УДК 536.46

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ПЫЛИ В БОЛЬШИХ РЕЗЕРВУАРАХ С ТРУБОПРОВОДАМИ

# M. Sklenárová<sup>1</sup>, P. Štroch<sup>2</sup>, A. Bernatík<sup>3</sup>

<sup>1</sup>VSB-Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering, Ostrava, Czech Republic and SLOVNAFT, a.s., Bratislava, Slovak Republic, martina.sklenarova@slovnaft.sk

<sup>2</sup>VSB-Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering, Ostrava, Czech Republic,

RSBP spol. s r.o., Ostrava, Czech Republic, pstroch@rsbp.cz

<sup>3</sup>VSB-Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering, Ostrava, Czech Republic, ales.bernatik@vsb.cz

Рассмотрены опасности, связанные со свойствами пластиковой пыли, а также ее влияние на возникновение и развитие взрыва. Исследовалась полиэтиленовая пыль, представляющая собой побочный продукт производства и хранения гранулята. Взрывные испытания проводились в контейнерах, аналогичных тем, которые используются на заводах. Объем закрытых емкостей составлял $1.35~{\rm m}^3~({\rm N1})$  и 5.45  ${\rm m}^3~({\rm N2}).$ Опыты проводились в емкости N1 с вентиляционной зоной номинального диаметра DN 250 в верхней части сосуда, в емкости N2 с вентиляционной зоной диаметром DN 585 или DN 775, установленной на верхних фланцах сосудов, а также в емкостях, соединенных между собой трубами диаметром DN 150 и длиной 3, 6 и 10 м. Эксперименты показали, что давление взрыва в технологическом оборудовании может достигать более высоких значений, чем при лабораторных испытаниях. При распространении взрыва в соединенных трубопроводом резервуарах вследствие предварительного сжатия возникает избыточное давление, в результате чего измеренные в соединенных резервуарах давление и скорость его роста во много раз превышают аналогичные параметры, измеренные в резервуаре с вентиляционным отверстием. Взрыв распространялся от резервуара большего объема к резервуару меньшего объема, предварительное сжатие смеси приводило к увеличению параметров взрыва в резервуаре меньшего объема, несмотря на установленное в обоих сосудах вентиляционное отверстие. Для обеспечения взрывозащиты можно также использовать другие элементы конструкции. Описано влияние длины трубопровода, соединяющего емкости.

Ключевые слова: взрывная пыль, максимальное давление взрыва, максимальная скорость нарастания давления, константа пыли, объем пламени.

DOI 10.15372/FGV20220610

#### ВВЕДЕНИЕ

Для оценки взрывоопасности пластмассовой пыли выбрана технология, при которой пластмассовый гранулят транспортируется и хранится вместе с пылью. Предметом исследования стала пыль, являющаяся побочным продуктом производства и хранения гранул [1].

Цель исследования — определить максимальное давление взрыва и максимальное редуцированное давление взрыва в контейнерах, форма которых аналогична используемой на заводе по производству пластиковых гранул, и сравнить результаты с данными лабораторных испытаний. Ставилось целью также испытание и проверка влияния установленных противовзрывных мер, таких, например, как наличие вентилируемой зоны, на изменение взрывного давления в емкости. Измерения проводились при оптимальной концентрации пыли 750 г/м<sup>3</sup>, полученной на основании лабораторного определения максимального давления взрыва.

Максимальное давление взрыва и константу взрывопожароопасности пыли полиэтиленового образца определяли в закрытых резервуарах объемом  $1.35 \text{ м}^3$  (N1) и  $5.45 \text{ м}^3$  (N2).

Редуцированное давление взрыва измерялось в резервуаре N1 с вентиляционным отверстием DN 250 (DN — условный внутренний диаметр), а также в резервуаре N2 с отверстием диаметром DN 585 или DN 775, установленными на верхних фланцах сосудов. Уменьшение редуцированного давления взрыва было достигнуто за счет большей площади вентиляционного отверстия. Задача заключалась в том,

<sup>©</sup> Sklenárová M., Štroch P., Bernatík A., 2022.

чтобы используемое оборудование выдержало рабочее давление.

В основу исследования положен тот факт, что одно и то же вещество может иметь разные пожарно-технические характеристики, если оно производится и перерабатывается на разном технологическом оборудовании и эксплуатируется в разных условиях.

Пыль состоит из твердых частиц размером менее 0.5 мм. Некоторые нетипичные материалы могут вести себя как пыль и с частицами большего размера, например, воло́кна длиной более 0.5 мм. Таким образом, под термином «пыль» подразумеваются измельченные твердые вещества, называемые порошком, мукой, фрагментами волокон и т. п. [2].

Пыль считается взрывоопасной, если после ее воспламенения в смеси с воздухом от подходящего источника пламя распространяется с увеличением давления [3].

Взрыв горючей пыли происходит только в определенных пределах взрываемости (нижний и верхний). Нижний предел характеризует степень опасности взрыва пыли в производственных процессах [2, 4].

Максимальное давление взрыва  $p_{\text{max}}$  представляет собой максимальное значение повышенного давления, создаваемого при взрыве среды в закрытом контейнере в диапазоне взрывоопасной концентрации пыли [5] и при нормальных атмосферных условиях.

Максимальная скорость повышения давления  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{max}}$  — это максимальное значение роста давления в единицу времени при взрыве легковоспламеняющегося вещества в закрытом контейнере при заданных условиях испытаний [5].

Редуцированное давление взрыва  $p_{red}$  это давление, создаваемое взрывом в контейнере, защищенном либо возможностью сброса давления взрыва, либо подавлением взрыва [6].

На параметры  $p_{\max}$  и  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$  оказывает влияние концентрация взрывоопасной смеси. С увеличением концентрации значения этих

си. С увеличением концентрации значения эти: параметров увеличиваются [4].

Скорость реакции растет с повышением температуры [5]. Со снижением давления максимальные параметры взрыва уменьшаются [3].

При увеличении объема резервуара максимальное давление взрыва не меняется, а скорость повышения давления уменьшается. Такая закономерность свойственна емкостям от 40 л и не распространяется на продолговатые сосуды и трубы [7, 8].

Максимальное давление взрыва в закрытых, почти сферических сосудах достаточного размера ( $V \ge 20$  л) не зависит от объема. Однако максимальная скорость роста давления от объема зависит: она уменьшается с его увеличением по кубическому закону. Значение константы взрывопожароопасности пыли  $K_{\rm St}$ , вытекающее из этого закона, зависит от типа пыли и метода испытаний, но не зависит от размера емкости в случае объемов  $V \ge 20$  л [3].

При инициировании среды в емкости N1 наблюдается эффект избыточного давления, «выталкивающего» смесь из емкости N2 через соединительную трубу длиной 3 м в емкость N1. В резервуаре N1 происходят предварительное сжатие и рост давления  $p_{red}$ , а значение  $\frac{dp}{dt}$  становится во много раз выше, чем при взрыве только в резервуаре N1 с установленной зоной вентиляции.

В опытах с распространением взрыва из резервуара большего объема в резервуар меньшего объема результаты соответствуют предположению, что взрыв в большем резервуаре из-за предварительного сжатия горючей пылевоздушной смеси значительно увеличивает максимум редуцированного давления и скорость взрыва в меньшем резервуаре. При этом в имитационных испытаниях не наблюдалось существенного влияния длины соединительной трубы.

На практике, если взрыв происходит в большей емкости, важно контролировать длину трубопровода между соединенными резервуарами. Чем меньше длина трубопровода, тем больше предварительное сжатие, и можно ожидать более высоких значений максимальных параметров взрыва, что предъявляет другие требования к конструктивным элементам в технологии.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробы полиэтиленовой пыли были взяты из больших мешков, в которых хранилась пыль из пылеулавливающих и складских бункеров полиэтиленового гранулята. Вначале проводились лабораторные измерения в большом объеме, на основе их результатов выбирали образ-

Таблица 1

$p_{\max}$ , бар, закрытая емкость	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ , 6ap/c	$\left(rac{dp}{dt} ight)_{red},$ бар/с	<i>p<sub>red</sub></i> , бар, емкость с вентилируемой зоной		
6.4					
7.170	74.201		—		
_		108.587	0.440		
7.140	75.620				
_		160.905	0.660		
_		138.731	0.190		
	$p_{\max}$ , бар,           закрытая           емкость           6.4           7.170           —           7.140           —           —	$p_{\text{max}}$ , $\delta ap$ , закрытая емкость $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{max}}$ , $\delta ap/c$ $6.4$ — $7.170$ $74.201$ —       — $7.140$ $75.620$ —       —         —       —         —       —         —       —         —       —         —       —	$p_{max}$ , $\delta ap$ , закрытая емкость $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ , $\delta ap/c$ $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$ , $\delta ap/c$ 6.4       —       —         7.170       74.201       —         —       —       108.587         7.140       75.620       —         —       —       160.905         —       —       138.731		

Давление взрыва полиэтиленовой пыли в изолированных сосудах

цы с самыми высокими значениями параметров взрыва для крупномасштабных взрывных испытаний.

Крупномасштабные взрывные эксперименты выполняли в емкости N1 объемом  $1.35 \text{ м}^3$  и емкости N2 объемом  $5.45 \text{ м}^3$ . Емкости были оснащены датчиками, которые обеспечивали многоточечный замер давления взрыва. Полиэтиленовую пыль взвешивали и засыпали в распределительные баки объемом 5.4 и 12 л, в которых создавалось давление воздуха до 20 бар, и распыляли через форсунки. Из-за засорения форсунок приходилось их снимать с резервуаров во время испытаний. После перемешивания смесь воспламенялась пиротехническими инициаторами с энергией 5 кДж каждый [9]. На верхних фланцах резервуаров устанавливалась вентиляционная зона: на емкости N1 — диаметром DN 250, на емкости N2 DN 585 или DN 775. В испытательной установке применялись трубы номинального диаметра DN 150 и длиной 3, 6 и 10 м.

Все испытания проводились при барометрическом давлении и температуре окружающей среды. Для измерения давления использовался комплект фирмы «Kistler», хранение данных обеспечивалось с помощью регистратора Cronos FLEX фирмы IMC. Процесс регистрировался двумя скоростными камерами.

## ВЗРЫВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЕМКОСТЯХ

Крупномасштабные взрывные испытания полиэтиленовой пыли включали в себя:

— измерение максимального давления взрыва  $p_{\max}$ , индекса взрывопожароопасности пыли  $K_{\text{St}}$  и максимальной скорости роста дав-



Рис. 1. Давление взрыва полиэтиленовой пыли в изолированных емкостях

ления в закрытом сосуде  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ ,

— измерение редуцированного давления взрыва и редуцированной скорости нарастания давления  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$  в сосуде с зоной вентиляции.

Полученные результаты приведены в табл. 1 и на рис. 1. В таблице для сравнения указано значение  $p_{\max}$ , полученное во взрывном автоклаве при лабораторных испытаниях.

Обнаружено, что в крупномасштабных испытаниях с емкостями N1 и N2 и с соответствующим оборудованием параметры  $p_{\rm max}$  и  $K_{\rm St}$ достигают более высоких значений, чем в лабораторных экспериментах.

Максимальное давление взрыва определяет сопротивление давлению, на которое должен Таблица 2

Параметры взрыва в емкости N1 (1.35 м<sup>3</sup>) с вентилируемой зоной DN 250 и с установленным трубопроводом разной длины

Длина трубы, м	$p_{red}$ , бар	$\left(rac{dp}{dt} ight)_{red}$ , бар/с
3	0.340	123
6	0.420	139
10	0.390	133

Примечание.  $p_{red}$  — давление взрыва в емкости N1 с установленной трубой длиной 3, 6 или 10 м без подключения емкости N2.





Рис. 2. Результаты испытаний с вентиляционной зоной и трубопроводом разной длины при инициировании смеси в емкости N1 (1.35 м<sup>3</sup>):

1 — только вентиляционная зона, 2–4 — вентиляционная зона и труба длиной 3 (2), 6 (3), 10 м (4)

быть рассчитан контейнер, содержащий турбулентную полиэтиленовую пыль в рассматриваемом диапазоне давлений при взрыве. Наилучшей формой взрывозащиты являются контейнеры, устойчивые к максимальному давлению взрыва. Но если эти контейнеры соединены трубопроводом и между ними может распространяться взрыв, то в целом такое устройство может оказывать, по крайней мере, такое же сопротивление давлению взрыва.

В качестве взрывозащитных мер важное значение имеет установка вентиляционных зон в резервуарах. Если одновременно со взрывом открывается зона вентиляции, устройство меньше подвергается давлению взрыва. Зона вентиляции позволяет обеспечить контроль взрыва и предотвратить повреждение устройства с учетом его сопротивления давлению.

Таблица З

Длина трубы, м	$p_{red}$ , бар	$\left(rac{dp}{dt} ight)_{red}$ , бар/с
3	0.230	152
6	0.160	123
10	0.160	123

Параметры взрыва в емкости N2 (5.45 м<sup>3</sup>) с вентилируемой зоной DN 775 и с установленным трубопроводом разной длины

Примечание.  $p_{red}$  — давление взрыва в емкости N2 с установленной трубой длиной 3, 6 или 10 м без подключения емкости N1.



Рис. 3. Результаты испытаний с вентиляционной зоной и трубопроводом разной длины при инициировании смеси в емкости N2  $(5.45 \text{ m}^3)$ :

1 — только вентиляционная зона, 2–4 — вентиляционная зона и труба длиной 3 (2), 6 (3), 10 м (4)

## ВЗРЫВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ С ЗОНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ И УСТАНОВЛЕННЫМИ ТРУБОПРОВОДАМИ РАЗНОЙ ДЛИНЫ

Испытания проводились в резервуарах N1 и N2, на которые устанавливались трубы диаметром DN 150, длиной 3, 6 и 10 м. При этом в первом типе испытаний вентиляционная зона на резервуаре отсутствовала, во втором типе испытаний в верхней части резервуара устанавливалась вентиляционная зона.

В табл. 2 приведены результаты взрывных испытаний в резервуаре N1 с диаметром зоны вентиляции DN 250 и с установленной трубой длиной 3, 6, 10 м — давление взрыва  $p_{red}$  и скорость повышения давления  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$ . Изменение давления  $p_{red}$  во времени показано также на рис. 2. В табл. 3 и на рис. 3 приведены

Тип устройства	Длина	$\left(\frac{dp}{dp}\right)$ fap/c	$p_{redN1}$ ,	$\begin{array}{c} p_{redN1}, & p_{redN2}, \\ & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ \end{array}$	$p_{red},$ бар в трубе длиной, м			$v_{ex}$ ,
тип устроиства	трубы, м	$\left( dt \right)_{red}^{red}, \text{ oup/c}$	бар		3	6	10	м/с
	3	90.490	2.185		0.275			71.5
Емкость N1 (1.35 $ M^3 ) $	6	90.490	2.175		0.640	0.210		111.5
	10	90.490	2.470			1.150	0.620	207.0
	3	123	0.340		0.020			57.3
Емкость N1 + вентиляция DN 250	6	139	0.420		0.305	0.020		117.5
	10	133	0.390			0.396	0.080	144.0
	3	65.385		4.525	1.385			262.0
Емкость N2 $(5.45 \text{ m}^3)$	6	65.385		4.615	2.210	1.390		267.5
	10	65.385		4.805		1.790	1.185	267.5
	3	152		0.185	0.013			205.0
Емкость N2 + вентиляция DN 775	6	123		0.170	0.160	0.014		132.5
	10	123		0.150		0.140	0.013	116.5

Таблица 4 Параметры взрыва образцов полиэтиленовой пыли в изолированных емкостях N1, N2 и в этих емкостях с трубами

соответствующие результаты взрывных испытаний в сосуде N2 с вентиляционным отверстием DN 775 и установленной трубой длиной 3, 6, 10 м.

В табл. 4 приведены параметры взрыва  $p_{red}$  и  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$ , измеренные в закрытых сосудах и в сосудах с вентиляционной зоной и трубопроводами, соединяющими сосуды. Видно, что эти параметры заметно отличаются. В табл. 4 также указана скорость пламени  $v_{ex}$  для подключенной трубы. В случае подсоединения трубопровода к резервуару были проведены измерения  $p_{red}$  в самом резервуаре, а также в подключенном трубопроводе.

## ВЗРЫВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ В СОЕДИНЕННЫХ МЕЖДУ СОБОЙ СОСУДАХ

Испытания в сосудах N1 и N2, соединенных трубами диаметром DN 150 и длиной 3, 6 и 10 м, с установленной в верхней части емкости вентиляционной зоной проводились с целью измерения скорости пламени в трубопроводе  $v_{ex}$  и давления взрыва (табл. 5), а также с целью проверки возможности передачи взрыва.

Пылевоздушная смесь формировалась в обоих сосудах, а инициировалась только в одном из них. Передача взрыва была разрешена в обоих направлениях. Первоначально инициировалась смесь в сосуде N1, и взрыв передавался по трубопроводу в сосуд N2, где наблюдалось падение давления. Впоследствии направление передачи взрыва менялось на противоположное: смесь инициировалась в сосуде N2, а взрыв передавался по трубопроводу в сосуд N1, где наблюдалось повышение давления. Скорость пламени и фронт пламени всегда измеряли от сосуда, в котором происходило первое зажигание.

Взрывные испытания с соединенными резервуарами показали, что распространение взрыва от емкости N2 к N1 приводит к значительному увеличению редуцированного давления взрыва, несмотря на установленную вентиляционную зону на обеих емкостях. Перенос пламени в резервуарах, соединенных трубопроводами во время испытания на взрыв, иллюстрирует рис. 4. Опыты показали, что установка вентиляционной зоны в качестве взрывозащиты оказалась недостаточной и необходимы дополнительные элементы взрывозащиты.

## ПЕРЕДАЧА ВЗРЫВА ИЗ ЕМКОСТИ N1 В ЕМКОСТЬ N2

Были проведены испытания с подключением трубопровода и второй емкости N2. В табл. 6 и 7 представлены для сопоставления результаты различных тестов. Из этих дан-

#### Таблица 5

Направление Длина взрыва трубы, м		$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{re}$	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red},$ 6ap/c		$p_{red},$ бар		
	10 /	N1	N2	N1	N2	в трубе	
	3	224	222	0.972	0.450	0.441	35.5
$\rm N1 \rightarrow \rm N2$	6	173	185	0.614	0.325	0.263	38.0
	10	105	162	0.255	0.257	0.255	36.0
	3	218	159	0.930	0.250	0.590	43.5
$\mathrm{N1} \leftarrow \mathrm{N2}$	6	215	151	0.908	0.228	0.855	44.5
	10	225	154	0.980	0.236	0.133	63.0

Параметры взрыва образца полиэтиленовой пыли в соединенных между собой емкостях N1 (DN 250), N2 (DN 775) и в трубах

Таблица б

Результаты измерения максимального редуцированного давления взрыва в емкостях N1 и N2 при инициировании смеси в емкости N1

	Емкость N1 (1.35 м <sup>3</sup> )		Емкос	сть N2 $(5.45 \text{ м}^3)$
Труба, м	$p_{redN12},$ бар	$\left(rac{dp}{dt} ight)_{red}$ , бар/с	$p_{redN12'},$ бар	$\left(rac{dp}{dt} ight)_{red}$ , бар/с
3	0.972	224 (+82 %)	0.450	222 (+46 %)
6	0.614	173 (+25 %)	0.325	185 (+50 %)
10	0.255	105 (-22 %)	0.257	162 (+32 %)

Примечания. <br/>  $p_{redN12}$  — редуцированное давление в емкости N1,<br/>  $p_{redN12'}$  — редуцированное давление в емкости N2.

## Таблица 7

Редуцированное давление взрыва в емкостях, соединенных между собой трубами различной длины, при инициировании смеси в емкости N1 (1.35 м<sup>3</sup>)

Длина трубы, м	$t_i,\mathrm{c}$	$t_x,\mathrm{c}$	$p_{redN12},$ бар	$p_x,$ бар
3	0.0988		0.972	
6	0.1756	$t_3 - t_6 = 0.0768$	0.614	$p_3 - p_6 = 0.358$
10	0.2523	$t_6 - t_{10} = 0.0767$	0.255	$p_6 - p_{10} = 0.359$

 $\Pi$ римечания.  $t_i$  — время от момента иниции<br/>рования до достижения редуцированного давления взрыв<br/>а $p_{redN12},\,t_x$  — разница во времени,  $p_x$  — разница давлений.



Рис. 4. Пример передачи пламени в соединенных трубопроводами емкостях во время взрывного теста

ных видно, что подсоединение трубы оказывает влияние, особенно это заметно для емкости N2.

В табл. 6 приведены максимальные редуцированные давления взрыва в емкости N1 и отклик при передаче взрыва в емкость N2, а в табл. 7 показана также разница давлений при разных длинах труб. В случае соединения сосудов скорость увеличения давления взрыва  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$  изменилась по сравнению с взрывом в емкости только с подсоединенным трубопроводом. Значения приращения, отсчитываемые от величины  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$  в тестах с изолированными емкостями (см. табл. 2, 3), указаны в скобках. Избыточное давление возникает из-за завихрения полиэтиленовой пыли в емкости N1. Это создает избыточное давление во всей системе сообщающихся емкостей. При более коротком соединении между емкостями создается более высокое начальное давление (предкомпрессия), что влияет на повышение давления при взрыве.

При взрыве смеси в резервуаре N1, где произошло его инициирование, возникает эффект избыточного давления, благодаря которому газ из емкости N2 через соединительную трубу длиной 3 м «выталкивается» в емкость N1. В результате в резервуаре N1 происходит предварительное сжатие смеси, вследствие чего параметры  $p_{red}$  и  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$  достигают значений во много раз выше, чем в условиях, когда взрыв происходит только в резервуаре N1

с вентиляционной зоной.

Избыточное давление от емкости N2 уменьшается с увеличением длины присоединенного трубопровода. При длине трубы 3 м давление  $p_{red}$  было примерно вдвое выше, чем в тесте с вентиляционной зоной без подключения труб. В случае с трубой длиной 6 м значение  $p_{red}$  примерно на треть выше, чем  $p_{red}$ в тесте без подключенных труб. Влияние начального избыточного давления от резервуара N2 пренебрежимо мало в случае емкостей, соединенных трубой длиной 10 м.

Вся испытательная система, т. е. обе емкости N1 и N2, была с вентиляционными отверстиями, поэтому эффект предварительного сжатия не так заметен, если система будет закрытой. Цель использования емкости с вентиляционными отверстиями состояла в том, чтобы сделать их похожими на емкости, применяемые на практике.

Рис. 5 иллюстрирует влияние длины трубы (3, 6, 10 м) на давление в опытах с соединенными резервуарами. В этих испытаниях наличие второго резервуара приводит к созданию избыточного давления при завихрении полиэтиленовой пыли. Чем короче труба, тем больше предварительное сжатие смеси в резервуаре N1 и, следовательно, выше давление взрыва в нем. Это подтверждается расположением пика давления на оси времени при использовании трубопроводов различной длины. Из приведенных на рис. 5 и в табл. 6 результатов можно сделать вывод, что если на практике взрыв происходит в более крупном резервуаре или если поток отработанного воздуха направлен в резервуар меньшего объема, то важ-



Рис. 5. Изменение давления при передаче взрыва и взрывной отклик в емкости. Инициирование смеси в емкости N1 (1.35 м<sup>3</sup>):

1 — только вентиляционная зона, 2–4 — взрыв в емкости N1, вентиляционная зона и труба длиной 3 (2), 6 (3), 10 м (4); 5–7 — взрыв в емкости N2, вентиляционная зона и труба длиной труба длиной 3 (5), 6 (6), 10 м (7); 8–10 — взрывной отклик при передаче взрыва от N1 к N2 с трубой длиной 3 (8), 6 (9), 10 м (10)

#### Таблица 8

Результаты измерения максимального редуцированного давления взрыва в емкостях N1 и N2 при инициировании смеси в емкости N2

	Емкость N2 $(5.45 \text{ m}^3)$		Емкость N1 (1.35 м <sup>3</sup> )		
Длина трубы, м	$p_{redN21},$ бар	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$ , бар/с	$p_{redN21},$ бар	$\left(rac{dp}{dt} ight)_{red}$ , бар/с	
3	0.250	159 (+5 %)	0.930	$218 \ (+77 \ \%)$	
6	0.228	151 (+22 %)	0.908	215~(+55~%)	
10	0.236	154 (-25 %)	0.980	225 (+69 %)	

Примечания. <br/>  $p_{redN21}$  — редуцированное давление в емкости N2,<br/>  $p_{redN21'}$  — редуцированное давление в емкости N1.

#### Таблица 9

Редуцированное давление взрыва в емкостях, соединенных между собой трубами различной длины, при инициировании смеси в емкости N2 (5.45 м<sup>3</sup>)

Длина трубы, м	$t_i,\mathrm{c}$	$t_x,\mathrm{c}$	$p_{redN21}$ , бар	$p_x$ , бар
3	0.2498		0.930	
6	0.2586	$t_3 - t_6 = 0.0088$	0.908	$p_3 - p_6 = 0.022$
10	0.2830	$t_6 - t_{10} = 0.0244$	0.980	$p_6 - p_{10} = -0.072$

 $\Pi$ р и мечания. <br/>  $t_i$ — время от момента инициирования до достижения редуцированного давления в<br/>зрыва  $p_{redN21},\,t_x$ — разница во времени, <br/>  $p_x$ — разница давлений.



Рис. 6. Изменение давления при передаче взрыва и взрывной отклик в емкости. Инициирование смеси в емкости N2 (5.45 м<sup>3</sup>):

1 — только вентиляционная зона, 2–4 — взрыв в емкости N2, вентиляционная зона и труба длиной 3 (2), 6 (3), 10 м (4); 5–7 — взрыв в емкости N1, вентиляционная зона и труба длиной 3 (5), 6 (6), 10 м (7); 8, 9 — взрывной отклик при передаче взрыва от N1 к N2 с трубой длиной 3 (8) и 6 м (9)

ное значение приобретает контроль расстояния (длина трубопровода) между подключенными сосудами. По мере уменьшения длины соединения предварительное сжатие возрастает, и, таким образом, можно ожидать более высоких максимальных параметров взрыва, что повлияет на конструктивные элементы, и это необходимо учитывать при проектировании взрывозащиты.

### ПЕРЕДАЧА ВЗРЫВА ИЗ ЕМКОСТИ N2 В ЕМКОСТЬ N1

В табл. 8, 9 приведены результаты взрывных испытаний устройств с трубопроводами различной длины. Эти данные иллюстрируют влияние подключенного трубопровода. Более детальная оценка подключения второй емкости N1 проводится далее в тексте.

В табл. 8 представлены максимальные значения редуцированного давления взрыва в резервуаре N2 и взрывной отклик этого давления при передаче взрыва в резервуар N1. В случае соединения резервуаров трубопроводом скорость увеличения давления взрыва  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$  также изменилась по сравнению со скоростью взрыва в одном сосуде с подсоединенным трубопроводом заданной длины (приращения скорости роста давления  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{red}$  от

скорости, определенной в тесте для изолированной емкости (см. табл. 2, 3), указаны в скобках).

Рис. 6 и табл. 8 иллюстрируют влияние длины трубы (3, 6, 10 м) при соединении емкостей. Установлено, что длина трубы не влияет на присоединенную емкость меньшего объема, в которой не проводится инициирование. Избыточным давлением, которое создается мешалками, можно пренебречь.

Этот тип испытаний подтвердил теоретическое предположение о том, что взрыв, распространяющийся от большей емкости к меньшей, оказывает значительное влияние на редуцированное давление и скорость взрыва в резервуаре, в который распространяется взрыв.

В опыте с трубопроводом длиной 3 м отсутствовал эффект от соединения емкостей между собой. Так как объем N1 мал по сравнению с объемом N2, избыточное давление, которое возникало в этом небольшом объеме, не влияло на возникновение взрыва в резервуаре N2.

Испытания с трубой длиной 6 м показали значительное повышение давления, обусловленное отражением имульса давления от емкости N1. Это явление наиболее заметно именно при длине трубопровода 6 м и зависит от диаметра трубы.

Обвем пламени при передаче взрыва				
Тип устройства	Объем пламени, м $^3$			
N1 с трубой	8.77			
Соединенные емкости — инициирование в N1	185.63			
N2 с трубой	130.99			
Соединенные емкости — инициирование в N2	15.10			

Таблица 10 Объем пламени при передаче варыва

Испытания с подсоединенной трубой длиной 10 м обнаружили эффект предварительного сжатия, т. е. взрыв передается из большего объема (емкость N2) в меньший (емкость N1) и в меньшем объеме сжимает турбулентную взрывчатую смесь. Параметры взрыва при этом значительно превышают параметры в изолированной емкости того же объема.

В испытаниях по передаче взрыва от большего сосуда к меньшему получены результаты, соответствующие теоретическим допущениям: длина соединительной трубы не оказывает существенного влияния.

Проведенные исследования показали, что на практике необходимо ответственно подходить к проектированию системы взрывозащиты устройств, использующих разгрузочные поверхности и изолирующих воздействие взрыва.

#### ОБЪЕМ ПЛАМЕНИ

В ходе крупномасштабных взрывных испытаний была проведена оценка объема пламени, возникающего при взрыве в сосудах N1 и N2 (табл. 10).

Измерения объема пламени проводились на емкости N1 с вентиляционным отверстием диаметром DN 250 и на емкости N2 с отверстием для отвода воздуха диаметром DN 775 и с трубой DN 150 длиной 6 м. Объем пламени увеличивался с увеличением объема сосуда и размера вентиляционного отверстия. В случае передачи пламени между емкостями его объем всегда больше объема пламени в самом резервуаре. Наибольший объем пламени зафиксирован на емкости N2 при переходе из N1 в N2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пожарно-технические характеристики веществ, взятые из литературы, дают в основном ориентировочные значения, поскольку они зависят от нескольких условий, таких как влажность, размер и форма частиц пыли, но благодаря проведенным исследованиям становится понятным их поведение в зависимости от условий эксплуатации. Недооценка этого результата может привести к неправильному определению опасности взрыва и, следовательно, к недооценке взрывозащитных мер.

В работе изучались специфические свойства и поведение полиэтиленовой пыли не только в лабораторных условиях, но и в ходе крупномасштабных испытаний, в которых была опробована реальная конструкция технологического оборудования. Было исследовано влияние таких факторов, как объем, форма, расположение резервуаров и турбулентность, на протекание взрыва. Авторы пришли к следующим выводам.

• Образцы, содержащие частицы разного размера — очень мелкие, менее 0.5 мм, и нетипичные волокнистые частицы размером более 1 мм — ведут себя как пыль.

• Пожарно-технические характеристики — максимальное давление  $p_{\rm max}$  и индекс взрывопожароопасности пыли  $K_{\rm St}$  — при использовании оборудования больших объемов достигают более высоких значений по сравнению с полученными в лабораторных условиях. Давление взрыва в заводских условиях превышает лабораторные значения взрывного давления.

• Образцы полиэтиленовой пыли можно отнести к классу взрывопожароопасности St1 со значениями  $K_{\rm St} \leqslant 200$  бар · м/с. Очевидно, что при крупномасштабных испытаниях проявлялось влияние турбулентности, которая вызывала увеличение скорости роста давления и влияла на максимальные параметры взрыва.

• Предложено создавать вентиляционную зону в резервуаре с пылевоздушной смесью, что, наряду с существующей у оборудования сопротивляемостью давлению, позволяет контролировать взрыв и предотвращать повреждение оборудования.

• Системы трубопроводов, подключенные к технологическому оборудованию, должны быть защищены от неблагоприятного воздействия взрыва.

• При распространении взрыва от емкости большего объема к емкости меньшего объема редуцированное давление взрыва значительно возрастает, несмотря на установленные в обеих емкостях вентиляционные отверстия. Для обеспечения достаточной взрывозащиты помимо отверстий для выпуска газа необходимо использовать другие элементы конструкции резервуаров.

• Если на практике взрыв происходит в резервуаре большего объема и поток удаляемого воздуха направлен в сосуд меньшего объема, то в этих условиях важно контролировать расстояние (длину трубопровода) между соединенными емкостями.

Полиэтиленовая пыль, образующаяся при производстве и хранении полиэтиленовых гранул, очень взрывоопасна в смеси с воздухом. Самой распространенной мерой уменьшения риска взрыва являются пылеуловители, на которых возникает или затухает взрыв. Проектирование защиты пылесборника требует информации как о процессе, так и о цели защиты [10].

Для детального анализа взрывопожаробезопасности конструкции важно знать характеристики применяемых в технологии веществ и рабочие условия, в которых протекает процесс.

Для взрывобезопасности технологии важны также определение концентрации пыли внутри технологического оборудования, оседание и налипание пыли, оценка возможностей и эффективности источников инициирования, которые могут привести к возникновению взрывоопасной среды.

### ЛИТЕРАТУРА

- Yan X.-Q., Yu J.-L. Dust explosion incidents in China // Process Saf. Prog. — 2012. — V. 31, N 2. — P. 187–189. — DOI: 10.1002/prs.11482.
- Orlíková K., Štroch P. Chemistry of Combustion Processes. — Ostrava: SPBI Spektrum, 1999.
- 3. Bartknecht W. Dust Explosions: Course, Prevention, Protection. — Berlin; Heidelberg: Springer, 2011.
- 4. EN 14034-3 (38 9684): 2006. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds.
- 5. **Damec J.** Explosion Prevention. Ostrava: SPBI Spektrum, 2005.
- Bartlová I., Damec J. Prevention of Technological Equipment. — Ostrava: SPBI Spektrum, 2002.
- Eckhoff R. K. Dust Explosions in the Process Industries. — Elsevier Science; Gulf Professional Publ., 2003.
- 8. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20L and 1 m<sup>3</sup> explosion vessels // Process Saf. Prog. — 2021. — V. 40, N 4. — P. 289–295. — DOI: 10.1002/prs.12249.
- Jankůj V., Bernatík A. Influencing of maximum explosive parameters of ignition energies of dust-air mixtures // Trans. VSB Tech. Univ. Ostrava, Saf. Eng. Ser. 2018. V. 13, N 2. P. 25–32. DOI: 10.2478/tvsbses-2018-0009.
- Going J. E., Lombardo T. Dust collector explosion prevention and control // Process Saf. Prog. — 2007. — V. 26, N 2. — P. 164–176. — DOI: 10.1002/prs.10166.

Поступила в редакцию 23.08.2021. После доработки 20.10.2021. Принята к публикации 12.01.2022.