УДК 662.612.1
DOI: https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2026.16.98.001
EDN: https://elibrary.ru/nyyyuo

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВОВ АЭРОЗОЛЕЙ НАТУРАЛЬНЫХ ТОПЛИВ В ОГРАНИЧЕННОМ И НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Леонид Петрович Вогман, Иван Ардашевич Болодьян, Евгений Николаевич Простов, Кирилл Романович Бут

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Аннотация. Аналитически исследованы особенности возникновения и развития взрывов аэрозолей натуральных топлив (уголь, торф, сланцы) в ограниченном и незамкнутом пространстве. Характер зависимости давления и скорости его нарастания от протяженности испытательной установки говорит о том, что в камерах большей протяженности за время нарастания давления горение аэрозоля не охватывает весь объем, что снижает температурный уровень в объеме и, как следствие, характеристики взрыва.

Констатируется с помощью изучения взрывов угольной пыли в опытных штольнях и шахтах длиной от 60 до нескольких сотен метров с поперечным сечением от 1,2 до 5,6 м^2, что скорость распространения пламени может достигать до 2000 м/с. При этом вид и энергия источников воспламенения пылевоздушных смесей являются ключевым звеном в интенсификации процессов и характеристике их последствий.

Было показано при изучении истечения продуктов сгорания аэрозолей через открытые отверстия, что те же факторы, которые способствуют снижению взрывного давления в закрытом объеме (отклонения концентрации пыли от оптимальной, увеличение размера частиц и влажности аэрозоля, уменьшение концентрации кислорода, увеличение неоднородности пылевого облака и др.), уменьшают давление и с открытым отверстием в камере.

Ключевые слова: натуральное топливо, аэрозоль, ограниченное и незамкнутое пространство, взрыв, аэровзвесь

Для цитирования: *Исследование процессов распространения горения и взрывов аэрозолей натуральных топлив в ограниченном и неограниченном пространстве / Л.П. Вогман, И.А. Болодьян, Е.Н. Простов, К.Р. Бут* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2026. № 4 (30). С. 7–14. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.16.98.001. EDN NYYYUO.

INVESTIGATION OF FLAME PROPAGATION AND EXPLOSION PROCESSES OF NATURAL FUEL AEROSOLS IN CONFINED AND UNCONFINED SPACES

Leonid P. Vogman, Ivan A. Bolodyan, Evgeny N. Prostov, Kirill R. But

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

Abstract. The specific features of the initiation and development of explosions of natural fuel aerosols (coal, peat, shale) in confined and unconfined spaces have been analytically studied. The pattern of the dependence of pressure and its rate of rise on the length of the test installation indicates that in longer chambers, during the pressure build-up period, aerosol combustion does not cover the entire volume, which reduces the temperature level in the volume and, consequently, the explosion characteristics.

It has been established, through the study of coal dust explosions in experimental adits and mines with lengths ranging from 60 to several hundred metres and cross-sections ranging from 1.2 to 5.6 m², that the flame propagation speed can reach up to 2000 m/s. At the same time, the type and energy of ignition sources of dust-air mixtures are a key element in intensifying the processes and characterising their consequences.

It was demonstrated in studies of the outflow of aerosol combustion products through openings that the same factors that contribute to a decrease in explosion pressure in a closed volume (deviations of dust concentration from the optimal level, an increase in particle size and aerosol moisture content, a decrease in oxygen concentration, an increase in the heterogeneity of the dust cloud, etc.) also reduce the pressure with an open opening in the chamber.

Keywords: fossil fuel, aerosol, confined and unconfined space, explosion, aerosol suspension

For citation: Vogman L.P., Bolodyan I.A., Prostov E.N., But K.R. Investigation of flame propagation and explosion processes of natural fuel aerosols in confined and unconfined spaces. Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2026, no. 4, pp. 7-14. (In Russ.). DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.16.98.001. EDN NYYYUO.

Введение

В работах [1, 2] выполнен анализ процессов самовозгорания отложений (аэрогелей) и горения, взрыва горючих пылей в дисперсном состоянии (аэрозолей, аэровзвесей) натуральных топлив (торфа, угли, сланцы).

Практический и теоретический интерес представляет изучение взрывов пылей натуральных топлив в ограниченном объеме в условиях адиабатичности процессов (в отсутствии потерь тепла) в результате их быстротечности, имитируя условия распространения ударной волны при авариях в шахтах и штольнях, а также в открытом пространстве при нестационарном тепловыделении и неустановившемся движении сплошной среды. Следует отметить, что работ, направленных на изучение взрыва аэрозолей горючих пылей, и, в частности, натуральных топлив, в технической литературе мало.

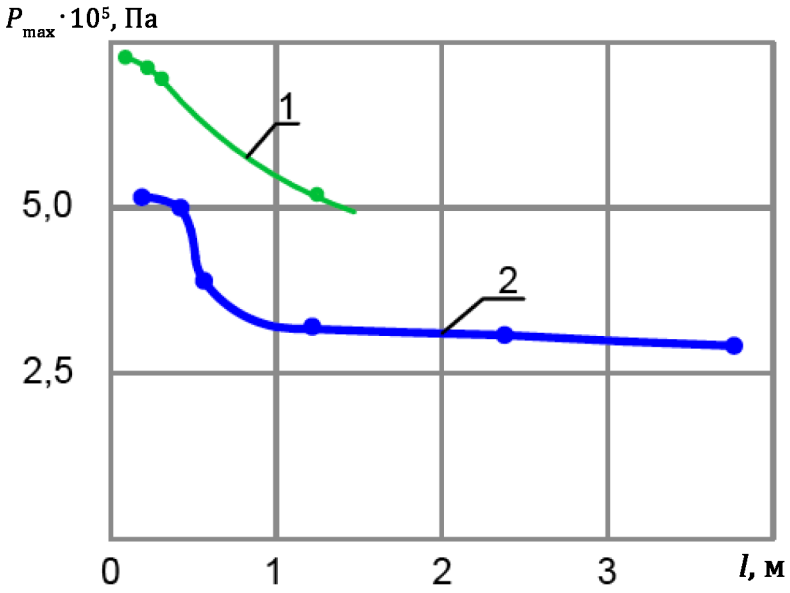
Цель работы заключается в изучении особенностей возникновения и развития взрывов аэрозолей натуральных топлив в ограниченном и незамкнутом пространстве.

1. Взрывы аэрозолей натуральных топлив в ограниченном пространстве. Методика проведения испытаний и результаты исследований

Исследования осуществлялись на установках разного объема и различной протяженности (под протяженностью понимается расстояние, которое должен пройти фронт пламени, чтобы горение охватило весь объем установки, т. е. расстояние по всей длине внешней образующей реакционной камеры). Характеристики этих установок представлены в работе [3]. Объектом исследований служила аэрозоль торфяной пыли фракции 0,053–0,074 мм, высушенная до постоянной массы при температуре 850 ºС. Концентрация пыли изменялась

от 0,15 до 4,5 кг/м^3. Наибольшее максимальное давление взрыва P_{max} в оптимальных для его развития условиях развивается при концентрациях пыли в аэрозоли 0,6–1,5 кг/м^3. В качестве источника зажигания использовалась электрическая спираль, располагавшаяся по всей длине установок.

Результаты опытов, характеризующие изменение P_{max} от концентрации пыли, свидетельствуют о том, что при одинаковом характере этой зависимости в установках разного объема (объем установок изменялся от 1,3 до 1810 дм^3), абсолютные значения этой величины различны, однако по мере увеличения протяженности l значение P_{max} снижается. Из данных рисунка следует, что с увеличением протяженности l давление снижается в 2 раза. В камерах, близких по объему, давление тем больше, чем короче камера. Скорость нарастания давления достигала максимальных значений 8 МПа/с в камере объемом 2,8 дм^3 и при увеличении протяженности в 10 раз уменьшалась до 3 МПа/с в камере объемом 75 дм^3.



Изменение максимального давления взрыва P_{max} в камерах разной протяженности l: 1 – крахмал; 2 – торф, бурый и битуминозный уголь

Характер зависимости давления и скорости его нарастания от протяженности испытательной установки показывает, что в камерах большей протяженности за время нарастания давления горение аэрозоля не охватывает весь объем, что снижает температурный уровень в объеме и, как следствие, характеристики взрыва. Можно заключить, что основной причиной снижения давления взрыва с увеличением протяженности камер является неодновременное протекание горения в разных частях объема камер и ростом степени неадиабатичности процесса. Неполнота выгорания увеличивается при отклонении от оптимальных условий развития взрыва (при концентрациях пыли в аэрозоли 0,6–1,5 кг/м^3). Об этом свидетельствуют результаты анализа продуктов реакции. Они показывают, что в камерах всех размеров присутствуют продукты неполного сгорания: CO, CH_4 и H_2. Однако их количество в камерах большей протяженности выше, чем в камерах меньшей протяженности, и содержание непрореагировавшего кислорода в больших камерах выше.

На основании анализа лабораторных и пилотных экспериментальных исследований взрывов различных аэрозолей натуральных топлив в камерах малого

объема от 1,3 до 75 дм^3 протяженностью от 0,3 до 3 м, а также большого объема от 0,5 до 300 м^3 протяженностью от 5,1 до 7 м различной геометрической формы (куб, параллелепипед, труба с коаксиальной вставкой, цилиндр) и отношением протяженности l к диаметру D от 1 до 18 [3] может показаться, что в ограниченном пространстве не достигаются скорости, сопоставимые или близкие к детонации. Однако это не так. Об этом свидетельствуют многочисленные примеры взрывов на объектах, в которых обращаются горючие аэрозоли [3, 4]. Изучение взрывов угольной пыли в опытных штольнях и шахтах длиной от 60 до нескольких сотен метров с поперечным сечением от 1,2 до 5,6 м^2 показало, что скорость распространения пламени может достигать до 2000 м/с [5, 6]. При больших скоростях пламени возникают ударные волны, а наблюдаемые во фронте ударной волны давления возрастают до высоких значений. Из опытных данных следует, что минимальная скорость распространения пламени составляет 50–60 м/с (при испытаниях в опытных штреках длиной 100–400 м минимальная скорость была 25–30 м/с, а давление 10–12 кПа). При меньшей скорости и давлении менее 2 кПа взрыв затухает, так как энергия ударной волны недостаточна для перевода пыли во взвешенное состояние. Отсюда следует, что для инициирования пылевого взрыва, распространяющегося по штреку, необходим источник зажигания, сообщающий достаточно мощный тепловой импульс пылевому облаку с возбуждением ударной волны. В частности, в экспериментах на ударных трубах при поджигании пылевоздушных смесей ударными волнами реализовался режим горения со скоростями 400–500 м/с с воспламенением отраженной ударной волны, имеющей за фронтом ~ 630 ºС. При воспламенении отраженными ударными волнами меньшей интенсивности развивалось медленное горение: воспламенившаяся область на начальной стадии перемещалась со скоростью 1–2 м/с, а затем видимая скорость движения переднего фронта зоны горения возрастала до 20–60 м/с. Быстрые пламена, имеющие предельным случаем детонационное распространение горения, могут сопровождаться давлениями, существенно выше 0,35 МПа. Однако чаще всего на практике источник воспламенения бывает недостаточно мощным (например, взвихренные тлеющие отложения), инициировать распространение пламени с большой скоростью он не может и поэтому ударная волна перед фронтом пламени не возникает. Такой же эффект регистрируется в гладких штольнях. В них взрывы развиваются в течение продолжительного времени, распространение пламени происходит медленнее с несколькими циклами колебаний. Давление взрыва существенно не превышает начального подъема давления, вызванного инициирующим взрывом.

Таким образом, анализ взрывов аэрозолей свидетельствует о том, что источники воспламенения пылевоздушных смесей являются ключевым звеном в интенсификации процессов и в характеристике их последствий. При источниках воспламенения более слабых, чем первичный инициирующий взрыв (ударная волна, взрывчатые вещества, газовоздушная смесь), например, тлеющие горючие отложения пыли, взвихренные с пола или со стенок, процесс горения протекает с ограниченными скоростями, при этом практически отсутствует опасность сильных газодинамических явлений.

2. Взрывы аэрозолей натуральных топлив в неограниченном пространстве

Развитие взрывов натуральных топлив в неограниченном пространстве в настоящей работе рассматривается аналитически, как задача выбора сечений для сброса аварийного давлениями предотвращения разрушений при взрывах промышленного оборудования. При этом во внимание принимаются тепловы-

деление и истечение газов с учетом соединения оборудования с атмосферой путем вскрытия предохранительных мембран, клапанов, панелей и т. п., которые открываются при взрыве для выбросов газа, предотвращая повышение давления внутри установок.

Процессы, определяющие максимальное давление при взрыве пыли и отводе части продуктов разложения через открытые отверстия, характеризуются выполнением ряда условий, исходя из следующих предпосылок:

распространение фронта пламени в аэрозолях происходит с низкими скоростями без взрыва и перехода в детонацию, истечение продуктов разложения можно считать квазистационарным;

повышение давления в объеме, в котором происходит воспламенение аэрозоля, обусловлено тепловым расширением газов, а также увеличением числа молей газа. Температура газов повышается. Эти процессы увеличивают суммарный эффект реакции в объеме;

процесс истечения считается адиабатическим;

тепловой эффект реакции, определяющийся степенью выгорания в процессе воспламенения аэрозоля, и скорость протекания реакции не зависят от степени открытия объема.

С учетом принятых предпосылок выполнены расчеты протекания взрыва в незамкнутом объеме, истечения продуктов сгорания аэрозолей через открытые отверстия, предохранительные клапаны и трубопроводы для отвода газов в безопасную зону [3].

При протекании взрыва в еще замкнутом объеме оборудования мембраны (диафрагмы, клапаны), закрывающие отверстие для истечения продуктов сгорания в начальный период развития взрыва, препятствуют выходу газов, отводимых из объема во время нарастания давления, что снижает эффективность защиты. До достижения давления взрыва, при котором срабатывает мембрана, процесс роста давления развивается как в закрытом объеме. За счет этого уменьшается время, в течение которого происходит выброс газов, но процесс истечения начинается более интенсивно из объема с момента вскрытия мембраны.

Чем меньше давление срабатывания мембраны, тем максимальное давление, развиваемое в объеме, будет меньше отличаться от давления истечения газов через открытое отверстие. Если давление вскрытия отверстия высокое, то, в зависимости от степени его открытия (отношение площади мембраны к объему оборудования), могут развиваться взрывные давления, которые способны привести к разрушению оборудования, прочностные характеристики которого ниже давления вскрытия отверстия.

При изучении *истечения продуктов сгорания аэрозолей через открытые отверстия* было показано, что те же факторы, которые способствуют снижению взрывного давления в закрытом объеме, уменьшают давление и в незакрытой (с открытым отверстием) камере. К этим факторам относятся отклонения концентрации пыли от оптимальной, увеличение размера частиц и влажности аэрозоля, уменьшение концентрации кислорода, увеличение неоднородности пылевого облака и др.

Для определения влияния размера частиц на давление в незамкнутой установке были проведены взрывы торфяной пыли различных фракций в камере объемом 14,1 дм^3 при степени открытия 0,038 м^2/м^3. Полученные данные свидетельствуют о том, что с укрупнением частиц пыли давление в экспериментальной камере падает и приопределенном размере частиц развитие взрыва становится невозможным. Такое же влияние в незамкнутом объеме оказывает увеличение влажности пыли и отклонение от оптимальной концентрации.

Предохранительные клапаны и трубопроводы для отвода газов в безопасную зону применяются в случаях, когда исключается возможность выброса газов в помещение.

Эффективность предохранительных клапанов снижается по мере увеличения прочности диафрагмы. К тому же недостатком клапанов мембранного (диафрагменного) типа является возникновение вторичного взрыва после выброса образующихся при взрыве газов продуктов реакции. После выброса продукты в установке охлаждаются, создается разрежение и в нее засасывается воздух, взаимодействие с которым в камере горячей пыли вызывает вторичный взрыв. Поэтому конструкция предохранительных клапанов должна быть обеспечена устройством для закрытия отверстия после первичного выброса газов.

Эффективность трубопроводов также невысока из-за инерции воздушного столба и гидравлического сопротивления. Давление, возникающее в камере вследствие сопротивления длинных трубопроводов, можно снизить при помощи вспомогательных отверстий для выброса газа в стенке трубопровода. Эффективность такой системы для отвода газов при взрыве пыли падает с увеличением расстояния от оборудования до отверстия в стенке трубопровода. Следует по возможности избегать поворотов трубопроводов при отводе давления взрыва. Колено, которое разворачивает поток под прямым углом, вызывает такое же повышение давления, как и прямой трубопровод в три раза большей длины. Установка колена с углом поворота потока 450 вызывает практически аналогичный эффект. Максимальное давление в трубопроводе на внешней стороне изгиба и от изгиба до оборудования приближается к максимальному давлению в объеме, значительно превышая давление в прямом трубопроводе.

Заключение

Аналитически исследованы особенности возникновения и развития взрывов аэрозолей натуральных топлив в ограниченном и незамкнутом пространстве.

Характер зависимости давления и скорости его нарастания в ограниченном пространстве от протяженности испытательной установки показывает, что в камерах большей протяженности за время нарастания давления горение аэрозоля не охватывает весь объем, что снижает температурный уровень в объеме и, как следствие, характеристики взрыва. Можно заключить, что основной причиной снижения давления взрыва с увеличением протяженности испытательных камер является неодновременное протекание горения в разных частях объема камер и ростом степени неадиабатичности процесса. Неполнота выгорания увеличивается при отклонении от оптимальных условий развития взрыва (при концентрациях пыли в аэрозоли 0,6–1,5 кг/м^3). Об этом свидетельствуют результаты анализа продуктов реакции: в камерах всех размеров присутствуют продукты неполного сгорания: CO, CH_4 и H_2. Их количество в камерах большей протяженности больше, чем в камерах меньшей протяженности и содержание непрореагировавшего кислорода в больших камерах выше.

Может показаться, что в ограниченном пространстве не достигаются скорости, сопоставимые или близкие к детонации. Однако это не так. Изучение взрывов угольной пыли в опытных штольнях и шахтах длиной от 60 до нескольких сотен метров с поперечным сечением от 1,2 до 5,6 м^2 показало, что скорость распространения пламени может достигать до 2000 м/с. Анализ взрывов аэрозолей свидетельствует о том, что источники воспламенения пылевоздушных смесей являются ключевым звеном в интенсификации процессов и характеристике их последствий. При источниках воспламенения более слабых, чем первичный инициирующий взрыв (ударная волна, взрывчатые вещества, газовоздушная смесь),

например, тлеющие горючие отложения пыли, взвихренные с пола или стенок, воспламенение пылевоздушных смесей протекает с ограниченными скоростями, при этом практически отсутствует опасность сильных газодинамических явлений.

Развитие взрывов натуральных топлив в неограниченном пространстве рассматривается как задача выбора сечений для сброса аварийного давления и предотвращения разрушений при взрывах промышленного оборудования. При этом во внимание принимаются тепловыделение и истечение газов с учетом соединения оборудования с атмосферой путем вскрытия предохранительных мембран, клапанов, панелей и т. п., которые открываются при взрыве для выбросов газа, предотвращая повышение давления внутри установок.

При протекании взрыва в еще замкнутом объеме оборудования мембраны (диафрагмы, клапаны), закрывающие отверстие для истечения продуктов сгорания, если давление вскрытия отверстия высокое, то, в зависимости от степени его открытия (отношение площади мембраны к объему оборудования), могут развиваться взрывные давления, которые способны привести к разрушению оборудования, если его прочностные характеристики ниже прочности при развитии давления вскрытия отверстия.

При изучении истечения продуктов сгорания аэрозолей через открытые отверстия было показано, что те же факторы, которые способствуют снижению взрывного давления в закрытом объеме, уменьшают давление и в незакрытой (с открытым отверстием) камере.

К этим факторам относятся отклонения концентрации пыли от оптимальной, увеличение размера частиц и влажности аэрозоля, уменьшение концентрации кислорода, увеличение неоднородности пылевого облака и др. Эффективность предохранительных клапанов снижается по мере увеличения прочности диафрагмы. К тому же недостатком клапанов мембранного (диафрагменного) типа является возникновение вторичного взрыва после выброса образующихся при взрыве газов продуктов реакции. Эффективность трубопроводов также невысока из-за инерции воздушного столба и гидравлического сопротивления. Давление, возникающее в камере вследствие сопротивления длинных трубопроводов, можно снизить при помощи вспомогательных отверстий для выброса газа в стенке трубопровода.

Список литературы

1. Расчетно-аналитические исследования процессов самовозгорания аэрогелей углей / *Л.П. Вогман, И.А. Болодьян, Д.В. Долгих, Е.Е. Простов* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2026. № 2 (28). С. 7–13. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.13.38.001. EDN BGYETH.

2. Аналитические исследования воспламенения аэрозолей натуральных топлив / *Л.П. Вогман, И.А. Болодьян, Н.В. Кондратюк, А.В. Зуйков* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2026. № 3 (29). С. 21–31. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.79.52.003. EDN KBUEVP.

3. Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив / *В.В. Померанцев, С.Л. Шагалова, В.А. Резник, В.В. Кушнаренко*. Ленинград: Энергия. Ленинградское отделение, 1978. 144 с.

4. *Корольченко А.Я.* Пожаровзрывоопасность промышленных пылей. Москва: «Химия», 1986. 216 с.

5. Предупреждение взрывов в угольных и сланцевых шахтах / *П.М. Петрухин, М.И. Нецепляев, В.Н. Качан, В.С. Сергеев*. Москва: «Недра», 1974.

6. Cybulski W. Research on the essentials of propagation of coal dust explosion. Arch Proc. Spalania. № 2, vol. 5. 1974.

Статья поступила в редакцию 14.09.2026;

одобрена после рецензирования 14.10.2026;

принята к публикации 13.11.2026.

Вогман Леонид Петрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник; ***Болодьян Иван Ардашевич*** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник; ***Простов Евгений Николаевич*** – старший научный сотрудник; ***Бут Кирилл Романович*** – техник.

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Leonid P. Vogman – Doctor of Technical Sciences, Main Researcher; ***Ivan A. Bolodyan*** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Main Researcher; ***Evgeny N. Prostov*** – Senior Researcher; ***Kirill R. But*** – Engineer.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.