений, к которому принадлежит значение P_m : для первой группы опытов $185 \text{ кПа} \leq P_m \leq 300 \text{ кПа}$, для второй — $480 \text{ кПа} \leq P_m \leq 620 \text{ кПа}$. Существенный зазор между диапазонами (180 кПа) подтверждает качественное различие сценариев развития горения. Разумно полагать, что опытам с результатами из первой группы отвечает только локальное распространение пламени, из второй — взрыв аэрозвеси во всем объеме камеры.

При однородном распределении пыли по объему сосуда и постоянстве распределения частиц по раз-

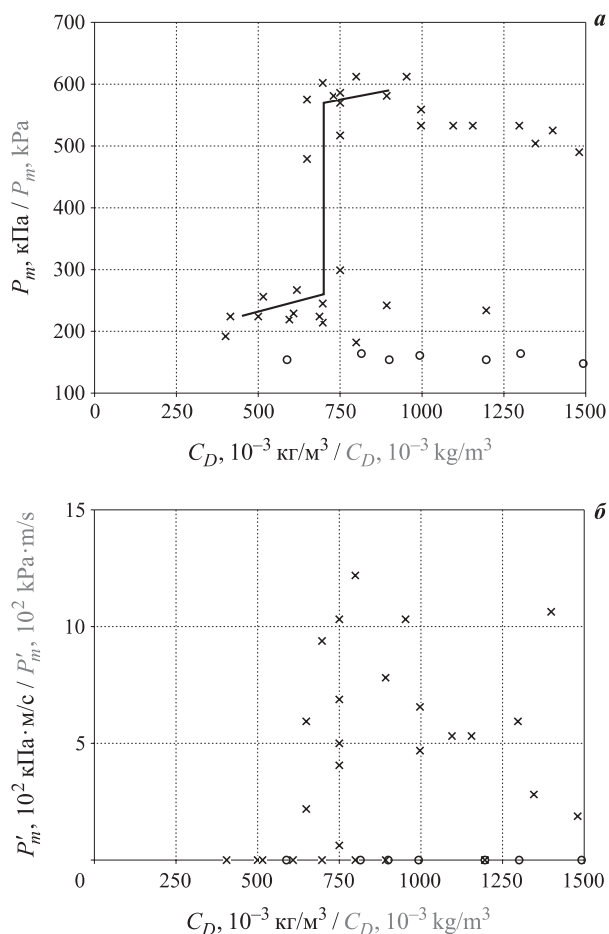


Рис. 2. Зависимость максимального давления (а) и нормированной максимальной скорости его нарастания (б) от концентрации антрацита для двух энергий источника зажигания [10]: ○ — 2,5 кДж; × — 5 кДж

Fig. 2. Dependence of the maximum pressure (а) and the normalized maximum rate of pressure rise (б) on the concentration of anthracite for two energies of the ignition source [10]: ○ — 2.5 kJ; × — 5 kJ

Таблица 2. Характеристики антрацита и гильсонита, исследованных в [10]**Table 2.** Characteristics of anthracite and gilsonite, investigated in [10]

Пыль Dust	Доля, % масс., фракции, мкм Dust, % weight, fraction, μm		Содержание, % масс. Content, % weight				Теплота сгорания, МДж/кг Heating value, MJ/kg
	<75	<20	связанного углерода fixed carbon	летучих volatile matter	золы ash	влаги moisture	
Антрацит Anthracite	85	23	79	8	11	2	29,7
Гильсонит Gilsonite	91	36	15	84	0	1	41,4

меру следует ожидать S-образную зависимость давления в камере от концентрации пыли, условно изображенную на рис. 2,а ломаной линией. Из-за неоднородности реального распределения пыли по объему камеры и флуктуаций дисперсного состава исследуемых проб переход между этими ветвями размыт. Это позволяет наблюдать разделение по упомянутым выше группам набора из опытов, отвечающих одной и той же средней концентрации пыли.

Хотя рассмотренный пример касается частного представителя НПП (антрацита), было бы разумно обобщить результаты анализа этого примера в следующей форме. Если многочисленные измерения P_m при различных концентрациях пыли не позволяют выделить диапазон концентраций, в пределах которого наблюдается S-образная зависимость давления в камере от концентрации пыли, то все опыты отвечают локальному горению данной пыли. И наоборот, если удастся выделить такой диапазон концентраций, то опыты, относящиеся к верхней ветви зависимости, отвечают случаю взрыва аэровзвеси.

Для обоснования правомерности сделанного обобщения добавим следующее рассуждение. Нижний предел диапазона концентраций пыли, занимаемого верхней ветвью S-образной зависимости $P_m(C_D)$ для антрацита (около $0,7 \text{ кг/м}^3$), является нижним концентрационным пределом распространения пламени по аэровзвеси ВГП, в которую перешла аэровзвесь антрацита после изменения параметров своего состояния (температуры и давления). Таким образом, для подтверждения существования скачка на графике $P_m(C_D)$ в области перехода от невзрывоопасной аэровзвеси к взрывоопасной можно также использовать экспериментальные данные по подобной зависимости $P_m(C_D)$ для аэровзвеси ВГП вблизи LEL.

С этой целью на рис. 3,а приводится зависимость $P_m(C_D)$ вблизи LEL для аэровзвеси гильсонита, относящегося к ВГП. Экспериментальные данные взяты из [10], обозначения аналогичны приведенным на рис. 2. Сведения о гильсоните представлены в табл. 2. При однородном распределении пыли по объему сосуда зависимость $P_m(C_D)$ должна иметь

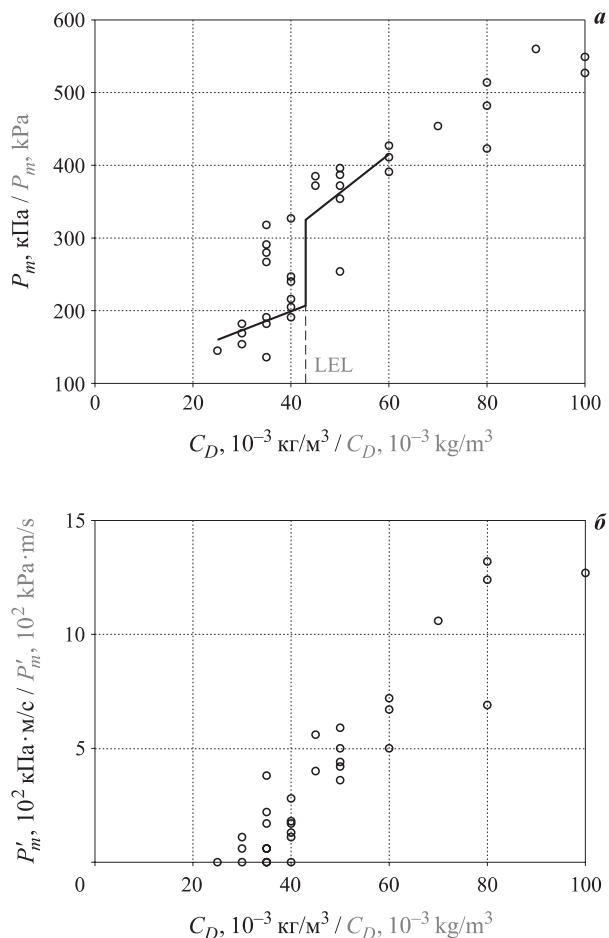


Рис. 3. Зависимость максимального давления (а) и нормированной максимальной скорости его нарастания (б) от концентрации гильсонита для источника зажигания с энергией 2,5 кДж [10]

Fig. 3. Dependence of the maximum pressure (a) and the normalized maximum rate of pressure rise (b) on the concentration of gilsonite for an ignition source with an energy of 2.5 kJ [10]

S-образный вид, условно изображенный на рис. 3,а ломаной линией. Нижний и верхний отрезки линии отвечают соответственно локальному горению пыли и взрыву во всем объеме камеры. Средний вертикальный отрезок линии соответствует, очевидно, LEL аэровзвеси, подогретой адиабатическим сжатием, реализованным продуктами горения ИЗ и продук-

тами локального горения пыли в пламени ИЗ. Неоднородность реального распределения пыли по объему камеры приводит к отличию экспериментальной зависимости $P_m(C_D)$ от ее модельного представления ломаной линией, которое выражается в появлении разброса результатов опытов. Тем не менее скачок давления P_m хорошо различим и обусловлен, как и в случае с НГП, распространением пламени по аэровзвеси, расположенной за пределами области теплового воздействия ИЗ.

С учетом сведений о P'_m на рис. 2,б и рис. 3,б можно заметить, что использованный в [10] критерий взрыва на основе уравнений (3) и (5) приводит к аналогичному разделению опытов на две группы. Однако этот критерий взрыва не имеет универсального характера по отношению к возможным особенностям методик исследования, поскольку P'_m зависит от уровня турбулентности аэровзвеси, который для методик, перечисленных в табл. 1, существенно различается. Что касается современных критериев взрыва на основе уравнения (3) или (4), то их использование приведет к ошибочному переводу многих опытов из первой группы во вторую.

4. Эволюция температуры аэровзвеси НГП

Согласно качественному анализу методики исследования взрывоопасности пыли в 20-л камере, изложенному в разд. 3, первоначально нормальная (≈ 298 К) температура НГП и используемого для создания аэровзвеси воздуха повышается сначала на стадии распыления в 20-л камере, а затем на стадии горения ИЗ и локального выгорания пыли в пламени ИЗ. В данном разделе приводится оценка увеличения температуры аэровзвеси для каждой из этих стадий.

4.1. Расчет температуры аэровзвеси к моменту зажигания

Запишем уравнения, связывающие начальные (с индексом "0") и конечные (с индексом "1") значения параметров процесса распыления. Параметры, относящиеся к камере и ресиверу, отмечены индексами "С" и "R" соответственно:

$$\begin{aligned} \mu P_{C,0} V_C &= R M_{C,0} T_0; \quad \mu P_{R,0} V_R = R M_{R,0} T_0; \\ \mu P_{C,1} V_C &= R M_{C,1} T_{C,1}; \quad \mu P_{R,1} V_R = R M_{R,1} T_{R,1}; \\ (c_V M_{C,1} + c_D M_D)(T_{C,1} - T_0) &= \\ &= c_V M_{R,1} (T_0 - T_{R,1}) + Q; \\ P_{R,1} V_R^\gamma &= P_{R,0} V_{0,R}^\gamma; \quad M_{C,1} - M_{C,0} = M_{R,0} - M_{R,1}; \\ V_{0,R}/V_R &= M_{R,1}/M_{R,0}, \end{aligned} \quad (6)$$

где μ — средняя молекулярная масса воздуха; $\mu = 29$;
 P — давление воздуха, Па;
 V — объем, м³;

R — универсальная газовая постоянная;
 $R = 8,314$ кДж/(кмоль·К);
 M — масса воздуха, кг;
 T — температура среды, К;
 c_V — средняя теплоемкость воздуха в диапазоне температур от 200 до 500 К; $c_V \approx 720$ Дж/(кг·К);
 c_D — средняя теплоемкость пыли в диапазоне температур от 298 до 500 К, Дж/(кг·К);
 M_D — масса образца пыли, кг;
 γ — показатель адиабаты воздуха в диапазоне температур от 200 до 500 К; $\gamma \approx 1,4$;
 $V_{0,R}$ — объем воздуха, не покидавшего ресивер, м³.

Первые четыре уравнения системы (6) представляют собой уравнение состояния идеального газа, записанное для начального и конечного состояния воздуха в камере и в ресивере соответственно. Пятое уравнение выражает закон сохранения энергии, шестое является уравнением адиабаты для воздуха, не покидавшего ресивер, а остальные выражают закон сохранения массы воздуха. Различием температур пыли и воздуха в аэровзвеси пренебрегается.

Величина Q зависит от эффективности теплопередачи и принимает значения от 0 при отсутствии теплопередачи до максимального значения Q_{\max} , отвечающего случаю быстрой теплопередачи, восстанавливающей температуру вытесняемого из ресивера воздуха до T_0 . В результате несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} Q_{\max} &= \int_{M_{R,0}}^{M_{R,1}} c_{V,0} (T_0 - T) dM = \\ &= c_V M_{R,0} T_0 \left[\gamma - 1 + \frac{P_{R,1}}{P_{R,0}} - \gamma \left(\frac{P_{R,1}}{P_{R,0}} \right)^{1/\gamma} \right] \gamma^{-1}. \end{aligned}$$

С учетом того, что для методики USBM $P_{C,1} \approx P_0$, а для остальных методик $P_{C,1} = P_{R,1} \approx P_0$, система (6) из восьми уравнений содержит восемь неизвестных: $T_{C,1}$, $T_{R,1}$, $P_{R,1}$, $M_{C,0}$, $M_{C,1}$, $M_{R,0}$, $M_{R,1}$, $V_{0,R}$. Наличие малого параметра $(T_{C,1} - T_0)/T_0$ в методиках Р. Сивека и ВНИИПО и малого параметра $(T_0 - T_{R,1})/T_0$ в методике USBM позволяет представить решение для повышения начальной температуры аэровзвеси $\Delta T_1 = T_{C,1} - T_0$ в упрощенном виде. В результате несложных преобразований получим:

- для методик Р. Сивека и ВНИИПО:

$$\begin{aligned} \Delta T_{1,\min} &\approx T_0 (1 + \Theta)^{-1} \left[\left(\frac{P_{R,0}}{P_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \frac{V_R}{V_C}; \\ \Delta T_{1,\max} &\approx T_0 (1 + \Theta)^{-1} \frac{(\gamma-1)(P_0 - P_{C,0})}{\gamma P_0}; \end{aligned} \quad (7)$$

- для методики USBM:

$$\Delta T_1 \approx T_0 (1 + \Theta)^{-1} \frac{(\gamma-1)(P_0 - P_{C,0})}{P_0 + (\gamma-1)P_{C,0}},$$

где $\Theta = c_D M_D / (c_V M_{C,1})$;

Таблица 3. Результаты расчетной и экспериментальной оценок повышения начальной температуры в камере $\Delta T_1 = T_{C,1} - T_0$ (К (°C)) при заполнении ее воздухом из ресивера

Table 3. The results of the calculated and experimental estimates of the increase in the initial temperature in the chamber $\Delta T_1 = T_{C,1} - T_0$ (K (°C)) when it is filled with air from the receiver

Метод оценки Estimate method	USBM	Р. Сивек R. Siwek		ВНИИПО (камера № 1) VNIIPPO (chamber No. 1)		ВНИИПО (камера № 2) VNIIPPO (chamber No. 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 ($\Theta = 0$) Calculation ($\Theta = 0$)	97	12	51	12	34	15	51
Эксперимент ($\Theta = 0$) Experiment ($\Theta = 0$)	...	...	...	$\Delta T_{1,\text{exp}} = 16$		$\Delta T_{1,\text{exp}} = 22$	
Расчет ($\Theta = 0,4$) Calculation ($\Theta = 0,4$)	69	9	36	9	24	11	36
Эксперимент ($\Theta = 0,4$) Experiment ($\Theta = 0,4$)	...	...	...	...		$\Delta T_{1,\text{exp}} = 16$	

$\Delta T_{1,\min}$, $\Delta T_{1,\max}$ — значения повышения начальной температуры, отвечающие оценке ΔT_1 , выполненной для случая $Q = 0$ и $Q = Q_{\max}$ соответственно; различием между $\Delta T_{1,\min}$ и $\Delta T_{1,\max}$ для методики USBM пренебрегают из-за незначительного изменения T_R при распылении.

Экспериментальную проверку расчетной оценки ΔT_1 осуществляли с использованием установок ВНИИПО следующим образом. Опыт по заполнению камеры воздухом из ресивера проводили как без участия дисперсного материала ($\Theta = 0$), так и с его участием ($\Theta = 0,4$). После быстрого (за время процесса наполнения камеры порядка 0,1 с) достижения равновесного давления $P \approx P_0$ наблюдалось медленное, насыщающееся со временем изменение давления в камере на величину $-\Delta P_{\text{exp}}$. Характерное время изменения давления в камере $t_p \approx (1,2 \pm 0,2)$ с. Уменьшение давления в камере объясняли охлаждением среды до температуры T_0 в результате ее контакта со стенками камеры.

Экспериментальную оценку $\Delta T_{1,\text{exp}}$ осуществляли путем использования соотношения

$$\Delta T_{1,\text{exp}} = T_0 \Delta P_{\text{exp}} / P_0. \quad (8)$$

Результаты оценки ΔT с помощью соотношений (7) и (8) приведены в табл. 3.

В общем случае, температура среды в центральной части камеры к моменту зажигания

$$T_2 = T_0 + \Delta T_2 \quad (9)$$

будет иметь прирост $\Delta T_2 < \Delta T_1$ из-за охлаждения аэровзвеси при контакте со стенками камеры за время t_d , прошедшее с момента начала распыления. С учетом упомянутых выше наблюдений за релаксацией давления (пропорционального среднему значению температуры воздуха в камере) и соотношения $t_d \ll t_p$ разумно предложить следующую зависимость:

$$\Delta T_2 \approx \Delta T_1 \exp(-t_d/t_p). \quad (10)$$

Давление в камере к моменту зажигания в соответствии с требованиями методики исследования $P_2 = 100$ кПа.

4.2. Расчет температуры аэровзвеси после ее локального выгорания в пламени ИЗ

В соответствии с результатами разд. 3 настоящей работы все опыты с НГП можно разделить на две группы: опыты, в которых имело место локальное горение аэровзвеси НГП, и опыты, сопровождавшиеся взрывом аэровзвеси НГП. В соответствии с методикой проведения экспериментов для каждого из опытов первой группы известно значение P_m . Установим связь между P_m и температурой свежей аэровзвеси T_m .

Будем считать, что начальные условия рассматриваемой задачи, отмеченные индексом “2”, известны и соответствуют параметрам, достигнутым к моменту срабатывания ИЗ после распыления в камере НГП (см. подразд. 4.1).

Горение ИЗ и НГП в пламени ИЗ приводит к тепловому расширению газовой фазы продуктов горения, охватывающих область, которую будем именовать областью теплового влияния источника зажигания, или для краткости RIA (от англ. *region of ignition source action*). Рассмотрим окружающий RIA слой аэровзвеси, внутренняя (обращенная к RIA) и внешняя (обращенная к стенкам камеры) поверхности которого находятся на достаточном удалении от границы RIA и стенок камеры соответственно, чтобы процесс сжатия выбранного слоя аэровзвеси считать адиабатическим.

Рассчитаем повышение температуры рассматриваемого слоя аэровзвеси. Пренебрегая различием между температурами и скоростями воздуха и частиц, запишем уравнения, которым должны удовлетворять изменения параметров аэровзвеси при адиабатическом сжатии:

$$d(PV) = (R/\mu) m dT;$$

$$-P dV = (c_V m + c_D m_D) dT,$$

где P — давление воздуха, Па;

T — температура аэровзвеси, К;

V — объем слоя аэровзвеси, м³;

m_D, m — масса соответственно НГП и воздуха в рассматриваемом слое аэровзвеси, кг.

Первое уравнение получено дифференцированием уравнения состояния идеального газа (воздуха) фиксированной массы m . Второе уравнение выражает закон сохранения энергии — переход работы по сжатию воздуха в тепловую энергию аэровзвеси.

Решение этих уравнений приводит к соотношению

$$T_m = T_2 \left(\frac{P_m}{P_2} \right)^{(\gamma-1)/(\gamma+\Theta)}. \quad (11)$$

При выводе (11) учитывалось соотношение $\Theta = c_D M_D / (c_V M) = c_D m_D / (c_V m)$, вытекающее из равенства скоростей воздуха и частиц, и тождество $R = \mu(\gamma - 1)c_V$.

5. Условия взрывоопасности аэровзвеси антрацита

Особенностью результатов, представленных на рис. 2,а и относящихся к опытам, в которых $E_{ig} = 5$ кДж, является весьма широкий диапазон концентраций пыли антрацита (от 0,65 до 1,2 кг/м³), в пределах которого случайным образом реализуются оба сценария развития горения. Дальнейший анализ будет относиться именно к этому диапазону концентраций пыли антрацита.

Другой особенностью рассматриваемых результатов является значительный разброс значений P_m , относящихся к разным опытам с одинаковой средней концентрацией пыли в аэровзвеси C_D . Этот разброс характерен для исследований турбулентного горения аэровзвесей и вызван, в частности, неоднородностью распределения горючего по объему пылевоздушного облака на масштабах не только порядка расстояния между соседними частицами, но и порядка характерного размера вихревых образований турбулентной среды в камере. Последнее случайным образом меняет количество пыли в RIA и, следовательно, количество выделившейся энергии, влияющей согласно (11) на величину P_m .

С учетом перечисленных особенностей результатов [10] естественно предполагать, что верхняя граница значений P_m , отвечающих первой группе данных в упомянутом диапазоне концентраций аэровзвеси, представляет собой критическое значение P_m^* , с превышением которого реализуется сценарий взрыва. С учетом (11) справедливо следующее соотношение между параметрами T_m^* и P_m^* :

$$T_m^* = T_2 \left(\frac{P_m^*}{P_2} \right)^{(\gamma-1)/(\gamma+\Theta)}. \quad (12)$$

Для построения объективных закономерностей турбулентного горения аэровзвеси требуется многократное повторение экспериментов. Этому требованию из всего диапазона рассматриваемых концентраций пыли в наибольшей степени соответствует достаточно узкий участок (675 ± 75) г/м³, в пределах которого проведено 14 опытов с равным (по 7 опытов) распределением между двумя группами данных. Для этого узкого участка разумно предположить, что $P_m^* \approx 295$ кПа. С учетом (7), (9)–(11) получим $T_m^* \approx 413$ К (140 °С).

Для случая (см. рис. 2,а) исследования взрывоопасности антрацита с ИЗ, у которого $E_{ig} = 2,5$ кДж, S-образной зависимости давления в камере от концентрации пыли не наблюдалось. Несмотря на отсутствие многократного повторения экспериментов разумно предполагать, что взрыв аэровзвеси в этом случае не может быть реализован. Используя (11) и значение $P_m \approx 165$ кПа, получим для начальной температуры аэровзвеси антрацита, сохраняющего принадлежность к НГП, значение $T_m \approx 373$ К (100 °С).

Таким образом, аэровзвесь антрацита, характеристики которого приведены в табл. 2, при температуре 140 °С и давлении 295 кПа способна распространять пламя при концентрации аэровзвеси (675 ± 75) г/м³, т. е. является взрывоопасной. Переход от невзрывоопасной аэровзвеси данного антрацита к взрывоопасной осуществляется при некоторой температуре T_m из диапазона от 373 до 413 К (от 100 до 140 °С) и давлении P_m , связанном с этой температурой соотношением (11). Для уточнения температуры такого перехода требуются сведения об испытаниях аэровзвеси данного антрацита в 20-л камере USBM при промежуточных значениях E_{ig} (между 2,5 и 5,0 кДж), которыми автор не располагает.

В заключение отметим, что предложенный выше прогноз появления взрывоопасности антрацита выполнен для случая одновременного повышения начальной температуры аэровзвеси и начального давления воздуха. В то же время наибольшую практическую ценность, очевидно, имеют отдельные сведения о влиянии начальных значений параметров состояния на взрывоопасность НГП. Не рассматривая возможность получения такой информации из опытов с различными, искусственно созданными начальными условиями исследования НГП, оценим относительное влияние температуры и давления на изменение взрывоопасности пыли антрацита.

“Проблемная” пыль антрацита при нормальных условиях относится к НГП, т. е. имеет $LOC(T_0, P_0)$, незначительно превышающий 0,21. Рост начальной температуры аэровзвеси антрацита и начального давления на величину ΔT_2 (К) и ΔP_2 (Па) соответственно приводит к уменьшению LOC, которое делает

аэровзвесь антрацита взрывоопасной. В линейном приближении можно записать

$$\text{LOC}(T_0 + \Delta T_2, P_0 + \Delta P_2) = \text{LOC}(T_0, P_0) + \left. \frac{\partial(\text{LOC})}{\partial T} \right|_{P_0} \Delta T_2 + \left. \frac{\partial(\text{LOC})}{\partial P} \right|_{T_0} \Delta P_2 \leq 0,21. \quad (13)$$

Влияние температуры аэровзвеси и давления на переход от невзрывоопасной аэровзвеси к взрывоопасной описывается соответственно вторым и третьим слагаемыми правой части равенства (13). Оценим величину этих слагаемых. Согласно эмпирическим данным [1] при $T_0 < 500$ К

$$\left. \frac{\partial(\text{LOC})}{\partial T} \right|_{P_0} \approx \frac{\text{LOC}(T_0, P_0)}{T_b - T_0}, \quad (14)$$

где $T_b \approx 1300$ К.

Скудность сведений о зависимости LOC от давления [1] не позволяет представить эту зависимость в аналитическом виде. Согласно экспериментальным данным для нескольких пылей органического происхождения [16] с ростом давления величина LOC может как уменьшаться, так и повышаться. При этом

$$-2 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1} < \left. \frac{\partial(\text{LOC})}{\partial P} \right|_{T_0} < 2 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}. \quad (15)$$

С учетом (13)–(15) и полученных для антрацита значений $\Delta T = 115$ К и $\Delta P = 200$ кПа несложно оценить искомые слагаемые ($0,023$ и $\pm 0,004$ соответственно) и отметить, что влияние изменения начальной температуры аэровзвеси антрацита на возможность перехода от невзрывоопасной аэровзвеси к взрывоопасной намного выше влияния начального давления.

6. Обсуждение результатов

Из материалов настоящей работы следует, что тестирование аэровзвеси в 20-л камере по известным методикам [7, 14, 15] не отвечает заявленным в этих методиках нормальным начальным условиям исследования аэровзвеси. Такое тестирование в действительности проводится при повышенной начальной температуре аэровзвеси и повышенном начальном давлении в камере. Сравнение с надежными результатами исследований в камере объемом 1 м^3 показывает, что отмеченная особенность исследований в 20-л камере приводит к завышению оценки опасности для пылей с низкой реальной взрывоопасностью. При этом особую озабоченность вызывает возможность появления качественной ошибки при исследовании в 20-л камере (далее — ошибки исследования), когда невзрывоопасная пыль будет отнесена к взрывоопасным пылям. Ошибка исследования приводит к неоправданным экономическим издержкам, связанным с необходимостью исполь-

зования оборудования во взрывозащищенном исполнении или переводом производственного помещения из пожароопасной во взрывопожароопасную категорию по взрывопожарной и пожарной опасности. В соответствии с правилами “недоверия” (см. введение) признаками возможной ошибки является низкое значение K_{st} .

В разд. 3–5 настоящей работы приведены расчетно-экспериментальные методы оценки повышения начальной температуры аэровзвеси и начального давления в 20-л камере. Фактически, эти методы позволяют прогнозировать результаты исследования аэровзвеси при повышенной температуре и давлении (см. разд. 5). Однако для подтверждения взрывоопасности пыли с низким показателем K_{st} (“проблемной” пыли) требуется устранить существенные изменения начальных условий исследования аэровзвеси.

Предложенные методы на примере данных табл. 3 показывают возможность уменьшения нежелательных изменений начальных условий исследования аэровзвеси путем соответствующего изменения параметров методики. Так, в частности, незначительным уменьшением глубины начального вакуумирования камеры ($P_0 - P_{C,0}$) и снижением объема ресивера V_R можно в соответствии с (7) и (10) сделать скачок температуры аэровзвеси к моменту зажигания несущественным: $\Delta T_2 < 10$ °С. В то же время для уменьшения скачка температуры аэровзвеси и давления в камере при локальном выгорании пыли в окрестности ИЗ требуется внести серьезные изменения в методику исследования.

Ниже обсуждаются два способа реализации квазинормальных условий исследования, близких к нормальным. По мнению автора, использование этих способов должно существенно снизить риск ошибки исследования.

Второй способ реализации квазинормальных условий исследования аэровзвеси “проблемной” пыли не затрагивает конструкцию установки, но требует проведения опытов по модифицированной методике, учитывающей то обстоятельство, что для “проблемной” пыли LOC мало отличается от 0,21. Из-за отсутствия теории турбулентного горения [17] для обоснования правомерности использования данного способа обратимся к двум эмпирическим закономерностям турбулентного горения аэровзвесей и разумным предположениям.

Первая из таких закономерностей заключается в том, что для пыли, LOC которой заметно меньше 0,21, в диапазоне $\text{LOC} \leq C_{O_2} \leq 0,21$ справедлива линейная зависимость [1]:

$$K_{st}(C_{O_2}) = \alpha(C_{O_2} - \text{LOC}), \quad (16)$$

где α — размерный коэффициент пропорциональности.

Для указанных видов пылей можно записать $\alpha = K_{st}(0,21)/(0,21 - LOC)$. Значительная крутизна зависимости (16) позволяет весьма точно прогнозировать LOC линейной интерполяцией экспериментальных данных K_{st} , полученных для нескольких (двух или более) значений C_{O_2} , расположенных на значительном удалении от LOC.

Поскольку $C_{O_2} = 0,21$ не является особенностью $K_{st}(C_{O_2})$, естественно предполагать, что зависимость (16) справедлива и для интересующего нас случая $LOC \approx 0,21$ при $C_{O_2} \geq 0,21$. Правомерность такого предположения подтверждается низким значением K_{st} при $C_{O_2} \approx 0,21$, которое для “проблемной” пыли следует из правил “недоверия” (см. введение). Таким образом, LOC для “проблемной” пыли определяют линейной интерполяцией (к значению $K_{st} = 0$) экспериментальных данных K_{st} , полученных для нескольких (двух или более) значений $C_{O_2} > 0,21$. После этого устанавливают принадлежность пыли к ВГП (если $LOC \leq 0,21$) или к НГП (если $LOC > 0,21$).

Алгоритм действий по модифицированной методике предполагает использование ИЗ с малым запасом энергии ($E_{ig} \leq 1$ кДж), который не приводит к заметному повышению начальной температуры взрывов и начального давления в камере. Возможность использования такого ИЗ обусловлена второй эмпирической закономерностью, согласно которой с ростом C_{O_2} происходит резкое снижение E_{min} [1].

Второй способ связан с исследованием LEL “проблемной” пыли после формального изменения конструкции камеры (рис. 4), процедуры распыления и выбора надежного ИЗ без нарушений последовательности и содержания этапов исследования. Перечисленные изменения логически вытекают из материалов данной работы и состоят в следующем.

На нижнюю половину исходной камеры (см. рис. 1) устанавливают прозрачный (стеклянный) цилиндр объемом около 30 л, верхний торец которого закрывают гибкой полимерной пленкой одноразового использования. В первоначальном состоянии пленка прогибается внутрь цилиндра. Процедура распыления отличается от стандартной процедуры (см. разд. 3) отсутствием вакуумирования объема камеры. Воздух, поступающий в камеру из ресивера, приводит к увеличению ее объема путем вытеснения гибкого торца и практически не меняет атмосферное давление в камере. Несложно показать, что изменение температуры среды в камере увеличенного (до ~40 л) объема не превысит характерного масштаба изменений комнатной температуры (порядка 10 К (°C)).

Размер пленки подбирается таким, чтобы изменение внутреннего объема камеры, происходящее при выбросе воздуха из ресивера и срабатывании ИЗ (с энергией 5 или 10 кДж) при отсутствии пыли,



Рис. 4. Схема камеры с “гибким” торцом в начальном положении и при максимальном объеме (жирный пунктир)

Fig. 4. Scheme of the chamber with a “flexible” cap in the initial position and at the maximum capacity (fatty dotted line)

было в 2–3 раза меньше максимального изменения этого объема (см. рис. 4). Таким образом, срабатывание ИЗ и локальное выгорание пыли в окрестности пламени ИЗ не приведут к изменению начального давления в камере и согласно (11) не вызовут изменения начальной температуры свежей взрывов. В целях безопасной эксплуатации установки “гибкий” торец служит сбросным клапаном модифицированной камеры, т. е. имеет слабое крепление с цилиндром.

Критерием взрыва взрывов является распространение пламени, наблюдаемое через прозрачную оболочку камеры, и вскрытие верхнего торца камеры. Отметим, что в предлагаемом способе регистрации взрыва использовано первое определение термина ВГП (см. введение).

Считаем необходимым отметить, что практическому использованию изложенных способов реализации квазинормальных условий исследования взрывов “проблемной” пыли должна предшествовать их апробация.

Заключение

Выполнен количественный анализ причин того, что экспериментальное исследование взрывов пыли с низкой взрывоопасностью по современным методикам в камере объемом 20 л приводит к завышенным показателям взрыва. Показано, что тестирование взрывов в 20-л камере не отвечает заявленным в методиках нормальным начальным условиям исследования (давлению 100 кПа, температуре 25 °C) и фактически является исследованием взрывоопасности взрывов при повышенных начальных температуре среды и давлении в камере. К росту на

чальной температуры аэровзвеси приводят два процесса: распыление дисперсного материала в камере импульсом сжатого воздуха из ресивера; адиабатическое сжатие аэровзвеси при срабатывании источника зажигания и локальном выгорании пыли, оказавшейся в пламени и/или вблизи пламени источника зажигания. Последний процесс вызывает рост начального давления в камере.

Разработан надежный критерий взрыва пыли, поскольку единое представление о таком критерии, судя по нормам США и Европейских стран, до сих пор отсутствует. Новый критерий основан на двух предположениях: на ограничении разнообразия развития зажигания аэровзвеси двумя сценариями — локальным выгоранием пыли в некоторой окрестности источника зажигания и взрывом пыли, охватывающим весь объем камеры, и на существенном отличии скачков давления в камере, ожидаемых для разных сценариев.

Продемонстрированы два направления применения результатов настоящей работы.

Во-первых, возможен прогноз условий, при которых возникает взрывоопасность аэровзвеси пыли, невзрывоопасной при нормальных условиях. Такой прогноз делается в случае регистрации взрыва данной пыли в 20-л камере и при оценке реальных начальных условий исследования. В частности, для аэровзвеси антрацита, исследованной в 20-л камере US Bureau of Mines, предсказана взрывоопасность при температуре 140 °С.

Во-вторых, можно наметить способы реализации условий экспериментального исследования пыли с низкой взрывоопасностью, близких к нормальному. Они позволяют существенно повысить надежность вывода о низкой взрывоопасности горючей пыли без использования крупномасштабного оборудования. В работе предложено два таких способа.

Первый способ основан на предположении о том, что для пыли с низкой взрывоопасностью минимальное взрывоопасное содержание кислорода в воздухе $LOC \approx 0,21$, и на известной эмпирической линейной зависимости индекса взрывоопасности K_{st} от содержания кислорода в воздухе. В рамках этого способа проводят поиск LOC, исследуя параметр K_{st} для взвесей пыли в воздухе, обогащенном кислородом. О взрывоопасности пыли судят по соотношению между полученным экстраполяцией значением LOC и обычным содержанием кислорода в воздухе (0,21).

Второй способ предполагает измененную конструкцию камеры, отличающуюся от стандартной 20-л камеры тем, что ее верхняя половина заменяется стеклянным цилиндром с переменным объемом. Последнее достигается использованием у цилиндра “гибкого” верхнего торца из полимерной пленки,

первоначально вогнутой внутрь камеры, но принимающей выпуклую форму после распыления и срабатывания источника зажигания.

Перечень использованных сокращений, обозначений и индексов

ВГП — взрывоопасная горючая пыль;
 НГП — невзрывоопасная горючая пыль;
 ИЗ — пиротехнический источник зажигания;
 LOC — минимальное взрывоопасное содержание кислорода в воздухе;
 LEL — нижний концентрационный предел распространения пламени;
 RIA — область влияния источника зажигания;
 USBM — US Bureau of Mines;
 C_D, C_{OX} — концентрация пыли в аэровзвеси и кислорода в воздухе соответственно;
 c_D, c_V — средняя теплоемкость пыли и воздуха;
 E_{ig} — энергия источника зажигания;
 K_{st} — индекс взрывоопасности пыли;
 m, M — масса; без индекса “D” относится к воздуху;
 P — давление; без индекса “R” относится к камере;
 $P_m, (dP/dt)_m$ — максимальное значение $P(t)$ и (dP/dt) в опыте;
 $P'_m — (dP/dt)_m V_C^{1/3}$;
 ΔP — изменение давления в камере;
 ΔP_{ig} — изменение давления при срабатывании ИЗ в отсутствие пыли;
 Q — энергия, переданная теплопередачей;
 R — универсальная газовая постоянная;
 t — время;
 t_d — задержка зажигания;
 t_p — характерное время релаксации давления в камере;
 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

Указывают на принадлежность:

0, 1, 2 — моменту: начальному, завершения распыления и срабатывания ИЗ;
 C, D, R — камере, пыли и ресиверу;
 \max, \min — максимальному, минимальному значениям.

Благодарность

Автор выражает искреннюю благодарность Девликанову М. О. за помощь в получении экспериментальных данных в камерах ВНИИПО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Eckhoff R. K.* Dust explosions in the process industries. 3rd edition. — Boston : Elsevier Science, Gulf Professional Publishing, 2003. — 720 p.
2. Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben / Scholl E. W., Reeh D., Wiemann W. u. a. // SFT-Report. — 1979. — No. 2.2. — 100 p. (in German).
3. ISO/IEC 80079-20-2:2016. Explosive atmospheres — Part 20-2: Material characteristics — Combustible dusts test methods. 1st edition. — Geneva, Switzerland : ISO/IEC, 2016. — 100 p.
4. NFPA 654. Standard for the prevention of fire and dust explosions from the manufacturing, processing, and handling of combustible particulate solids. 2013 Edition. — Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association, 2012. — 56 p.
5. *Bartknecht W.* Explosionen, ablauf und schutzmaßnahmen. — Berlin, Springer-Verlag, 1980 — 259 p. (in German).
6. ISO 6184-1:1985. Explosion protection systems — Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air. — Geneva : International Organization of Standardization, 1985. — 5 p.
7. *Cesana C., Siwek R.* Operating instructions 20-l-apparatus. Ver. 7.0. — Birsfelden : Kühner AG, 2009.
8. *Proust Ch., Accorsi A., Dupont L.* Measuring the violence of dust explosions with the “20l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”: Systematic comparison and analysis of the discrepancies // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — Vol. 20, Issue 4-6. — P. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032.
9. *Hertzberg M., Cashdollar K. L., Zlochower I. A.* Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences // Symposium (International) on Combustion. — 1988. — Vol. 21, Issue 1. — P. 303–313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3.
10. *Cashdollar K. L., Chatrathi K.* Minimum explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m³ chambers // Combustion Science and Technology. — 1993. — Vol. 87, Issue 1-6. — P. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213.
11. NFPA 68. Standard on explosion protection by deflagration venting. 2013 Edition. — Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association, 2013.
12. *Cloney C. T., Ripley R. C., Amyotte P. R., Khan F. I.* Quantifying the effect of strong ignition sources on particle preconditioning and distribution in the 20-L chamber // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2013. — Vol. 26, Issue 6. — P. 1574–1582. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.08.010.
13. ASTM E1515–14. Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dusts. — West Conshohocken, PA : ASTM International, 2014. — 9 p. DOI: 10.1520/E1515-14.
14. BS EN 14034-3:2006+A1:2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds. — European Committee for Standardisation (CEN), 2011. — 30 p.
15. ASTM E1226-12a. Standard test method for explosibility of dust clouds. — West Conshohocken, PA : ASTM International, 2012. — 13 p. DOI: 10.1520/E1226-12A.
16. *Siwek R.* Determination of technical safety indices and factors influencing hazard evaluation of dusts // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 1996. — Vol. 9, No. 1. — P. 21–31. DOI: 10.1016/0950-4230(95)00057-7.
17. *Lipatnikov A.* Fundamentals of premixed turbulent combustion. — Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. — 548 p. DOI: 10.1201/b12973.

Материал поступил в редакцию 19 мая 2017 г.

Для цитирования: *Поletaев Н. Л.* О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли в 20-литровой камере // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20.

English

ON THE PROBLEM OF EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF LOW EXPLOSIBILITY FOR DUST/AIR MIXTURE IN THE 20-L CHAMBER

POLETAEV N. L., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail address: nlpvniipo@mail.ru)

ABSTRACT

It is known (Eckhoff, 2003) that an experimental study of aero-suspension of dust with low explosivity in a 20-liter chamber leads to overestimation of the explosion. A special concern is the risk of a qualitative error, when non-explosive dust will be transferred to explosive dusts, which will cause unjustified costs for ensuring the safety of industries involving this dust. This work is aimed at reducing this risk.

In this work, a quantitative analysis of the causes of overstatement of dust explosiveness is performed. It is shown that the testing of dust/air mixture in a 20-liter chamber does not correspond to the normal initial conditions of the investigation (pressure 100 kPa, temperature 25 °C) stated in the methodologies and, in fact, is an explosion hazard study of dust/air mixture with an increased initial temperature and an increased initial pressure in the chamber. Two processes lead to an increase in the initial temperature: the dispersion of particulate material in the chamber by a pulse of compressed air from the receiver; adiabatic compression of dust/air mixture upon activation of the ignition source and local burning out of the dust found in the flame and/or near the flame of the ignition source. The latter process leads to an increase in the initial pressure in the chamber.

The implementation of this analysis required the development of a reliable criterion for the explosion of dust, since there is still no single idea of such a criterion, judging by the norms of the United States and European countries. The new criterion is based on two assumptions: (1) on limiting the variety of the development of dust ignition in two scenarios (Cashdollar and Chatrathi, 1993) — local burning out of dust in some neighborhood of the ignition source and dust explosion, covering the entire volume of the chamber and (2) on the essential difference between pressure jumps in the chamber, expected for different scenarios.

Two variants of application of the results of this work are demonstrated.

First, it is possible to forecast the conditions under which an explosive danger arises in the dust, which is not explosive under normal conditions. Such a forecast is made in case of recording the explosion of this dust in a 20-liter chamber and assessing the real initial conditions of the study. In particular, an explosion of anthracite, investigated in a 20-liter US Bureau of Mines, is predicted to be explosive at a temperature of 140 °C.

Secondly, it is possible to outline ways of realizing the conditions for experimental investigation of dust with a low explosivity, close to normal. They will significantly improve the reliability of the conclusion about the low explosiveness of combustible dust without the use of large-scale equipment. Two such methods are proposed in the work.

The first method is based on the reasonable assumption that for a dust with a low explosion hazard low oxygen concentration $LOC \approx 0.21$, and the known empirical linear dependence of the explosion index K_{st} on the oxygen content in air. Within the framework of this method, a search is made for the LOC, by examining K_{st} for dust suspensions in air enriched with oxygen. The explosion hazard of dust is judged by the ratio between the extrapolation obtained by the LOC and the usual oxygen content in the air (0.21).

The second method involves a modified design of a 20-l camera, which differs from the standard design of a 20-liter chamber in a vertically extended shape and variable volume. The latter is achieved by using a “flexible” top end of a polymer film, initially concave into the chamber, but assuming a convex shape after dust dispersion and triggering the ignition source.

Keywords: dust explosion; 20-l chamber; explosion criterion; low explosivity; high LOC; anthracite.

REFERENCES

1. Eckhoff R. K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd edition. Boston : Elsevier Science, Gulf Professional Publishing, 2003. 720 p.
2. Scholl E. W., Reeh D., Wiemann W. u. a. Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben. *SFT-Report*, 1979, no. 2.2. 100 s. (in German).
3. ISO/IEC 80079-20-2:2016. *Explosive atmospheres — Part 20-2: Material characteristics — Combustible dusts test methods*. 1st edition. Geneva, Switzerland, ISO/IEC, 2016. 100 p.

4. NFPA 654. *Standard for the prevention of fire and dust explosions from the manufacturing, processing, and handling of combustible particulate solids*. 2013 Edition. Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2012. 56 p.
5. Bartknecht W. *Explosionen, ablauf und schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer-Verlag, 1980. 259 p. (in German).
6. ISO 6184-1:1985. *Explosion protection systems — Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air*. Geneva, International Organization of Standardization, 1985. 5 p.
7. Cesana C., Siwek R. *Operating instructions 20-l-apparatus*. Ver. 7.0. Birsfelden, Kühner AG, 2009.
8. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”: Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 20, issue 4-6, pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032.
9. Hertzberg M., Cashdollar K. L., Zlochower I. A. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences. *Symposium (International) on Combustion*, 1988, vol. 21, issue 1, pp. 303–313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3.
10. Cashdollar K. L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m³ chambers. *Combustion Science and Technology*, 1993, vol. 87, issue 1-6, pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213.
11. NFPA 68. *Standard on explosion protection by deflagration venting*. 2013 Edition. Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2013.
12. Cloney C. T., Ripley R. C., Amyotte P. R., Khan F. I. Quantifying the effect of strong ignition sources on particle preconditioning and distribution in the 20-L chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, vol. 26, issue 6, pp. 1574–1582. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.08.010.
13. ASTM E1515–14. *Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dusts*. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2014. 9 p. DOI: 10.1520/E1515-14.
14. BS EN 14034-3:2006+A1:2011. *Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds*. European Committee for Standardisation (CEN), 2011. 30 p.
15. ASTM E1226-12a. *Standard test method for explosibility of dust clouds*. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2012. 13 p. DOI: 10.1520/E1226-12A.
16. Siwek R. Determination of technical safety indices and factors influencing hazard evaluation of dusts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1996, vol. 9, no. 1, pp. 21–31. DOI: 10.1016/0950-4230(95)00057-7.
17. Lipatnikov A. *Fundamentals of premixed turbulent combustion*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. 548 p. DOI: 10.1201/b12973.

For citation: Poletaev N. L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 5–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20.