

УДК 536.46:614.841

## РЕЖИМЫ МНОЖЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ВЗРЫВОВ ПЫЛИ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

L. Pang<sup>1,2</sup>, Z.-W. Zhang<sup>1</sup>, Y. Zhao<sup>1</sup>, S.-Q. Huang<sup>1</sup>, Q.-R. Hu<sup>1</sup>, J.-J. Zhao<sup>3</sup>,  
K. Yang<sup>1,2</sup>, S.-H. Sun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Пекинский институт нефтехимических технологий, Пекин 102617, Китай, sunsiheng@bipt.edu.cn

<sup>2</sup>Пекинская академия техники безопасности и технологий, Пекин 102617, Китай

<sup>3</sup>Пекинский муниципальный институт защиты труда, Пекин 100054, Китай

Проведены эксперименты по множественной вентиляции, вызванной разрывом вентиляционной мембраны при взрыве кукурузного крахмала в малогабаритном контейнере. Всестороннее исследование с целью выявления физических механизмов осуществлялось с применением высокоскоростной камеры и датчика давления. Результаты показали, что число вентиляций обратно пропорционально давлению открытия и максимально равно трем. Лишь при первой вентиляции внутреннее давление взрыва меняется значительно. Поведение пламени существенно различается в разных вентиляциях даже при одинаковых рабочих условиях. Первое выходное пламя имеет форму недорасширенной струи (с точечными искрами спереди), второе является ярким и сферическим (без искр), а в третьей вентиляции пламя тусклое и имеет полосатый рисунок. Кроме того, чем раньше включается вентиляция, тем больше средняя скорость пламени снаружи. С увеличением давления открытия уменьшаются максимальное расстояние и время распространения пламени в первой вентиляции; параллельно увеличиваются средняя скорость и максимум мгновенной скорости пламени. При второй вентиляции такого явления не наблюдается, хотя яркость пламени постепенно уменьшается. В целом полученные результаты могут обеспечить теоретическую основу для безопасного проектирования взрывозащиты и дальнейшего исследования механизма взрыва.

Ключевые слова: взрыв пыли, вентиляция взрыва, давление открытия, скорость пламени, морфология пламени.

DOI 10.15372/FGV20210509

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы взрывы пыли происходят довольно часто. В качестве одной из основных технических мер их предупреждения используется вентиляционное прерывание взрыва. Этот способ прост и экономичен по сравнению с изоляцией, подавлением и взрывозащитой. В реальном производственном процессе обычно выбирается избыточное давление открытия поверхности взрыва менее 0.1 МПа, что позволяет своевременно высвободить взрывчатые вещества в контейнере и эффективно защищать контейнер. Однако пламя и волны давления, возникающие в результате взрыва, мо-

гут представлять вторичную опасность для находящихся поблизости людей и окружающей среды [1, 2]. Требуется их изучение, с тем чтобы разработать эффективные меры контроля.

На процесс вентиляции взрыва пыли влияет множество факторов, таких как давление открытия, размер вентиляционной конструкции, место воспламенения. Влияние размера выпускного отверстия, закрытого полиэтиленовой мембраной, и давления его открытия на внутреннее давление в сферической камере объемом 20 л изучалось в [3–5]; установлено, что максимальное внутреннее избыточное давление в сосуде уменьшалось с увеличением размера отверстия, но увеличивалось с ростом давления открытия. Влияние места воспламенения на внутреннее избыточное давление взрыва было исследовано в [6–9]; обнаружено, что при вентиляционном взрыве кукурузного крахмала в силосной башне объемом 236 м<sup>3</sup> при воспламенении на дне бункера пиковые

© Pang L.<sup>1,2</sup>, Zhang Z.-W.<sup>1</sup>, Zhao Y.<sup>1</sup>, Huang S.-Q.<sup>1</sup>,  
Hu Q.-R.<sup>1</sup>, Zhao J.-J.<sup>3</sup>, Yang K.<sup>1,2</sup>, Sun S.-H.<sup>1,2</sup>, 2021.

<sup>1</sup>School of Safety Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China. <sup>2</sup>Beijing Academy of Safety Engineering and Technology, Beijing 102617, China. <sup>3</sup>Beijing Municipal Institute of Labor Protection, Beijing 100054, China.

значения внутреннего давления всегда максимальны; более того, чем дальше от дна находится очаг возгорания, тем меньше внутреннее избыточное давление в силосной башне. Эксперименты по вентиляционному взрыву пыли в сосудах [10–12] показали, что внутреннее избыточное давление взрыва постепенно увеличивается с уменьшением размера выпускного отверстия. Кроме того, при достаточно малых его размерах почти сферическая форма пламени сменяется струйным течением. В [13] исследовались вентиляционные взрывы пыли кукурузного крахмала в двух больших резервуарах (объемом 10 и 100 м<sup>3</sup>). Измерены интенсивность и скорость распространения сформировавшегося турбулентного пламени, установлена линейная положительная корреляция скорости распространения пламени и интенсивности турбулентности. В [14] процесс моделировался с использованием программного обеспечения Flacs-Dust Ex, подтверждено значительное влияние давления открытия и размера вентиляционного устройства на внутреннее давление взрыва в сосуде.

Разрыв вентиляционной мембраны часто приводит к вторичным взрывам за пределами вентиляционной трубы, усугубляя аварию. Предыдущие исследования были сосредоточены на изучении колебаний давления и изменений скорости пламени и его морфологии в резервуаре при взрыве. В [15, 16] с использованием программного обеспечения Flacs-Dust Ex был смоделирован процесс вентиляции взрыва кукурузного крахмала в бункере. Показано, что при большом размере вентиляционного отверстия и низком давлении открытия возможен сильный взрыв вне бункера. В [17] описан вентиляционный взрыв смеси органического порошка и метана в сферической взрывной камере объемом 20 л: с увеличением концентрации метана протяженность пламени за пределами вентиляционного отверстия увеличивалась, а длительность горения уменьшалась. В [4] исследовалось влияние диаметра выпускного отверстия (15, 28 и 40 мм) на распространение пламени при взрыве пыли наночастиц полиметилметакрилата. Результаты показали, что вентиляционные отверстия большего диаметра выпускают больше несгоревших частиц пыли за счет внутреннего избыточного давления, которые горят за пределами резервуара, что в конечном итоге увеличивает яркость внешнего вентиляционного пламени.

Пространственные и временные характеристики распространения пламени за пределами вентиляционной конструкции являются ключевыми факторами, влияющими на вторичные взрывы вне сосудов. В [18] сообщалось о результатах эксперимента в сферическом сосуде с использованием выпускных отверстий диаметром 40 и 60 мм при давлении открытия 0.12 МПа: разрыв вентиляционной мембраны вызвал вторичный вентиляционный взрыв. Хотя в вышеупомянутом исследовании не анализировались механизмы, лежащие в основе вторичного вентиляционного взрыва, его результаты вызвали опасения относительно влияния таких взрывов на внутреннее давление и возможное повреждение сосуда. Различия характеристик пламени вторичного и первичного вентиляционных взрывов, а также определение уровня опасности для внешней среды требуют тщательного изучения. В настоящей работе с использованием кукурузного крахмала исследуются динамические процессы, связанные с вентиляционным выбросом пыли при взрыве в небольшом сосуде при различных давлениях открытия и типах распространения пламени за пределы выпускной конструкции; в частности, уделено внимание режимам и определяющим факторам множественной вентиляции взрыва. Результаты этого исследования дают прочную основу для расшифровки механизмов взрыва пыли и разработки соответствующих мер безопасности.

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### 1.1. Экспериментальная установка

Для изучения характеристик пламени вне взрывной камеры в процессе вентиляционного взрыва был создан экспериментальный стенд, включающий в себя взрывную камеру, вакуумную систему, систему пылеудаления, систему зажигания, систему сбора данных и высокоскоростную камеру (рис. 1). Внутренний диаметр взрывной камеры 248 мм, отношение длины к диаметру 1 : 1, общий объем камеры приблизительно 12 л. На цилиндрической стенке контейнера имеется вентиляционное отверстие диаметром 40 мм. Для наблюдения за внутренним пламенем на стенке сосуда установлено окно с жаростойким высокопрочным кварцевым стеклом толщиной 35 мм, его площадь равна площади поперечного сечения сосуда. К

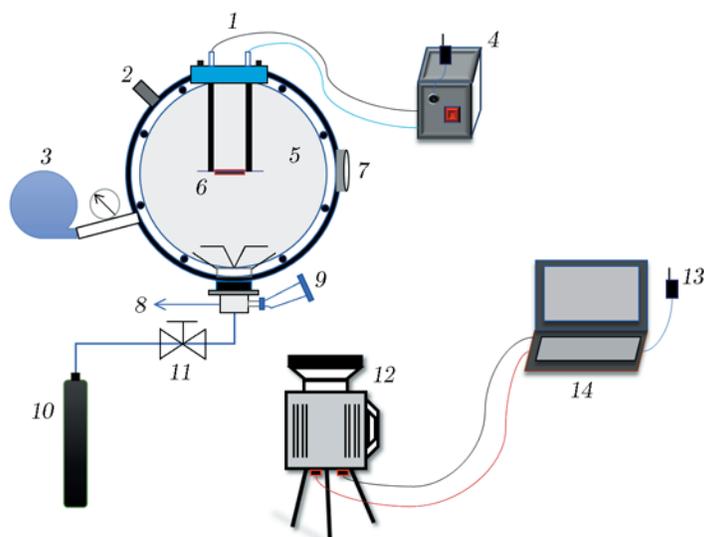


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — электрод зажигания, 2 — датчик давления, 3 — вакуумный насос, 4 — блок управления и сбора данных, 5 — зеркало, 6 — разрядная игла, 7 — взрывное отверстие, 8 — электромагнитный клапан, 9 — пылесборная камера, 10 — источник газа, 2 МПа, 11 — пневматический клапан, 12 — высокоскоростная камера, 13 — приемник данных, 14 — компьютер

нижней боковой части сосуда подключен вакуумный насос, обеспечивающий в сосуде заданный уровень вакуума. Система диспергирования пыли состоит из баллона со сжатым воздухом, электромагнитного клапана, пылесборной камеры (0.6 л), пневматического клапана и диффузора для пыли. Зажигание проводилось химическим методом; на центральном запальном электроде был установлен химический воспламенитель (20 Дж). Система сбора данных включала в себя компьютер, датчик давления и устройство передачи данных. Пьезорезистивный датчик давления (модель РМС 131; максимальный диапазон 3 МПа, точность 0.25 %, интервал измерения давления 0.2 мс), установленный внутри резервуара над электродом зажигания, регистрировал и передавал все изменения давления во взрывной камере в компьютер через устройство передачи данных. Кроме того, была использована высокоскоростная камера серии Phantom для регистрации распространения пламени за пределы резервуара. Камера была снабжена внешним триггером и электронным затвором, что обеспечивало одновременный запуск системы зажигания. Фактическая скорость записи во время эксперимента составляла 2500 кадр/с. Каждый кадр имел разрешение  $1280 \times 504$  пикселей и выдержку 300 мкс.

## 1.2. Экспериментальные материалы

Образец пыли, использованный в эксперименте, состоял из кукурузного крахмала Gufu, производимого компанией Beijing Minsong Co., Ltd. Крахмал сначала сушили в печи при  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 12 ч, а затем герметично закрывали. Гранулометрический состав изучали с помощью лазерного анализатора ВТ-9300LD. Результаты представлены на рис. 2, средний диаметр образца  $D_{50} = 16.24\text{ }\mu\text{м}$ .

Поверхностную морфологию образца кукурузного крахмала и его геометрические раз-

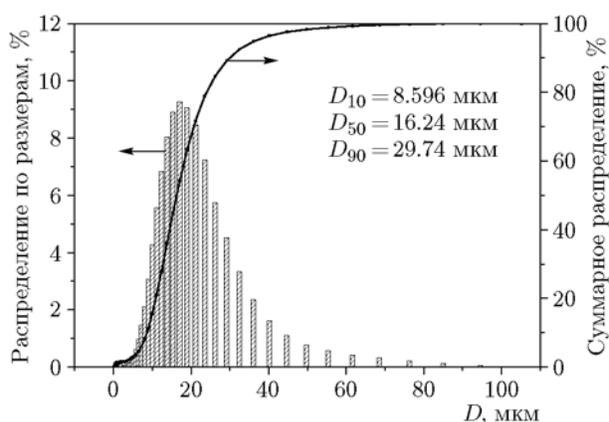


Рис. 2. Распределение частиц по размерам в образце

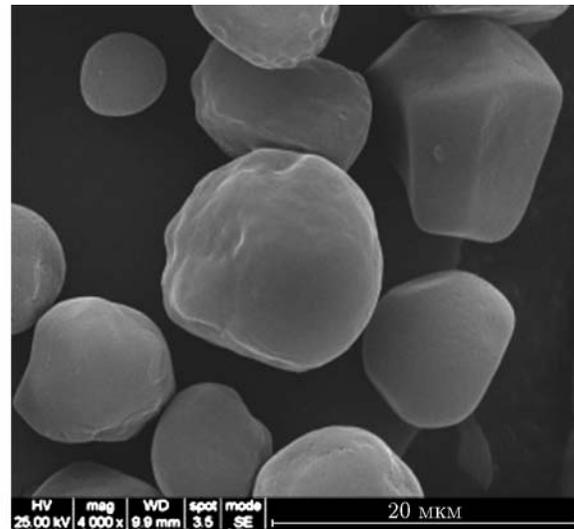
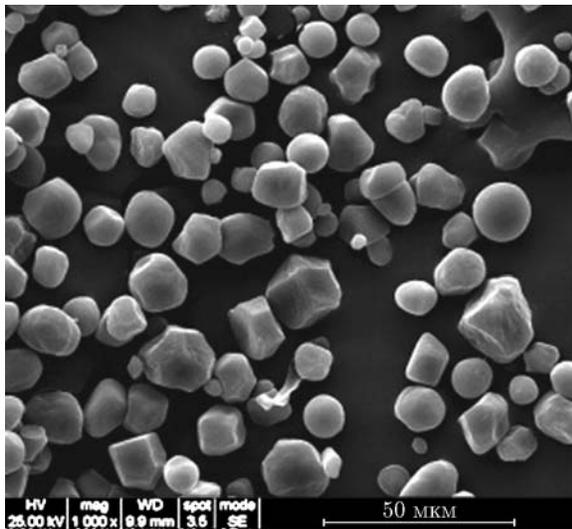


Рис. 3. СЭМ-изображения образцов пыли кукурузного крахмала

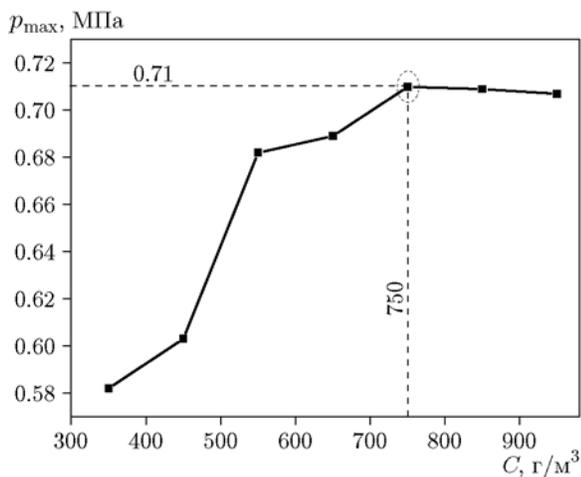


Рис. 4. Максимальные избыточные давления при различных концентрациях пыли в среде

меры анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) FEI Quanta 600. Результаты анализа показаны на рис. 3: частицы образца имеют относительно небольшое соотношение сторон, правильную форму и гладкую поверхность.

### 1.3. Методика эксперимента

Перед началом эксперимента были определены максимальные давления взрыва пыли при различных ее концентрациях в герметичной среде. Эти предварительные испытания проводились в цилиндрической взрывной камере объемом 12 л, результаты показаны на

рис. 4. Самое высокое значение максимального избыточного давления взрыва составило  $p_{max} = 0.710$  МПа и наблюдалось при концентрации пыли  $C = 750$  г/м<sup>3</sup>. Поэтому все последующие эксперименты проводились при этой концентрации.

Влияние давления открытия вентиляционного канала на характер распространения пламени исследовалось с использованием полиэтиленовой пленки в качестве материала мембраны. Перед экспериментом измерялось статическое давление открытия ( $p_{stat}$ ): внутреннее давление сосуда постепенно увеличивалось вручную до разрыва полиэтиленовой мембраны. Статическое давление открытия при вентиляционном взрыве регулировалось изменением числа слоев полиэтилена. Для каждого числа слоев мембраны проводилось по три измерения подряд. Линейная аппроксимация экспериментальных результатов показана на рис. 5: статическое давление открытия мембраны линейно растет с ростом числа ее слоев ( $n$ ). В последующих экспериментах применялись 3, 6 и 9 слоев мембраны, обеспечивающие давление открытия 0.03, 0.06 и 0.09 МПа соответственно. С учетом этих результатов давление пыли во всех экспериментах ограничивалось значением 0.5 МПа; его было достаточно, чтобы поднять всю пыль и сформировать пылевое облако. Время задержки воспламенения устанавливалось 60 мс. Эксперимент проводился при температуре окружающей среды 295 К и давлении 0.1 МПа.

Чтобы обеспечить точность и воспроизво-

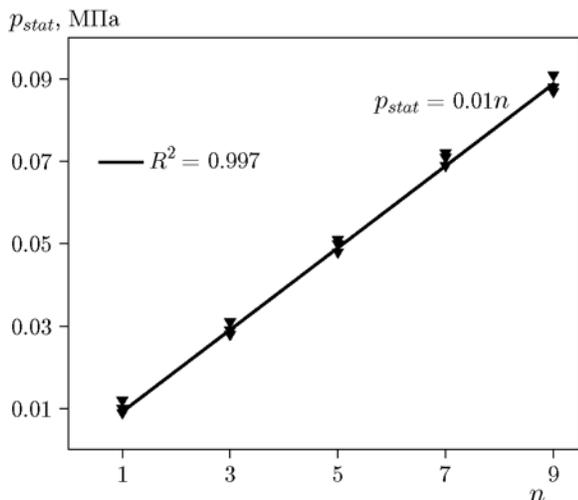


Рис. 5. Влияние числа мембранных слоев на избыточное статическое давление открытия

#### Характеристические параметры давления

Взрыв	$p_{stat}$ , МПа	$p_{max}$ , МПа	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ , МПа/с
В замкнутом объеме	—	0.710	26.5
Вентиляционный	0.03	0.204	10
	0.06	0.221	12
	0.09	0.270	16

димось результатов, было выполнено три серии экспериментов по вентиляции взрыва пыли, отличающиеся давлением открытия, проведен анализ результатов в типичных экспериментальных условиях.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Внутреннее давление в камере и распространение пламени при вентиляционном взрыве

В таблице приведены характеристические параметры давления взрыва в закрытой камере и в условиях вентиляции. В закрытой камере максимальное давление взрыва составляет 0.710 МПа, а соответствующая скорость роста давления — 26.5 МПа/с. Однако при открытии вентиляционной мембраны и увеличении давления открытия с 0.03 до 0.09 МПа максимальное давление взрыва повышается с 0.204 до 0.270 МПа, при этом соответствующая максимальная скорость роста давления увеличива-

ется с 10 до 16 МПа/с. Результаты показывают, что применение простого метода вентиляции взрыва позволяет эффективно снизить как само избыточное давление внутри емкости, так и скорость его роста.

На рис. 6 показана динамика избыточного давления и распространения пламени при различных давлениях открытия; во всех случаях для избыточного давления наблюдаются сходные (возрастающие, а затем убывающие) зависимости.

В момент воспламенения  $t_0$  пыль в сосуде начинает участвовать в реакции горения, выделяется энергия, за счет чего постепенно увеличивается внутреннее давление в сосуде. Когда давление в сосуде превышает давление открытия, вентиляционная мембрана разрывается и инициируется процесс вентиляции взрыва. На его начальной стадии из-за выделения тепла в ходе химических реакций внутри сосуда скорость сброса давления меньше скорости повышения внутреннего давления в сосуде, что обуславливает восходящую ветвь кривой давления. Когда скорость повышения давления и скорость его сброса сравниваются, внутреннее избыточное давление достигает максимума [4].

При увеличении давления открытия вентиляционной мембраны с 0.03 до 0.09 МПа максимальное внутреннее избыточное давление сосуда увеличивается с 0.204 до 0.270 МПа. В момент времени  $t_1$  пламя внутри сосуда распространяется в направлении вентиляционного отверстия. Под действием волны внутреннего давления фронт пламени продвигается вперед, достигая максимального расстояния в момент  $t_3$ . В момент  $t_4$  внутреннее давление в сосуде снижается до давления окружающей среды. Первый выброс вентиляционного пламени завершается в момент  $t_5$ . До начала вентиляции в сосуде образовался соответствующий взрыву недостаток кислорода. Однако после первой вентиляции внутрь поступило некоторое количество свежего воздуха, что способствовало активизации реакции оставшейся несгоревшей пыли. Эта пыль прореагировала в момент  $t_6$ , вызвав вторичный вентиляционный выброс (рис. 6, а, б), пламя которого полностью исчезло к моменту  $t_7$ . Третий выброс пламени при давлении открытия 0.03 МПа произошел в момент  $t_8$  (рис. 6, а). Низкое давление открытия соответствует относительно низкому внутреннему избыточному давлению в камере после первого выброса воздуха; следовательно, пламени по-

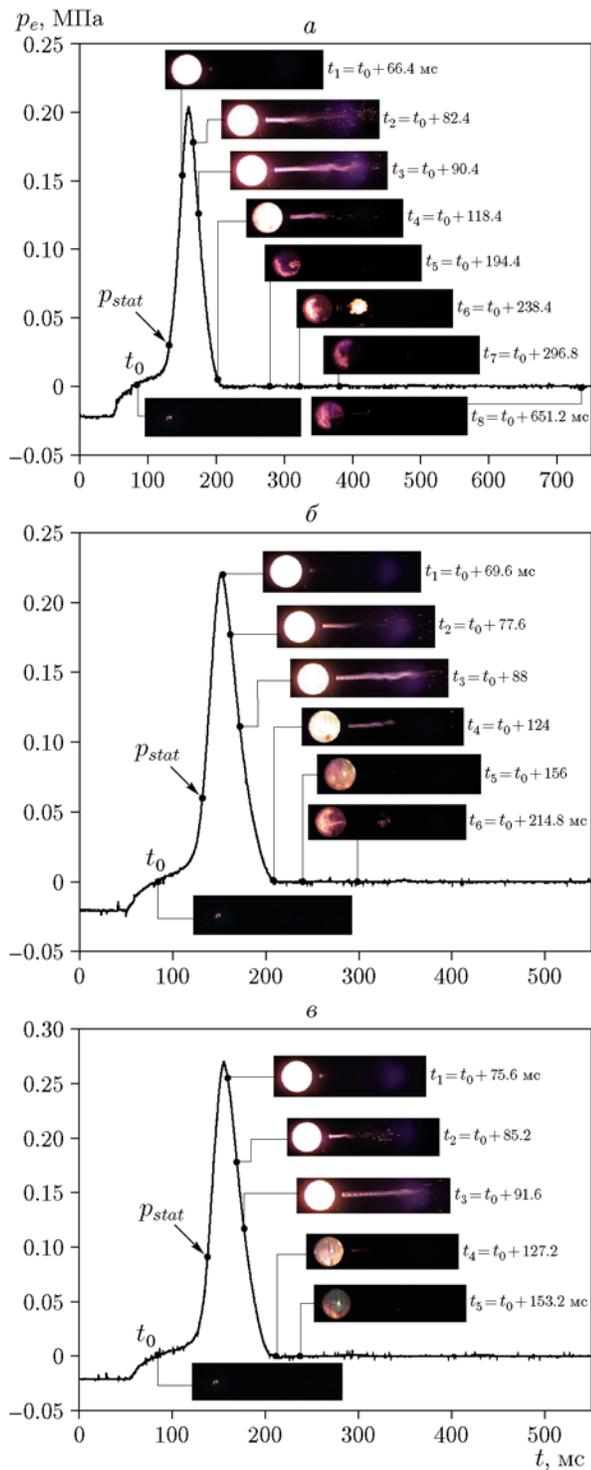


Рис. 6. Изображения пламени и зависимость давления от времени при статических избыточных давлениях открытия 0.03 (*a*), 0.06 (*б*), 0.09 МПа (*в*) ( $t_0$  — время воспламенения)

требовалось мало времени, чтобы пройти через вентиляционное отверстие. После двух стадий вентиляции израсходовалось небольшое количество пыли, значительная ее часть все еще присутствовала в сосуде, что привело к третьему вентиляционному выбросу. В соответствии с графиком зависимости давления от времени и диаграммой пламени при нескольких вентиляциях, как двукратная, так и множественная вентиляция почти не оказывают влияния на внутреннее давление. При множественной вентиляции с выходом пламени давление внутри сосуда падает до величины, близкой к давлению окружающей среды.

## 2.2. Влияние давления открытия на эволюцию пламени

На рис. 7 показан процесс распространения пламени при давлении открытия  $p_{stat} = 0.03$  МПа. Момент  $t = 0$  определен как момент входа пламени в вентиляционный канал. На рис. 7 показаны первый, второй и третий процессы выброса пламени. При начальном распространении фронт пламени двигался непрерывно и демонстрировал типичную картину пламени недорасширенной струи (рис. 7, *a*) [18–20]. Кроме того, он сопровождался большим числом линейных струйных течений и точечных искр. Через 24 мс пламя достигло максимального расстояния и на его фронте появился узор «конский хвост». Затем пламя начало гаснуть и полностью исчезло к 86 мс. К моменту 134 мс, соответствующему второму вентиляционному выбросу, форма пламени изменилась с недорасширенной струи (рис. 7, *a*) на шар. По мере распространения пламени диаметр сферы увеличивался до максимального значения  $\approx 0.153$  м (намного больше диаметра вентиляционного канала). Яркость пламени сначала повышалась, а затем уменьшалась до конца второй вентиляции. Через 300 мс произошел третий вентиляционный выброс, длившийся меньше времени, чем первые два (около 20 мс); кроме того, здесь пламя было значительно менее ярким и имело полосатый рисунок.

На рис. 8 показан процесс распространения вентиляционного пламени при  $p_{stat} = 0.06$  МПа. Яркость первого выходящего пламени слабее, чем на рис. 7, *a*; кроме того, значительно меньше количество линейных струйных течений и точечных искр на фронте пламени. Пламя распространилось на максималь-

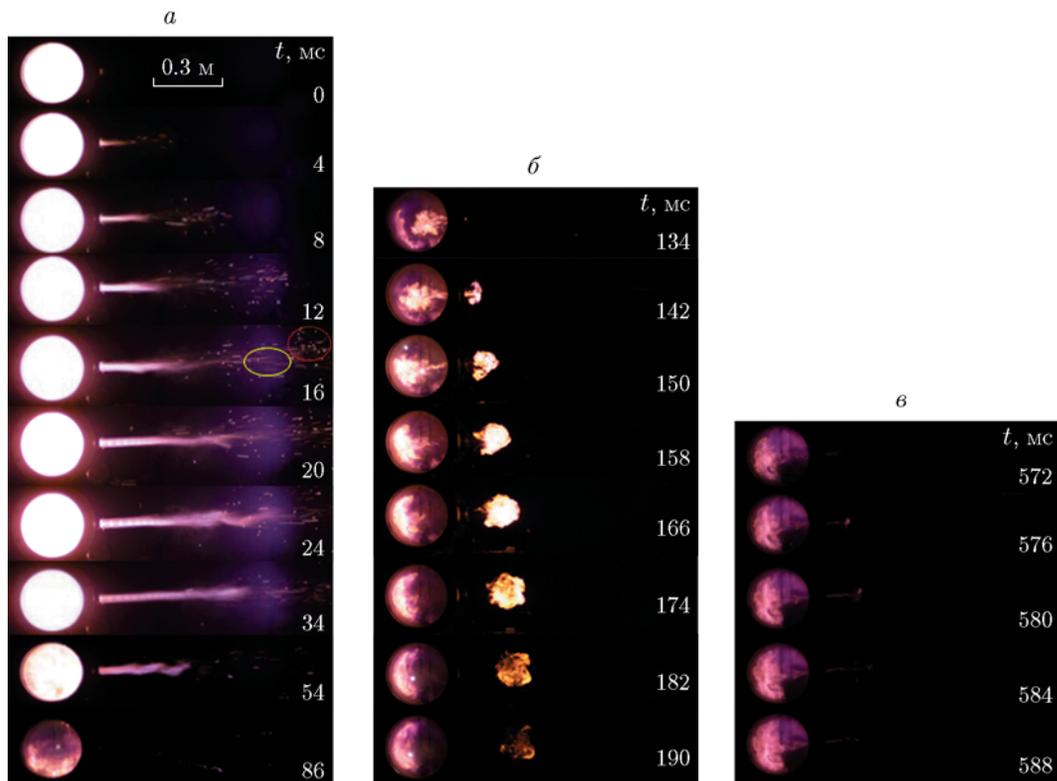


Рис. 7. Изображения вентиляционного пламени при статическом избыточном давлении открытия 0.03 МПа:

*a* — пламя первой вентиляции, *б* — пламя второй вентиляции, *в* — пламя третьей вентиляции

ное расстояние за 18.4 мс. Первый вентиляционный выброс был завершен к 83.2 мс, второй — к 130 мс. Изначально пламя имело форму струи, но постепенно превратилось в сферу. Причем сферическое пламя было меньшего размера (максимальный диаметр 0.105 м) и меньшей яркости, чем пламя на рис. 7, *б*.

На рис. 9 показан процесс распространения вентиляционного пламени при  $p_{stat} = 0.09$  МПа. В этом случае наблюдался только один вентиляционный выброс пламени. Следовательно, чем меньше давление открытия вентиляционного канала, тем вероятнее возникновение множественных вентиляций внутреннего взрыва в сосуде. Эта интерпретация согласуется с выводами [18]. Кроме того, количество точечных искр, сопровождающих фронт пламени при его распространении, существенно меньше, чем на рис. 7, *a* и 8, *a*, при этом яркость пламени ниже. Пламя прошло максимальное расстояние за 16 мс, а вентиляция взрыва полностью завершилась к 60.8 мс.

В целом установлено, что чем больше давление открытия, тем меньше максимальное

расстояние распространения пламени и короче стадия первой вентиляции взрыва. Этот механизм согласуется с выводами аналогичного исследования [19]. В распространении пламени первой вентиляции при высоком давлении открытия значительно меньше линейных струйных течений и точечных искр; кроме того, отчетливо видно некоторое рассеивание искр. Возможно, эти характеристики связаны с давлением открытия: при  $p_{stat} = 0.03$  МПа время, необходимое пламени для достижения вентиляционного отверстия после воспламенения, относительно невелико. За этот короткий промежуток лишь небольшая доля частиц пыли прореагировала во взрывной реакции и передала тепло другим частицам. Следовательно, частицы пыли должны пройти стадию предварительного нагрева: на этой стадии из-за отставания распределения пламени по сравнению с распределением волны давления скорость волны давления больше скорости пламени [17, 20]; затем, когда давление снижается, некоторые подогретые негоревшие частицы пыли перемещаются и рассеиваются внутри вентиляци-

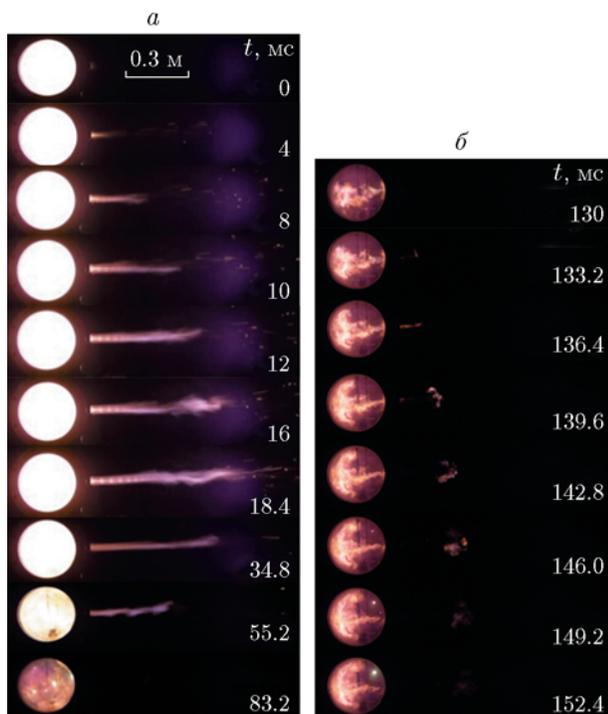


Рис. 8. Изображения вентиляционного пламени при статическом избыточном давлении открытия 0.06 МПа:

*a* — пламя первой вентиляции, *б* — пламя второй вентиляции

онного канала. При последующем распространении пламени в вентиляционный канал эти частицы воспламеняются и превращаются в горящие частицы пыли [17]. Рассеивание точечных искр при давлениях 0.06 и 0.09 МПа (см. рис. 8 и 9) меньше. Действительно, при более высоком давлении открытия требуется больше времени для прохода пламени в вентиляционный канал. За это время большая часть частиц пыли уже прореагировала и осталась лишь малая часть несгоревших частиц, которые были выброшены из сосуда при сбросе давления и сгорели снаружи.

### 2.3. Влияние давления открытия на скорость внешнего пламени

На рис. 10 показаны временные зависимости расстояния распространения пламени  $L$  первой вентиляции при различных давлениях открытия. Время, когда пламя достигало вентиляционного канала, рассматривалось как момент  $t = 0$ . Установлено, что расстояние и средняя скорость распространения пламени максимальны при давлении открытия

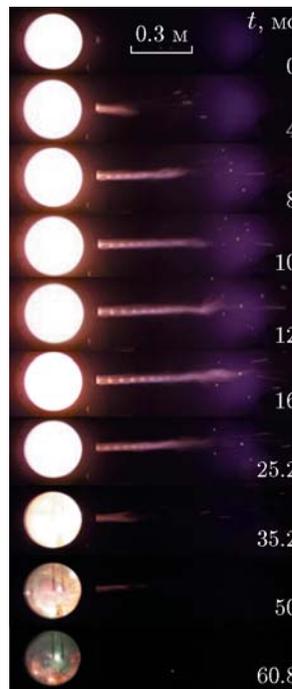


Рис. 9. Изображения вентиляционного пламени при статическом избыточном давлении открытия 0.09 МПа

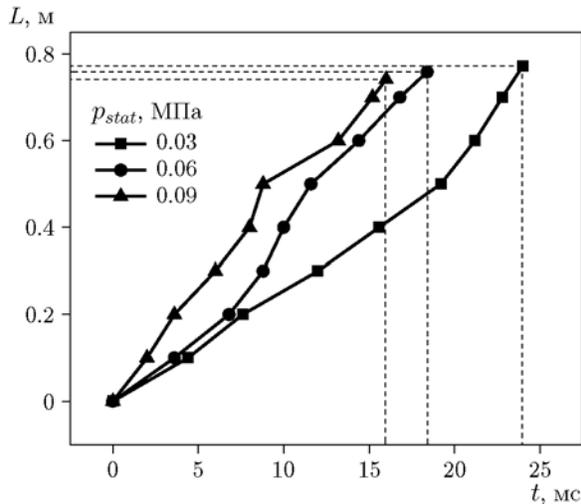


Рис. 10. Зависимость расстояния распространения пламени от времени при различных статических избыточных давлениях открытия

$p_{stat} = 0.09$  МПа. Кроме того, из рис. 10 видно, насколько максимальное расстояние распространения пламени уменьшается с увеличением давления открытия:  $L = 0.7723, 0.7586$  и  $0.7415$  м при  $p_{stat} = 0.03, 0.06$  и  $0.09$  МПа соответственно.

На рис. 11 показаны изменения скоро-

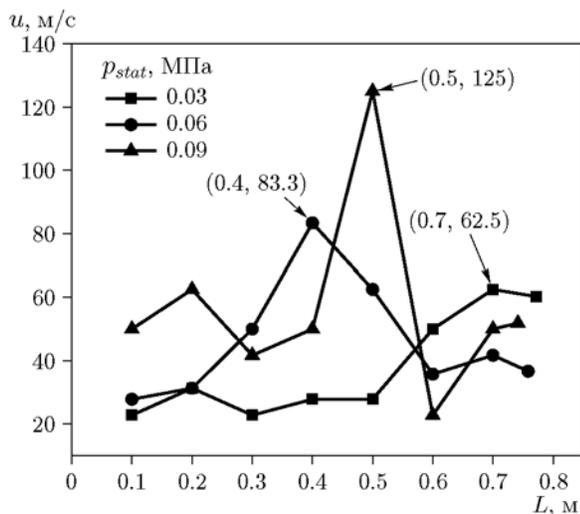


Рис. 11. Зависимость скорости пламени от расстояния его распространения при различных статических избыточных давлениях открытия

сти пламени  $u$  в зависимости от расстояния его распространения. На начальной стадии скорость пламени достигает максимума при  $p_{stat} = 0.09$  МПа. Фактически, с ростом давления открытия временной интервал между воспламенением и вентиляцией взрыва увеличивается, что обуславливает сгорание всей имеющейся пыли. Кроме того, внутреннее избыточное давление в емкости и начальная скорость распространения выше. При  $p_{stat} = 0.09$  МПа пламя продолжает ускоряться и на средней стадии распространения достигает скорости 125 м/с. Далее скорость не увеличивается вследствие возмущения пламени внутри сосуда и инерционной связи с вентиляцией взрыва. При  $p_{stat} = 0.06$  или 0.03 МПа максимальная скорость пламени составила 83.3 и 62.5 м/с соответственно. Примечательно, что эти скорости более стабильны на начальной и средней стадиях распространения пламени. В целом можно сделать вывод, что максимальная скорость пламени растет с увеличением давления открытия.

На рис. 12 показаны скорости распространения пламени второго вентиляционного взрыва при различных давлениях открытия. При  $p_{stat} = 0.03$  МПа как скорость распространения, так и изменение морфологии сравнительно невелики. Скорость пламени на начальной стадии сначала уменьшается, а затем увеличивается; окончательно на средней и поздней

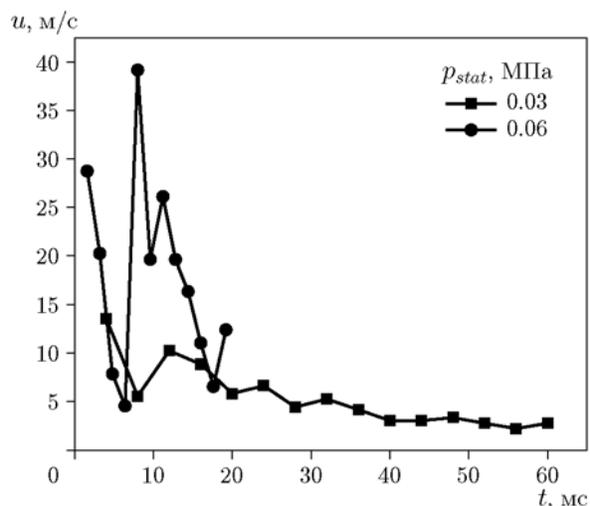


Рис. 12. Зависимость скорости распространения пламени от времени при различных статических избыточных давлениях открытия

стадиях она приобретает колебательный характер. В целом по этому параметру наблюдается тенденция к снижению. При  $p_{stat} = 0.06$  МПа скорость распространения пламени, как правило, выше. Согласно этому сценарию пламя имеет форму струи и на начальной стадии скорость постоянно уменьшается. Фактически, пламя внутри сосуда (см. рис. 8, б) распространяется от вентиляционного отверстия, в результате чего скорость внешнего пламени постоянно уменьшается.

К моменту времени 8 мс скорость пламени резко возрастает до 39.19 м/с, пламя разрывается и передняя часть отрывается в виде струи, что приводит к скачку скорости распространения. После этого пламя становится сферической формы, его скорость начинает постепенно уменьшаться. В целом можно сделать вывод, что скорость распространения пламени второй (сравнительно непродолжительной) вентиляции увеличивается с ростом давления открытия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты исследования вентиляционного взрыва кукурузного крахмала в небольшом цилиндрическом сосуде. Для анализа характеристик множественной вентиляции при взрывах внутренней пыли отслеживалось с помощью датчика давления изменение во времени внутреннего давления взрыва, а процесс распространения пла-

мени регистрировался высокоскоростной камерой. По результатам этого исследования сделаны следующие выводы.

(1) В конкретных условиях эксперимента разрыв мембраны при взрыве в сосуде может вызвать до трех вентиляционных выбросов. Число вентиляционных выбросов отрицательно коррелирует с давлением открытия.

(2) При первой вентиляции взрыва давление внутри сосуда меняется существенно, при последующих вентиляциях — незначительно. При определенных условиях появление второго и третьего вентиляционного пламени продлевает внешнее горение с расширением диапазона распространения пламени в направлении выброса, что усугубляет последствия аварии.

(3) В одних и тех же условиях взрыва фронты пламен множественной вентиляции ведут себя различным образом. Пламя первого вентиляционного выброса, как правило, имеет форму недорасширенной струи с точечными искрами спереди. Выходящее пламя второго вентиляционного выброса обычно имеет яркую сферическую форму без искр. В третьей вентиляции выходящее пламя имеет тенденцию приобретать форму тусклой полосы. Кроме того, замечено, что внешнее пламя при более ранних вентиляциях взрыва, как правило, проходит большее расстояние и имеет большую среднюю скорость распространения.

(4) Давление открытия вентиляционного канала существенно влияет на характер распространения внешнего пламени. Для пламени первой вентиляции максимальное расстояние распространения и время, необходимое для его достижения, уменьшаются с увеличением давления открытия, а средняя скорость пламени и максимальная мгновенная скорость увеличиваются. Во второй вентиляции максимальное расстояние распространения пламени не меняется с увеличением давления открытия. Более того, время достижения этого максимального расстояния постепенно уменьшается, средняя скорость пламени и его максимальная мгновенная скорость увеличиваются, а яркость пламени слабеет.

Авторы признательны за финансовую поддержку со стороны совместного проекта финансирования Пекинского фонда естественных наук и муниципального комитета по образованию (№ KZ201910017020), Пекинской программы науки и технологий (№ Z181100006218092), Пекинского учебного

проекта поддержки выдающихся молодых талантов Китая (№ 2016000026833ZK05) и Пекинской муниципальной комиссии по образованию для финансирования программ практического обучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Van Wingerden K.** Prediction of pressure and flame effects in the direct surroundings of installations protected by dust explosion venting // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 1993. — V. 6, N 4. — P. 241–249. — DOI: 10.1016/0950-4230(93)80006-8.
2. **Holbrow P., Hawksworth S. J., Tyldesley A.** Thermal radiation from vented dust explosions // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2000. — V. 13, N 6. — P. 467–476. — DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00079-0.
3. **Gao W., Yu J. L., Li J., Zhang Q., Xie Q. F., Zhang X. Y., Hu D. P.** Experimental investigation on micro- and nano-PMMA dust explosion venting at elevated static activation overpressures // *Powder Technol.* — 2016. — V. 301. — P. 713–722. — DOI: 10.1016/j.powtec.2016.07.012.
4. **Gao W., Yu J. L., Zhang X. Y., Li J., Wang B.** Characteristics of vented nanopolyethyl methacrylate dust explosions // *Powder Technol.* — 2015. — V. 283. — P. 406–414. — DOI: 10.1016/j.powtec.2015.06.011.
5. **Yan X. Q., Yu J. L.** Dust explosion venting of small vessels at the elevated static activation overpressure // *Powder Technol.* — 2014. — V. 261. — P. 250–256. — DOI: 10.1016/j.powtec.2014.04.043.
6. **Skjold T., Arntzen B. J., Hansen O. R., Storvik I. E., Eckhoff R. K.** Simulation of dust explosions in complex geometries with experimental input from standardized tests // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2006. — V. 19, N 2-3. — P. 210–217. — DOI: 10.1016/j.jlp.2005.06.005.
7. **Eckhoff R. K., Alfert F., Fuhre K., Pedersen G. H.** Maize starch explosions in a 236 m<sup>3</sup> experimental silo with vents in the silo wall // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 1988. — V. 1, N 1. — P. 16–24. — DOI: 10.1016/0950-4230(88)80004-4.
8. **Eckhoff R. K., Fuhre K., Pedersen G. H.** Dust explosion experiments in a vented 236 m<sup>3</sup> silo cell // *J. Occup. Accidents.* — 1987. — V. 9, N 3. — P. 161–175. — DOI: 10.1016/0376-6349(87)90010-1.
9. **Eckhoff R. K., Fuhre K.** Dust explosion experiments in a vented 500 m<sup>3</sup> silo cell // *J. Occup. Accidents.* — 1984. — V. 6, N 4. — P. 229–240. — DOI: 10.1016/0376-6349(84)90012-9.
10. **Holbrow P.** Dust explosion venting of small vessels and flameless venting // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2013. — V. 91, N 3. — P. 183–190. — DOI: 10.1016/j.psep.2012.05.003.

11. **Tascón A., Ramírez-Gómez Á., Aguado P. J.** Dust explosions in an experimental test silo: Influence of length / diameter ratio on vent area sizes // *Biosystems Eng.* — 2016. — V. 148. — P. 18–33. — DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.04.014.
12. **Scheid M., Geißler A., Krause U.** Experiments on the influence of pre-ignition turbulence on vented gas and dust explosions // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2006. — V. 19, N 2-3. — P. 194–199. — DOI: 10.1016/j.jlp.2005.04.005.
13. **Proust Ch.** Turbulent flame propagation in large dust clouds // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2017. — V. 49, pt B. — P. 859–869. — DOI: 10.1016/j.jlp.2017.05.011.
14. **Tascón A., Aguado P. J.** Simulations of vented dust explosions in a 5 m<sup>3</sup> vessel // *Powder Technol.* — 2017. — V. 321. — P. 409–418. — DOI: 10.1016/j.powtec.2017.08.047.
15. **Tascón A., Aguado P. J.** CFD simulations to study parameters affecting dust explosion venting in silos // *Powder Technol.* — 2015. — V. 272. — P. 132–141. — DOI: 10.1016/j.powtec.2014.11.031
16. **Tascón A., Ruiz Á., Aguado P. J.** Dust explosions in vented silos: Simulations and comparisons with current standards // *Powder Technol.* — 2011. — V. 208, N 3. — P. 717–724. — DOI: 10.1016/j.powtec.2011.01.015.
17. **Ji W. T., Yu J. L., Yu X. Z., Yan X. Q.** Experimental investigation into the vented hybrid mixture explosions of lycopodium dust and methane // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2018. — V. 51. — P. 102–111. — DOI: 10.1016/j.jlp.2017.12.002.
18. **Yan X. Q., Yu J. L., Gao W.** Flame behaviors and pressure characteristics of vented dust explosions at elevated static activation overpressures // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2015. — V. 33. — P. 101–108. — DOI: 10.1016/j.jlp.2014.11.012.
19. **Guo J., Wang C. J., Li Q., Chen D. D.** Effect of the vent burst pressure on explosion venting of rich methane-air mixtures in a cylindrical vessel // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2016. — V. 40. — P. 82–88. — DOI: 10.1016/j.jlp.2015.12.006.
20. **Yu J. Z., Vuorinen V., Kaario O., Sarjo-vaara T., Larmi M.** Visualization and analysis of the characteristics of transitional under-expanded jets // *Int. J. Heat Fluid Flow.* — 2013. — V. 44. — P. 140–154. — DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.05.015.

*Поступила в редакцию 29.09.2020.*

*Принята к публикации 28.10.2020.*

---