

УДК 662.612.1

DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2026.79.52.003>

EDN: <https://elibrary.ru/kbuevp>

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ НАТУРАЛЬНЫХ ТОПЛИВ

Леонид Петрович Вогман, Иван Ардашевич Болодьян, Наталья Валентиновна Кондратюк, Александр Владимирович Зуйков

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. В работе выполнен анализ расчетных и экспериментальных данных условий теплового и цепного воспламенения натуральных топлив (аэрозолей углей, торфов, сланцев) и влияние различных факторов: дисперсности и концентрации аэрозоля, газодинамических показателей двухфазной (воздух и дисперсная горючая масса) среды, а также состава окислительной атмосферы, температуры, начального давления горючей пылевоздушной смеси, внешних данных атмосферы на показатели взрыва аэрозолей. Установлена зависимость между характеристиками взрывоопасности натуральных топлив разной степени метаморфизма и количеством летучих, а также их химическим составом, содержащихся в топливе: взрывоопасность определяется, в основном, той частью летучих, которая представляет собой тяжелые органические соединения (смолы, кислоты и др.). Присутствие в натуральных топливах инертных компонентов (естественной зольности) снижает их взрывоопасность. Также и механические примеси инертной пыли к топливу снижают показатели взрыва.

Ключевые слова: натуральное топливо, аэрозоль, взрыв, влияние состава, влияние среды, влияние атмосферы

Для цитирования: 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.

ANALYTICAL STUDIES OF IGNITION OF NATURAL FUEL AEROSOLS

Leonid P. Vogman, Ivan A. Bolodyan, Natalia V. Kondratyuk, Alexandr V. Zuykov

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 paper analyzes calculated and experimental data on the conditions of thermal and chain ignition of natural fuels (coal, peat, and shale aerosols) and the influence of various factors such as aerosol dispersion and concentration, gas-dynamic parameters of a two-phase (air and dispersed combustible mass) medium, as well as the composition of the oxidizing atmosphere, temperature, initial pressure of a combustible dust-air mixture, external atmospheric data on aerosol explosion rates. A relationship has been established between the explosion characteristics of natural fuels of varying degrees of metamorphism and the amount of volatiles, contained in the fuel, as well as their chemical composition. The explosion hazard is determined

mainly by that part of the volatiles, which are heavy organic compounds (resins, acids, etc.). The presence of inert components (natural ash content) in natural fuels reduces their explosion hazard. Also, mechanical impurities of inert dust to the fuel reduce the explosion rate.

Keywords: natural fuel, aerosol, explosion, influence of composition, influence of environment, influence of atmosphere

For citation: Vogman L.P., Bolodyan I.A., Kondratyuk N.V., Zuykov A.V. Analytical studies of ignition of aerosols of natural fuels. Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2026, no. 3, pp. 21-31. (InRuss.). DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.79.52.003. EDN KBUEVP.

Введение

Воспламенение и горение углей в виде топливной пыли происходит как в слое отложений (аэрогели) при температурах 1000 °C и выше (низкотемпературное окисление в виде самонагрева с последующим самовозгоранием), так и в пылевоздушном потоке (аэрозоли, аэровзвеси, газовзвеси) как высокотемпературное горение, в основном при наличии источника зажигания.

В работе [1] выполнен расчетно-аналитический анализ процессов низкотемпературного окисления (самонагрева и самовозгорания) углей в состоянии аэрогеля (слоя углей на поверхности оборудования, грунта и т. п.). Иначе осуществляется воспламенение и горение пылевоздушного потока при воздействии на него источника зажигания. В этом случае ход процесса целиком определяется темпом насыщения аэрозольного облака летучей частью горючей массы топлива с концентрацией 8 % (об.) и более, выделение которой интенсифицируется при высокой температуре. Эта реакция протекает в гомогенной фазе вплоть до взрывного горения, реализуемого в виде теплового или цепного взрыва [2]. Однако следует заметить, что как в отложениях (аэрогели), так и в потоке в виде аэровзвеси (газовзвеси, аэрозоли) основной горючей составляющей являются летучие.

В случае теплового воспламенения до его наступления реакция идет хотя и с небольшой, но измеримой скоростью, а выделяющаяся энергия химической реакции превращается в тепло, ускоряя реакцию. Тепловой взрыв характерен для газовзвеси частиц твердого горючего. Распространение взрыва во газовзвеси происходит за счет передачи теплоты от фронта пламени соседним холодным слоям и за счет воспламенения последних, благодаря чему фронт пламени перемещается относительно еще не горящей смеси. Передача теплоты может осуществляться различным образом в зависимости от дисперсности, концентрации, горючих свойств пыли, мощности источника зажигания, размеров и формы сосуда и т. п. При этом механизмы передачи теплоты могут происходить за счет теплопроводности, излучения и адиабатического сжатия ударной волны, распространяющейся впереди волны горения, вплоть до проявления детонации.

При цепном воспламенении характерно практически полное отсутствие реакции ниже предела по температуре, концентрации летучей части горючей массы и резкое увеличение скорости до больших значений при переходе через предел. Реакция протекает при участии активных центров, таких как атомы H, O и OH, а также пероксида водорода, озона и др.

В отличие от случая перемешанных газовых смесей расчеты для газовзвесей усложняются учетом дополнительных обстоятельств – длительностью прогрева частиц и возможностью протекания реакции между твердыми частицами горючего и газообразного окислителя в кинетической и диффузионной областях.

Тепловыделение происходит на поверхности частиц (гетерогенное горение) и в диффузионном пламени, окружающем частицу. Температура частиц отличается от температуры газа как в зоне подогрева, так и в зоне реакции.

Первой теорией горения аэрозолей можно назвать кондуктивную теорию [3]. Решающая роль в этой теории распространения пламени при прогреве и воспламенении частиц горючего (или выделяющихся из них летучих) свежей смеси принадлежит молекулярной теплопроводности по газу. Вместе с тем анализ кондуктивного подхода гетерогенного горения показал, что эту модель можно использовать при описании процессов распространения пламени по аэрозолю мелкодисперсных органических материалов с размером частиц < 10 мкм, когда ширина фронта пламени оказывается сравнимой с шириной пламени гомогенных смесей. Дело в том, что для частиц углерода размером 100 мкм фронт пламени при учете теплообмена излучением движется со скоростью 1,75 м/с, в то время как при расчете с учетом только теплопроводности она составляет 0,8 м/с. При этом толщина фронта пламени увеличивается в 500 раз.

Для разрешения противоречий между теорией и экспериментом, в котором зарегистрированы высокие скорости распространения пламени по наиболее распространенным промышленным аэрозолям с размером частиц > 10 мкм, наиболее универсальной признана модель распространения пламени аэрозоля с радиационным механизмом передачи тепла в предположении, что теплопроводностью можно пренебречь в сравнении с излучением от пламени [4]. Основы такого подхода заложены Нуссельтом [5] и развиты другими учеными и их школами [6]. Большие скорости распространения радиационных пламен до 1000 м/с и более с большой толщиной фронта пламени (порядка толщины зоны прогрева излучением) могут достигаться только в аэрозвесах крупных частиц толщиной более 50 мкм в условиях, близких к адиабатическим. Такие условия вряд ли осуществимы в открытых пламенах небольших горелок, где наблюдаемые скорости пламени значительно меньше, чем получаемые из расчета для радиационного пламени. Ускорение пламени на практике во многих случаях связывают с влиянием турбулентности существующей первоначально горючей смеси или возникающей под влиянием быстро движущегося пламени с выталкиванием смеси за счет ее сжатия перед движущимся фронтом пламени с изменением газодинамической обстановки при появлении волн давления, генерируемых пламенем.

Из анализа низкотемпературного окисления натуральных топлив (аэрогелей) [1] и воспламенения (горения, взрыва) пылевоздушного потока (аэрозолей) следует, что для каждого из них механизм окисления различен.

В настоящей работе внимание уделено процессам высокотемпературного окисления аэрозолей натуральных топлив (торф, уголь, сланцы и т. п.).

Цель работы заключается в анализе расчетных и экспериментальных данных условий теплового и цепного воспламенения натуральных топлив и изучении влияния различных факторов (дисперсность и концентрация аэрозоля, газодинамические показатели двухфазной (воздух и дисперсная горючая масса) среды, температуры, внешних данных атмосферы на взрывоопасность аэрозвесей.

1. Методы экспериментального изучения воспламенения натуральных топлив

Методы лабораторных экспериментальных исследований воспламенения горючих дисперсных веществ и материалов, и в частности, натуральных топлив, подробно описаны в работах [3, 4]. Получение равномерного пылевого облака в объеме установки является основной методической задачей в подобного рода

опытах. Ее решение имеет принципиальное значение. Если смесеобразование заканчивается к моменту воспламенения аэровзвеси, то и время развития взрыва горючей пыли определяется кинетикой выделения и горения летучих, т. е. свойствами самой пыли. К сожалению, зачастую техника экспериментальных исследований, применяемая при изучении взрывов газовых смесей, непригодна к использованию с пылевоздушными средами. Поэтому наиболее представительные и важные исследования пылевоздушных смесей осуществляются в натурных условиях (в штольнях и шахтах). Опытная штольня представляет собой стальную трубу с толщиной стенки 14 мм, диаметром 1,8 м, длиной 62 м. Экспериментальная шахта имеет общую длину горизонтальных, вертикальных и наклонных выработок около 1000 м, площадь поперечного сечения опытных участков 6,5 м². Перед проведением эксперимента необходимое количество угольной пыли рассыпается на полу или на полках вдоль штольни (шахты). Взвихрение пыли и ее воспламенение осуществляются различными способами: зарядом взрывчатых веществ, метано-воздушной смесью, другими способами. При этом осуществляется регистрация скорости распространения пламени (ударных волн), максимального давления взрыва и других показателей взрыва. Как видно, эксперименты в шахтах и штольнях – трудоемки и весьма затратны. Поэтому большая часть исследований выполняется на лабораторных установках различных модификаций открытого и закрытого типа [3, 4]. Данные лабораторных испытаний позволяют сравнивать пожаровзрывоопасные свойства углей различных типов и марок, исследовать воздействие на горючие аэрозоли инертных добавок и ингибиторов и др.

2. Свойства аэрозолей натуральных топлив, характеризующие их пожаровзрывоопасность

На протекание взрывов натуральных топлив влияют такие показатели, как концентрация, дисперсность и влажность пыли, состав органической и минеральной части массы, состав и параметры газовой среды до и после взрыва.

2.1. Концентрация пыли

Пожаровзрывоопасность горючих пылей, как и газовоздушных смесей, характеризуются нижним (НКПР) и верхним (ВКПР) концентрационными пределами распространения пламени. Пределы распространения пламени одних и тех же веществ, измеренные разными авторами, иногда различаются на порядок и более. Причина этого – зависимость пределов от многих факторов: размеров и формы частиц (частицы неправильной формы более опасны), составляющих аэрозоль, их влажности, степени окисленности поверхности (неизбежен контакт с окислителем при хранении: воспламеняемость пылей снижается с увеличением степени окисленности), дисперсности, электризуемости, содержания инертных компонентов, способов приготовления, длительности хранения пыли и т. д. Кроме того, результаты определения пределов распространения пламени зависят и от конструктивных особенностей установок, на которых проводятся измерения, а также от принятой методики: размеров взрывных камер, типов распылителей, направлением распыления, видом источника зажигания и т. п.

Расчетные методы определения значений пределов распространения пламени горючих аэровзвесей (и других показателей пожаровзрывоопасности) приняты для показателей пожаровзрывоопасности органических дисперсных материалов [7]. Данные методы расчета используются применительно к комбикормовым и зерновым пылям, а также к органическим химическим и биохимическим реактивам. Расчет показателей пожаровзрывоопасности натуральных топлив [7] не рекомендован.

Как и у газоздушных смесей, концентрационные пределы взрывов топливной пыли зависят от начальных значений давления и температуры, конфигурации реакционного сосуда, свойств горючего. Изучение влияния концентрации пыли проводится в опытах с сухой (выдержанной в термостате до постоянной массы пробы) пылью различных фракций в интервале размеров частиц до 114 мкм. За результат испытаний принимались показатели: НКПР (г/м^3), максимальное P_{max} и избыточное ΔP давление взрыва (Па, кПа), время достижения максимального давления взрыва t (с, мс), скорость нарастания давления dp/dt (Па, кПа/с). Значение оптимальной концентрации, при которой развиваются взрывы наибольшей силы (P_{max}) различных натуральных топлив, находится в диапазоне от 0,4 до 2,0 кг/м^3 . При этом отчетливо регистрируется НКПР. Например, НКПР пылей с размером частиц менее 70 мкм составляет 0,05–0,15 кг/м^3 для бурых, 0,1–0,25 кг/м^3 для каменных углей. Вместе с тем концентрация на ВКПР определяется далеко неоднозначно. Это связано с трудностью создания и поддержания в течение достаточно продолжительного времени равномерного пылевого облака большой плотности, особенно для грубодисперсных систем, обладающих высокой седиметацией частиц. Ориентировочно (по оценочным данным) значение ВКПР высокодисперсной пыли натуральных топлив превышает 3–4 кг/м^3 .

2.2. Состав органической массы натуральных топлив

Характеристики взрывоопасности натуральных топлив (с одной стороны – количество летучих, их химический состав, а с другой стороны – максимальное давление взрыва P_{max}) разной степени метаморфизма позволили установить связь между этими характеристиками. Установленная зависимость свидетельствует о том, что взрывоопасность пыли натуральных топлив определяется, в основном, той частью летучих, которая представляет собой тяжелые органические соединения (смолы, кислоты и др.). Оказалось, что и концентрационные пределы, и максимальный размер частицы, и влажность топлива, исключая развитие взрыва пыли при заданных начальных параметрах, определяются соотношением свободного водорода к углероду летучих. По этому показателю наиболее взрывоопасными следует признать бурые угли, торф, сланец и древесную пыль. Менее взрывоопасны каменные угли, а пыли антрацитов, полуантрацитов с содержанием летучих менее 8 % (масс.) невзрывоопасны. Опыты, проведенные с окисленной пылью, соответствующей оптимальным условиям взрыва не окисленной пыли, показывают снижение давления взрыва. Они подтверждают вывод о том, что при повышении окисленности натуральных топлив в условиях хранения или длительного их применения характеристики взрыва снижаются.

2.3. Дисперсность пыли натуральных топлив

Взрывоопасность аэрозоля натурального топлива при всех других равных условиях возрастает при уменьшении размеров частиц. Частицы меньшего размера легче переходят во взвешенное состояние, дольше остаются в состоянии взвеси, легче зажигаются и быстрее сгорают. Эксперимент показывает, что уменьшение размера частиц приводит также к снижению минимальной энергии зажигания (при уменьшении среднего размера частиц от 50 до 3 мкм эта зависимость имеет линейный характер) и к снижению температуры самовоспламенения.

При изучении влияния степени дисперсности угольной и торфяной пыли показано, что низкодисперсная (грубая) пыль невзрывоопасна. По мере угрубления пыли характеристики взрыва снижаются. Например, взрыв не удалось воспроизвести, если средний размер частиц превышал: торфа 0,2 мм; бурых углей и сланцев – 0,15 мм; каменных углей – 0,12 мм. При исследовании воспламенения

мости полифракционной пыли показано, что при содержании фракций грубого помола свыше 30 % (масс.) такая пылевоздушная смесь становится практически взрывобезопасной. Иначе говоря, грубые фракции в этом случае играют роль инертной добавки. С увеличением тонины помола горючей дисперсной массы интенсивность взрыва (максимальное и избыточное давление взрыва, скорость нарастания давления взрыва) возрастает. Это обусловлено рядом факторов. Тонкая пыль имеет большую удельную поверхность на единицу массы, легче прогревается и образует горючую смесь с концентрацией горючих в объеме, достаточной для распространения пламени. При одной и той же активной поверхности интенсивность взрыва крупных частиц много ниже. Объясняется это тем, что вследствие медленного прогрева крупных частиц аэрозоля не сразу создается нужная концентрация летучих, развитие взрыва не происходит или становится невозможным.

Важным является вопрос интенсивности взрыва ультратонкой пыли (~ 0,005 мм) для решения практических мероприятий, связанных с вентиляционными потоками в шахтах. Отложения такой пыли при взвихрении переходят в первую очередь из состояния аэрогеля в состояние аэрозоля. Опыты с фракцией угольной пыли тоньше 0,005 мм показали, что максимальное давление взрыва снижается по сравнению с более крупными фракциями (0,043 мм и 0,043–0,074 мм). Причиной снижения интенсивности взрыва, по-видимому, является агломерирование частиц мелких фракций в крупные комплексы. Это может быть нивелировано, если, например, к аэрозолю добавить крупные фракции пыли или если усилить мощность источника инициирования воспламенения аэрозоля.

2.4. Влажность пыли натуральных топлив

Пожаровзрывоопасность угольной, торфяной, сланцевой и другой пыли натуральных топлив возрастает по мере уменьшения ее влажности. Причем это влияние оказывается более значительным, чем можно было бы ожидать от чисто теплового действия. По-видимому, флегматизирующий эффект усиливается в результате экранирующего слоя вокруг частицы, обогащенного водяными парами. Влага проявляет флегматизирующие свойства за счет поглощения теплоты на свое испарение. Одновременно испарившаяся влага понижает концентрацию кислорода в аэровзвеси и тем самым также влияет на интенсивность взрыва. Взрывы влажной пыли характеризуются невысоким уровнем максимального давления при влажности, превосходящей гигроскопическую. Например, развитие опасных давлений взрыва пыли бурых и каменных углей становится невозможным при влажности, превышающей гигроскопическую на 2–4 % (масс.), пыль торфа взрывается при влажности менее 25 % (масс.). Влажная пыль легко слипается даже во взвешенном состоянии, уменьшая активную поверхность. Следует заметить, что влажность при самовозгорании аэрогелей натуральных топлив имеет прямо противоположный эффект по сравнению с ее влиянием на взрывоопасные свойства аэрозолей: при повышении влажности пожароопасность аэрогелей возрастает [1].

2.5. Состав пыли натуральных топлив

2.5.1. Минеральная часть топлива

Присутствие в натуральных топливах инертных компонентов (естественной зольности) снижает их взрывоопасность: при этом повышается значение НКПР, минимальной энергии зажигания, снижается максимальное давление взрыва и скорость его нарастания. Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) остается неизменным при повышении доли инертного компонента до 60–70 % (масс.). Зольность натуральных топлив может изменяться от 2 до

23 % (масс.), а состав органической массы при этом изменяется незначительно. При концентрации пыли торфов, соответствующей оптимальной, характеристики взрыва примерно одинаковы и зольность не влияет на этот процесс. При концентрации более 2 кг/м³ интенсивность взрывов торфов снижается, однако изменения показателей взрыва от содержания золы не наблюдается. В целом можно сказать, что естественная зольность мало влияет на взрываемость пылей натуральных топлив в довольно широких пределах содержания в них углерода вплоть до 55 % (масс.). Причиной этого является тот факт, что взрыв пыли почти всегда протекает в условиях избытка горючего компонента.

Совсем иначе на развитие взрыва оказывают влияние механические примеси инертной пыли к топливу. С увеличением примеси золы к топливной пыли показатели взрыва снижаются. При некоторой предельной добавке давление в замкнутом объеме не растет, хотя пыль может тлеть после контакта с источником зажигания. Добавка 15–20 % (масс.) инертной добавки не сказывается на взрываемости пыли торфа и только при 40–50 % (масс.) регистрируется незначительный рост давления. Для угольной пыли требуется меньшее количество инертной добавки. Однако в опытах с перемешиванием во время взрыва за счет движения воздуха и газов предельные взрывобезопасные значения инертной добавки могут достигать 70–80 % (масс.).

2.5.2. Состав и параметры окислительной атмосферы

Состав окислительной атмосферы (содержание кислорода в ней) оказывает большое влияние на взрывоопасность аэрозолей. Увеличение концентрации кислорода в кислородно-азотной смеси приводит к снижению температуры самовоспламенения пылевого облака и мощности источника зажигания.

Температура горючей пылевоздушной смеси. Повышение температуры увеличивает скорость горения аэрозоля и с ее ростом можно ожидать интенсификацию взрывов пылей. В то же время за счет выделения продуктов термоокислительной деструкции снижается в смеси содержание кислорода. Эти разнонаправленные процессы в итоге нивелируют друг друга. Экспериментальные исследования с торфами различных месторождений показали [4], что максимальное давление взрыва уменьшается с увеличением температуры воздуха, а время горения пыли в постоянном объеме реакционного сосуда растет. При температуре 2500 °С интенсивность взрывов снижается, а давление соответствует атмосферному (100 кПа). Обусловлено это тем, что уже при температуре 2000 °С начинается выделение летучих из топлива и их окисление еще до возникновения взрыва. В этих условиях в реакционном сосуде атмосфера становится инертной с пониженной объемной концентрацией кислорода. В объеме с температурой 350–4000 °С выход продуктов разложения уже столь существенный, что заметного подъема давления при инициировании взрыва не происходит. Действие на аэрозвеси продуктов термоокислительной деструкции пыли можно сравнить с действием на них инертных добавок: помимо уменьшения содержания кислорода воздуха увеличивается теплоемкость смеси и тем самым снижается разрушительный эффект взрыва. При содержании кислорода в пылегазовой смеси 16 % (об.) и менее пыль торфа не взрывается, независимо от того, какой инертный компонент в смесь добавлен. Для пылей углей в ряде исследований этот показатель был ниже и составлял 10–12 % (об.).

На рис. 1 и 2 показано влияние разбавления горючих аэрозолей торфяной пыли диоксидом углерода и азота. Как видно из рис. 1, одинаковые по объему добавки инертных газов по-разному проявляют себя при взрыве пыли. Такое различие обусловлено не только большей теплоемкостью диоксида углерода по

сравнению с азотом (рис. 2), но и тем, что диоксид углерода при высокой температуре в постоянном объеме вступает в эндотермические реакции и воздействует на горение активнее, чем азот.

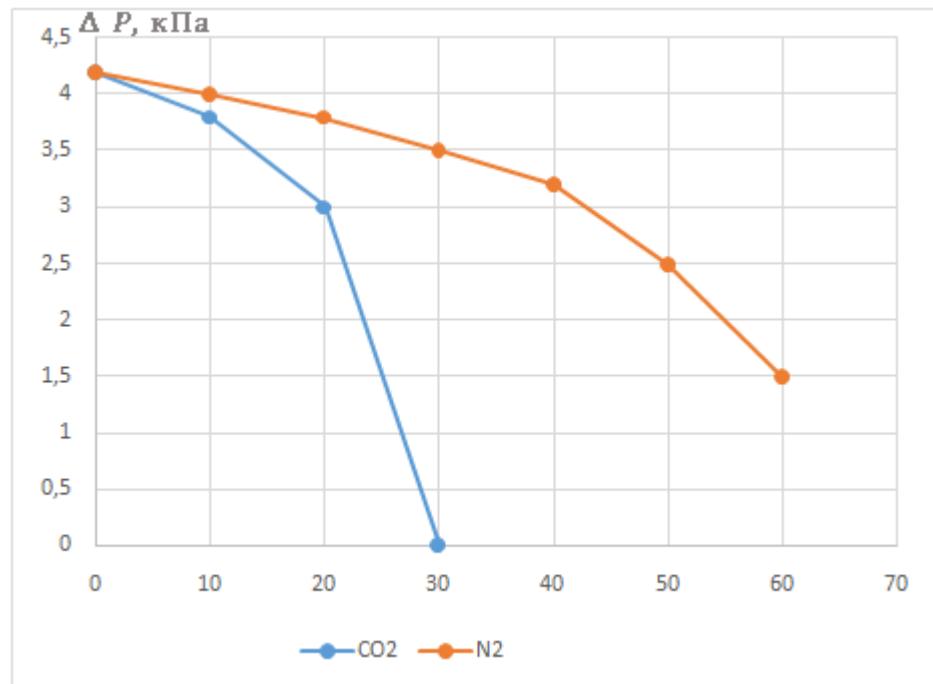


Рис. 1. Избыточное давление взрыва ΔP торфяной пыли (концентрация $1,56 \text{ кг/м}^3$) при разбавлении аэрозоля инертными газами в зависимости от добавки диоксида углерода и азота (% об.)

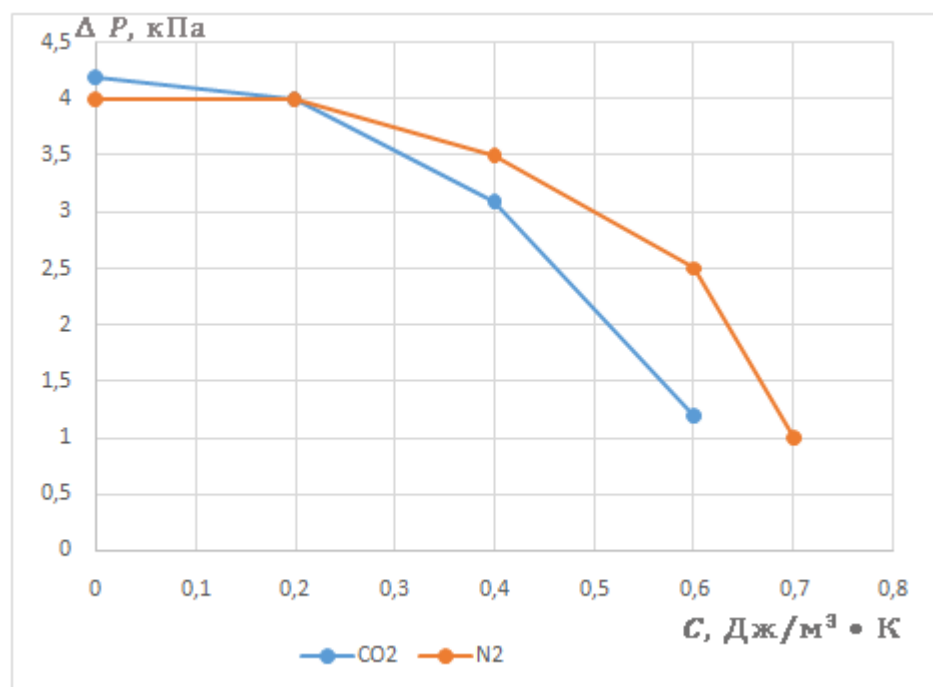


Рис. 2. Избыточное давление взрыва ΔP торфяной пыли (концентрация $1,56 \text{ кг/м}^3$) при разбавлении аэрозоля диоксидом углерода и азотом в зависимости от теплоемкости пыле-, газовойздушной среды

Начальное давление горючей пылевоздушной смеси. Исследования влияния начального давления ($1; 1,5; 2,0; 2,5 \times 10^5 \text{ Па}$) на характеристики взрыва проводились с тонкой фракцией ($0,053\text{--}0,074 \text{ мм}$) сухой пыли торфа. Как показали исследования, характер зависимости одинаков для всех начальных давлений

(с ростом начального давления растут показатели взрыва), однако минимальные концентрации пыли в потоке, при которых возможно развитие взрыва, увеличиваются с увеличением начального давления. Обращает на себя внимание тот факт, что при пылевых взрывах максимальное давление развивается при большом недостатке воздуха в системе, соответствующем коэффициенту избытка воздуха $a_T = L/L_0$ (где L – фактическое количество воздуха на 1 кг топлива, L_0 – теоретическое количество воздуха на сгорание 1 кг топлива), близкого к значению 0,08–0,1. Наличие оптимальных условий взрыва при таких дефицитах воздуха свидетельствует о том, что взрывы пылей являются следствием реакций неполного горения, причем в реакции принимает участие небольшая часть топлива. Отсюда можно заключить, что горение на НКПР переходит во взрыв, как только концентрация летучих в аэрозвеси достигает некоторого небольшого (критического) значения и, следовательно, дефицитный при взрывах пыли кислород на нижнем концентрационном пределе распространения пламени натуральных топлив имеется в избытке. Наблюдаемое в опытах некоторое замедление развития процесса воспламенения при повышенных начальных давлениях является следствием замедления выхода летучих.

О неполноте горения всех видов натуральных топлив свидетельствуют результаты экспериментальных исследований по анализу в газообразной среде продуктов термической и термоокислительной деструкции летучих [4]. Неполнота горения возрастает по мере увеличения концентрации пыли сверх оптимальной для развития взрыва. Даже при наличии оптимальных (стехиометрических) концентрациях пылей наблюдается неполное использование кислорода. Например, при взрыве торфяной пыли используется 18–19 % (об.) кислорода из 21 % (об.), а при взрыве углей еще меньше. Элементный анализ топлив до и после взрыва показывает, что при взрыве торфяной пыли содержание кислорода в остатках меньше, чем в исходном топливе, а при взрыве каменных углей больше. Из анализа характера при взрыве газообразования и выгорания натуральных топлив можно заключить, что, несмотря на недостаток кислорода, в пылевоздушной смеси используется только часть его в зависимости от типа топлива, концентрации его в потоке и других факторов. Взрыв происходит в результате газифицированных летучих, окружающих частицы пыли, а при взрывах каменных углей не исключается поверхностное горение.

Заключение

В работе выполнен анализ расчетных и экспериментальных данных условий теплового и цепного воспламенения натуральных топлив (аэрозолей углей, торфов, сланцев) и влияние различных факторов: дисперсности и концентрации аэрозоля, газодинамических показателей двухфазной (воздух и дисперсная горючая масса) среды, а также состава окислительной атмосферы, температуры, начального давления горючей пылевоздушной смеси, внешних данных атмосферы на показатели взрыва аэрозолей. Расчетные методы определения значений пределов распространения пламени горючих аэрозвесей и других показателей их пожаровзрывоопасности не распространяются на натуральные топлива. НКПР пылей с размером частиц менее 70 мкм составляет 0,05–0,15 кг/м³ для бурых, 0,1–0,25 кг/м³ для каменных углей. Значение ВКПР пламени высокодисперсной пыли натуральных топлив ориентировочно превышает 3–4 кг/м³. Установлена зависимость между характеристиками взрывоопасности натуральных

топлив разной степени метаморфизма и количеством летучих, их химическим составом, содержащимся в топливе: взрывоопасность определяется, в основном, той частью летучих, которая представляет собой тяжелые органические соединения (смолы, кислоты и др.). Взрывоопасность аэрозоля натурального топлива при всех других равных условиях возрастает при уменьшении размеров частиц. Частицы меньшего размера легче переходят во взвешенное состояние, дольше остаются в состоянии взвеси, легче зажигаются и быстрее сгорают. Пожаровзрывоопасность угольной, торфяной, сланцевой и другой пыли натуральных топлив возрастает по мере уменьшения ее влажности. Присутствие в натуральных топливах инертных компонентов (естественной зольности) снижает их взрывоопасность. Примеси инертной пыли к топливу также снижают показатели взрыва. Увеличение концентрации кислорода в кислородно-азотной смеси приводит к снижению температуры самовоспламенения пылевого облака и мощности источника зажигания. Повышение температуры увеличивает скорость горения аэрозоля и с ее ростом можно ожидать интенсификации взрывов пылей. В то же время за счет выделения продуктов термоокислительной деструкции в смеси снижается содержание кислорода. Эти разнонаправленные процессы в итоге нивелируют друг друга. Действие на аэровзвеси продуктов термоокислительной деструкции пыли можно сравнить с действием на них инертных газообразных добавок: помимо уменьшения содержания кислорода воздуха увеличивается теплосъемность смеси и тем самым снижается разрушительный эффект взрыва. При содержании кислорода в пылегазовой смеси 16 % (об.) и менее пыль торфа не взрывается, независимо от того, какой инертный компонент в смесь добавлен. Для пылей углей в ряде исследований этот показатель был ниже и составлял 10–12 % (об.). Исследования влияния начального давления показали, что характер зависимости одинаков для всех начальных давлений: с ростом начального давления растут показатели взрыва, однако минимальные концентрации пыли в потоке, при которых возможно развитие взрыва, увеличиваются. При пылевых взрывах максимальное давление развивается при большом недостатке воздуха в системе: взрывы пылей являются следствием реакций неполного горения, причем в реакции принимает участие небольшая часть топлива.

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/vniipro.avrb.2026.13.38.001. EDN BGYETH.
2. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. Москва: Издательство АН СССР, 1958.
3. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленных пылей. Москва: Химия, 1986. 216.
4. Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив / В.В. Померанцев, С.Л. Шагалова, В.А. Резник, В.В. Кушнарченко. Ленинград: Энергия. Ленинградское отделение, 1978. 144 с.
5. Nusselt W. Schlagwetterschutz – Explosionsschutz. – Z. VDI, Bd. 68, № 10, 1924.
6. Тодес О.М., Гольцикер А.Д., Чивилихин С.А. Радиационный механизм формирования и развития фронта пламени в аэродисперсных системах // Докл. АН СССР. Т. 213, № 2. 1973.

7. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов: руководство. Москва: ВНИИПО МЧС России, 2002. 77с.

Статья поступила в редакцию 26.05.2026;

одобрена после рецензирования 26.06.2026;

принята к публикации 27.07.2026.

Вогман Леонид Петрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник. E-mail: 3.5.2@vniipo.ru; **Болодьян Иван Ардашевич** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. E-mail: 3.5.3@vniipo.ru; **Кондратюк Наталья Валентиновна** – старший научный сотрудник; **Зуйков Александр Владимирович** – старший научный сотрудник.

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. E-mail: 3.5.2@vniipo.ru; **Ivan A. Bolodyan** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Main Researcher, E-mail: 3.5.3@vniipo.ru; **Natalia V. Kondratyuk** – Senior Researcher; **Alexandr V. Zuykov** – Senior Researcher.

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