

DOI: 10.58168/TSMSTTO2026_259-265

УДК 628.51

ПРОФИЛАКТИКА И ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ОБЪЕМНЫХ ПЫЛЕВЫХ ВЗРЫВОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЕ

Инютин Н.А., студент

Жидко Е.А., д-р техн. наук, профессор

Воронежский государственный технический университет

Аннотация. В представленной статье рассматривается проблема объемных пылевых взрывов как серьезной промышленной опасности. Описаны ключевые условия (пентагон взрыва) и механизм возникновения этих явлений, включая особую опасность вторичных взрывов, которые приводят к масштабным разрушениям. Особое внимание уделено комплексным мерам предупреждения и защиты, а также подчеркивается критическая важность соблюдения строгих норм промышленной безопасности на предприятиях, работающих с горючей пылью

Ключевые слова: объемный взрыв, горючая пыль, детонация, пентагон взрыва, детонация муки, взрывозащитный модуль, пожарная безопасность.

PREVENTION AND ELIMINATION OF THE CONSEQUENCES OF LARGE-SCALE DUST EXPLOSIONS IN THE PRODUCTION ENVIRONMEN

Inyutin N.A., student

Zhidko E.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Voronezh State Technical University

Abstract. The presented article discusses the problem of volume dust explosions as a serious industrial hazard. The key conditions (explosion pentagon) and the mechanism of these phenomena are described, including the special danger of secondary explosions that lead to large-scale destruction. Special attention is paid to comprehensive measures of prevention and protection, and the critical importance of compliance with strict industrial safety standards at enterprises working with combustible dust is emphasized.

Keywords: bulk explosion, combustible dust, detonation, pentagon of explosion, flour detonation, explosion-proof module, fire safety.

Объемный пылевой взрыв на предприятиях представляет собой серьезную промышленную опасность, которая может привести к значительным разрушениям и человеческим жертвам. Предотвращение таких инцидентов

требует комплексного подхода, основанного на устранении одного или нескольких условий, необходимых для возникновения взрыва.

Меры предупреждения и защиты регулируются соответствующими нормами промышленной безопасности (например, российскими ФНП, международными стандартами NFPA и рекомендациями OSHA).

Пылевой взрыв - это быстрое сгорание взвешенной в воздухе горючей пыли в замкнутом или полужамкнутом пространстве. Для его возникновения необходимы пять ключевых компонентов («пентагон взрыва»):

- горючая пыль (мука, сахар, уголь, древесная пыль, металлическая пыль и др.).
- окислитель (обычно кислород в воздухе).
- источник воспламенения (искра, открытое пламя, горячая поверхность, статическое электричество).
- концентрация пыли в воздухе в определенных пределах (нижний и верхний пределы взрываемости).
- замкнутое пространство, способствующее нарастанию давления [1].

Обычно процесс начинается с небольшого, локального воспламенения. Источник зажигания контактирует с локальным облаком пыли внутри оборудования, например, в мельнице, циклоне, нории или бункере. Происходит быстрое сгорание этого небольшого количества взвешенной пыли. Это приводит к резкому повышению температуры и давления внутри оборудования.

Наибольшую опасность представляют вторичные взрывы, которые и делают его объемным. Слабый первичный взрыв в оборудовании поднимает осевшую пыль в помещении, создавая ударную волну. Эта ударная волна распространяется по помещению и поднимает в воздух огромные слои осевшей пыли с пола, стен, балок и оборудования. Мгновенно образуется огромное, плотное взрывоопасное облако, которое заполняет весь объем цеха или здания. Пламя от первичного взрыва или та же ударная волна воспламеняет это новое, гораздо большее облако.

Вторичный взрыв происходит почти мгновенно по всему объему помещения. Скорость горения и нарастания давления значительно увеличиваются. Давление нарастает экспоненциально и за доли секунды достигает значений, которые способны разрушить капитальные стены, перекрытия и металлоконструкции здания.

Выделяется огромное количество тепловой энергии, вызывая сильный пожар. Скорость распространения огня 1000 м/с означает, что взрыв охватывает большие производственные помещения за доли секунды, не оставляя персоналу шансов на спасение или эвакуацию [2].

Эти параметры подчеркивают, почему такие инциденты приводят к полному разрушению промышленных объектов.

Таким образом, объемный пылевой взрыв - это не просто горение, а каскадный процесс, который превращает осевшую, казалось бы, безопасную

пыль в мощное взрывчатое вещество, способное вызвать катастрофические разрушения на производстве с большими человеческими жертвами.

«Великой мельничной катастрофой» называют взрыв на мельнице Washburn A Mill в Миннеаполисе, США, произошедший 2 мая 1878 года. Это событие стало одним из самых известных и разрушительных промышленных инцидентов, связанных с взрывами пыли, и привело к кардинальным изменениям в стандартах безопасности мукомольной промышленности.

Около 7 часов вечера, когда дневная смена ушла и заступила ночная смена из 14 человек, в мельнице произошло локальное возгорание. Вероятной причиной стала искра, возникшая из-за трения двух сухих мельничных жерновов, когда подача зерна прекратилась. Эта искра воспламенила скопившуюся в воздухе мучную пыль. Последовала серия из трех мощных взрывов с интервалом в несколько секунд.

Взрывы были такой силы, что обломки гранитных стен разлетались на сотни метров, а окна выбивало в радиусе 16 км, вплоть до соседнего города Сент-Пол. Жители Миннеаполиса приняли взрыв за землетрясение.

Взрыв разрушил мельницу Washburn A Mill и вызвал пожар, который перекинулся на две соседние мельницы - Diamond и Humboldt - которые также взорвались. Всего было уничтожено шесть мельниц, что привело к потере значительной части производственных мощностей города.

В результате катастрофы погибли 18 человек: все 14 рабочих ночной смены, находившихся внутри главной мельницы, и еще 4 человека в соседних зданиях. Расследование подтвердило, что причиной трагедии стала именно взрывоопасность мучной пыли.

Катастрофа послужила мощным толчком для развития промышленной безопасности. Были разработаны и внедрены новые стандарты вентиляции и системы пылеудаления для предотвращения накопления горючей пыли.

Инцидент привлек широкое внимание к проблеме взрывоопасной пыли, что в конечном итоге привело к появлению первых стандартов по борьбе с горючей пылью. Сегодня на месте разрушенной мельницы расположен Музей мельничного города (Mill City Museum), посвященный истории мукомольной промышленности и этой трагедии.

Горючесть пыли зависит от многих факторов: размера частиц, их состава, концентрации. Размер частиц играет критическую роль: чем они мельче, тем больше их удельная поверхность, что способствует быстрому и полному сгоранию при контакте с источником воспламенения.

Особенную угрозу представляет собой органическая пыль, включая сахарную, мучную, шерстяную и древесную. Не менее опасна металлическая пыль, такая как алюминиевая, цинковая, магниевая и титановая.

Пшеничная мука и магниевая пыль относятся к самым горючим видам пыли. Достаточно концентрации 10 г/м^3 в закрытом помещении, чтобы вызвать объемный взрыв. Для сравнения чтобы сдетонировала угольная пыль,

необходима концентрация не менее 200 г/м^3 , поэтому мельницы взрываются гораздо чаще, чем угольные шахты [3].

Магниева пыль представляет собой еще большую опасность, чем пшеничная мука. Магний - активный металл, который горит при очень высоких температурах и может гореть даже в атмосфере углекислого газа или азота, что делает его тушение крайне сложным. Для магниевой пыли требуются особые классы огнетушителей (класс D) [4].

Оба этих типа пыли требуют применения строжайших мер безопасности на производстве.

Меры безопасности на предприятиях, где работают с горючей пылью делятся на две основные категории:

- предотвращение самого взрыва (исключение условий его возникновения)
- уменьшение негативных последствий.

Главная цель - устранить один из главных элементов «пентагона взрыва» - саму пыль. Это влажная тщательная уборка поверхностей для предотвращения накопления слоев пыли на оборудовании, полу и стенах. Использование промышленных пылесосов, сертифицированных для сбора горючей пыли, исключающих искрообразование. Запрещается уборка сжатым воздухом, так как это поднимает пыль в воздух.

Обязательна установка эффективных систем местной вытяжной вентиляции (МВВ), собирающих пыль непосредственно у источника ее образования, а также использование фильтров и пылесборников [5] (рис 1).

Кроме того, исключительно важно осуществлять строгий контроль и неукоснительно соблюдать правила обращения с возможными источниками возгорания.

- заземление всего оборудования для отвода статического электричества.
- строгий контроль за проведением огневых работ, запрет курения и открытого огня в опасных зонах.
- удаление посторонних металлических предметов из потока материала (использование магнитных сепараторов, искроуловителей).

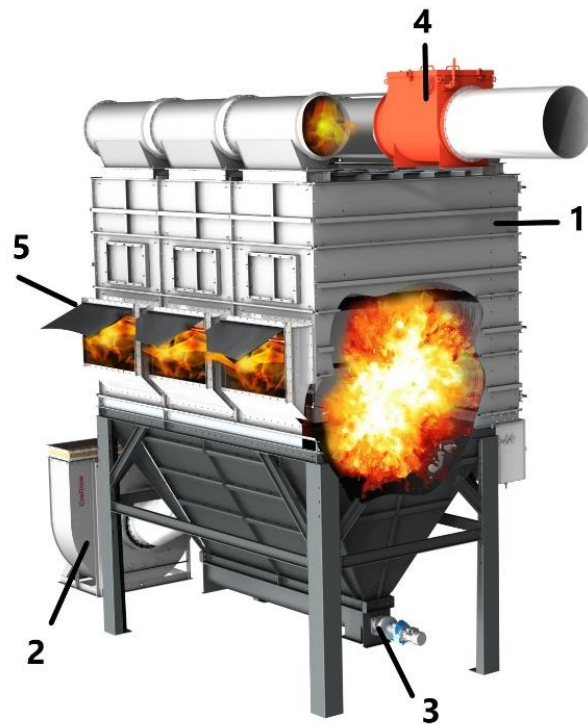


Рис 1. Модуль взрывозащиты предназначен специально для предприятий, деятельность которых связана с образованием горючих пылей:

- 1- фильтр с усиленным корпусом;
- 2- вентилятор во взрывозащищенном исполнении (опция);
- 3- шнековый конвейер и ротационный клапан;
- 4- обратный клапан b-flap;
- 5- место установки разрывной мембраны для освобождения взрыва или пламегасителя.

В качестве эффективной меры предохранения от объемного взрыва используется введение инертного газа (азот, углекислый газ) в закрытые аппараты (мельницы, бункеры, циклоны) для снижения концентрации кислорода ниже критического уровня, при котором горение невозможно [6].

Меры взрывозащиты и смягчения последствий направлены на ограничение ущерба в случае, если взрыв все же произошел.

1. Установка на оборудовании (бункеры, силосы) специальных панелей - взрыворазрядителей, которые разрушаются при достижении определенного давления, направляя пламя и избыточное давление в безопасную зону (обычно наружу здания).

2. Быстродействующие системы подавления взрыва (Explosion Suppression Systems), которые обнаруживают начальную стадию взрыва (повышение давления или появление УФ-излучения) и автоматически впрыскивают огнетушащее вещество (например, воду, инертный порошок) в зону реакции за миллисекунды.

3. Системы изоляции взрыва (Explosion Isolation): установка клапанов или шлюзов, которые мгновенно перекрывают трубопроводы и воздуховоды

при обнаружении взрыва, предотвращая его распространение на другое оборудование или в соседние помещения (вторичные взрывы).

4. Проектирование оборудования и зданий с учетом возможного избыточного давления взрыва (взрывоустойчивые конструкции) [7,8].

Ключевым элементом возникновения объемного взрыва горючей пыли в 90% является человеческий фактор. Поэтому на таких производствах требуется обязательное обучение сотрудников правилам безопасной работы, методам контроля пыли, использованию СИЗ и действиям в аварийных ситуациях.

Объемные пылевые взрывы представляют собой одну из наиболее серьезных и разрушительных промышленных опасностей. Как показало обсуждение, эти инциденты возникают при совпадении ряда факторов («пентагон взрыва») и могут привести к катастрофическим последствиям из-за экстремальных параметров детонации.

Взрывоопасны не только экзотические материалы вроде магниевой или алюминиевой пыли, но и повседневные продукты, такие как мука, сахар и древесина.

Эффективная защита основывается на устранении условий для взрыва - строгом контроле концентрации пыли, регулярной уборке, использовании заземления и взрывозащищенного оборудования.

Инциденты, подобные катастрофе на мельнице Washburn A Mill 1878 года, служат постоянным напоминанием о необходимости неукоснительного соблюдения норм промышленной безопасности для предотвращения подобных трагедий в будущем.

Список литературы

1. Бондарь В. А., Любартович В. А. Взрывы промышленных пылей и их предупреждение/ В.А. Бондарь, В.А. Любартович // Известия МГТУ МАМИ. 2012. Т.4. №2 (14). С.286-289.
2. Горбунов Е. В., Панова Л. В., Атаманов С. Г. Аналитический обзор мер по предупреждению и локализации аварий на взрывопожароопасных объектах хранения и переработки растительного сырья / Е.В. Горбунов, Л. В. Панова, С. Г. Атаманов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 112. С. 943-954.
3. Жидко Е.А., Попова Л.Г. Информационная и интеллектуальная поддержка управления развитием социально-экономических// Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014.-№10(93). С.12-19.
4. Жидко Е.А. высокие интеллектуальные и информационные технологии интегрированного менеджмента XXI века. Воронеж, 2014.
5. Романченко С.Б., Корнев А.В. Инновационные методы исследований пылевой взрывоопасности углей/ С. Б. Романченко, А.В.Корнев // Записки Горного института. 2025. Том 274. С. 129-141.
6. Ударные и детонационные волны. Методы исследования / И.Ф. Кобылкин, В.В. Селиванов, В.С. Соловьев, Н.Н. Сысоев – М.: Физматлит, 2004

7. Жидко Е.А., Черных Е.М. Динамика частиц золы в выбросах дымовых труб /Е.А. Жидко, Е.М. Черных//Экология и промышленность России. 2004.№7.С.38-39.

8. Asminin, V.F. Development and application of a portable lightweight sound suppression panel to reduce noise at permanent and temporary workplaces in the manufacturing and repair workshops / V.F. Asminin, E.V. Druzhinina, S. Sazonova, D.S. Osmolovsky // Akustika. - 2019. - Т. 34. - С. 18-21.

References

1. Bondar V. A., Lyubartovich V. A. Industrial dust explosions and their prevention/ V.A. Bondar, V.A. Lyubartovich // Izvestiya MGTU MAMI. 2012. Vol. 4. No. 2 (14). pp.286-289.

2. Gorbunov E. V., Panova L. V., Atamanov S. G. An analytical review of measures to prevent and localize accidents at explosive and fire-hazardous facilities for the storage and processing of plant raw materials / E.V. Gorbunov, L. V. Panova, S. G. Atamanov // Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2015. No. 112. pp. 943-954.

3. Zhidko E.A., Popova L.G. Information and intellectual support for managing the development of socio-economic// Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2014.No.10(93). pp.12-19.

4. Zhidko E.A. High intellectual and information technologies of integrated management of the XXI century. Voronezh, 2014.

5. Romanchenko S.B., Kornev A.V. / C./. Romanchenko, A.V.Kornev // Notes of the Mining Institute. 2025. Volume 274. C. 129-141.

6. Shock and detonation waves. Research methods / I.F. Kobylkin, V.V. Selivanov, V.S. Solovyov, N.N. Sysoev – M.: Fizmatlit, 2004

7. Zhidko E.A., Chernykh E.M. Dynamics of ash particles in chimney emissions /E.A. Zhidko, E.M. Chernykh//Ecology and industry of Russia. 2004.No.7.pp.38-39.

8. Asminin, V. F. development and application of a portable light-light sound suppression panel to reduce noise at permanent and temporary alactorkplaces in the manufacturing and repair alactorkshops / V. F. Asminin, E. V. Druzhinina, S. Sazonova, D. S. Osmolovsk // acoustics. - 2019. - Vol. 34. - pp. 18-21.