

СТАТЬИ

УДК 620.261:550.3
DOI 10.17513/use.38536



CC BY 4.0

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ВЕЩЕСТВ И ИХ ОБЪЕМА ДЛЯ ТУШЕНИЯ НЕКОНТРОЛИРУЕМОГО ГОРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОГО ВЗРЫВА

Курносков В. В. ORCID ID 0009-0000-0572-1278,
Андреева Е. С. ORCID ID 0000-0001-7087-1870

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
e-mail: Meteo0717@yandex.ru*

В статье осуществляется выбор и оценка количества взрывчатого вещества, необходимого для создания и безопасного использования эффективной ударно-воздушной волны в рамках реализации метода направленного взрыва, применяемого для тушения опасного неконтролируемого горения. Также исследуется механизм применения направленного взрыва, в частности его наиболее важные параметры: бризантность и фугасность. Подчеркивается, что данный метод наиболее приемлем для тушения ландшафтных пожаров. Для реализации цели исследования автором рассмотрены физические и химические свойства трех веществ – тринитротолуола, пироксилина и гексогена. Выбор наилучшего взрывчатого вещества основывался на расчетах с использованием формулы Д. И. Менделеева, позволившей вычислить теплосодержание продуктов горения, а также собственно температуру горения. По упомянутым показателям наилучшие результаты были зафиксированы для тринитротолуола. Однако финальные результаты расчетов, в частности оценка параметров давления взрыва, позволили выявить взрывчатое вещество с наименьшей температурой горения и наименьшим количеством молей продуктов горения, включая смесь – гексоген, применение которого для тушения опасного горения может иметь наиболее благоприятный эффект в плане создания ударно-воздушной волны и срыва пламени. В перспективе, как представляется, больший эффект от применения гексогена можно улучшить, используя кумулятивное действие.

Ключевые слова: тушение направленным взрывом, взрывчатое вещество, срыв пламени, давление взрыва, ландшафтные пожары, ударно воздушная волна, кумулятивное действие, температура, метод, фугасное действие

OPTIMIZATION OF THE SELECTION OF SUBSTANCES AND THEIR VOLUME FOR EXTINGUISHING UNCONTROLLED COMBUSTION USING THE METHOD OF DIRECTIOINAL EXPLOSION

Kurnosov V. V. ORCID ID 0009-0000-0572-1278,
Andreeva E. S. ORCID ID 0000-0001-7087-1870

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Don State Technical University”, Rostov-on-Don, Russian Federation,
e-mail: Meteo0717@yandex.ru*

This article examines the selection and evaluation of the amount of explosive required to generate and safely deploy an effective shock wave using the directional blast method for extinguishing hazardous, uncontrolled fires. The mechanism for directional blasting, specifically its most important parameters: brisance and explosiveness, is also examined. It is emphasized that this method is most suitable for extinguishing landscape fires. To achieve this goal, the author examined the physical and chemical properties of three substances: trinitrotoluene, pyroxylin, and hexogen. The selection of the optimal explosive was based on calculations using D. I. Mendeleev's formula, which allowed for the calculation of the heat content of combustion products, as well as the combustion temperature itself. Based on these parameters, the best results were recorded for trinitrotoluene. However, the final calculation results, in particular the assessment of explosion pressure parameters, allowed us to identify an explosive with the lowest combustion temperature and the fewest moles of combustion products, including a mixture of hexogen, whose use in extinguishing hazardous fires may have the most beneficial effect in terms of creating a shock wave and flame breakdown. In the future, it appears that the effectiveness of hexogen could be further enhanced by exploiting its cumulative effect.

Keyword: extinguishing by directional explosion, explosive substance, flame disruption, explosion pressure, landscape fires, shock air wave, cumulative effect, temperature, method, high explosive action

Введение

В последние годы методы борьбы с очагами возгораний становятся все более разнообразными и инновационными. Одним из таких является малоприменимый метод

тушения неконтролируемого горения направленным взрывом. Этот подход основывается на базовых принципах физики, инженерии и пожарной безопасности, предусматривая оригинальные решения для эф-

фективного подавления пламени. В данном исследовании рассмотрены теоретические аспекты выбора вещества для создания требуемого давления взрыва с наименьшим дробящим эффектом и проведены соответствующие практические расчеты.

Как известно, метод тушения направленным взрывом предполагает совокупное применение специализированной техники, употребляемой для ликвидации пожаров или предотвращения их распространения с использованием контролируемых взрывных устройств. Этот метод может быть особенно эффективен в ситуациях, когда традиционные способы тушения огня, такие как использование воды или огнетушителей, не могут быть эффективно применены.

Также нельзя не отметить, что в результате воздействия ветра с усредненной скоростью в 2 м/с на открытое горение, пламя способно отклоняться на 45° , в результате этого многократно увеличивается объем захваченного воздуха [1-3]. Тот же эффект наблюдается при воздействии ударной волны на пламя, к тому же её скорость в сотни раз превышает скорость ветра. В совокупности эти факторы приведут к подрыву пламени, в связи с чем произойдет нарушение его целостности [4].

Помимо этого, взаимодействие воздушной волны при прохождении сквозь огонь может привести к частичному завихрению окружающего воздуха. К тому же повышение беспорядочности слоев воздуха грозит отрывом или дроблением пламени. Применение флегматизаторов и ингибиторов также приведет к срыву факела, а если концентрация газа достигнет необходимого уровня – к ликвидации пламени.

Становится ясно, что данный метод довольно гибкий и может предусматривать разные механизмы тушения пламени, но ключевым является возникновение взрыва. В этой связи данное исследование ориентировано на подбор и оптимизацию наиболее приемлемого для инициации взрыва вещества.

В связи с вышеуказанным следует пояснить, что такие процессы, как *горение*, *взрыв*, *детонация* и *дефлаграция*, несмотря на достаточно близкие причины возникновения, поскольку обуславливаются окислением (горением), отличаются, главным образом, разными режимами высвобождения энергии, а также скоростью протекания химической реакции, механизмами распространения фронта пламени и физическим воздействием на окружающую среду.

Строго говоря, *температуру горения нельзя приравнивать к температуре взрыва*, потому что это принципиально разные термодинамические процессы. Так, при горении тепло выделяется достаточно медленно, по своей сути процесс может быть охарактеризован как равновесный. При детонации, относящейся к сильнонеравновесным процессам, энергия выделяется стремительно, за микросекунды, из-за сложных преобразований вещества; еще до начала химической реакции происходит резкий скачок температуры веществ, вследствие чего температура продуктов детонации всегда выше, чем температура тех же веществ при обычном горении.

Как известно, основными характеристиками взрывчатых веществ, играющими решающую роль в оценке их эффективности и применимости, являются «бризантность» и «фугасность».

Бризантность – характеристика, которая определяет их способность к местному или локальному дробящему воздействию на среду, непосредственно соприкасающуюся с зарядом [5].

Фугасность – это способность взрывчатых веществ к разрушительному действию за счет расширения продуктов детонации [6; 7]. Основным поражающим фактором, проявляющимся в виде деформации, отталкивания и разрушения, является прохождение ударной воздушной волны по окружающей среде.

Изучение указанной выше информации позволяет сделать вывод о том, что для достижения нужного результата требуется осуществить анализ и выявить вещества с необходимым соотношением бризантности к фугасности, что поможет существенно снизить уровень разрушений.

Как показали исследования, наиболее подходящими веществами для оценки их приемлемости в качестве взрывчатого вещества, способствующего срыву пламени и прекращению горения, могут быть тринитротолуол (ТНТ), пироксилин и гексоген (RDX).

Данные компоненты считаются базовыми для производства других взрывчатых веществ. Таким образом, они применяются в разных сферах деятельности. К примеру, ТНТ используют при производстве боеприпасов, включая артиллерийское и авиационное оружие, а также в горнодобывающей промышленности. Пироксилин применяется для создания пиротехнических изделий и безопасных взрывных материалов, в том числе для фейерверков и пиротехнических эффектов.

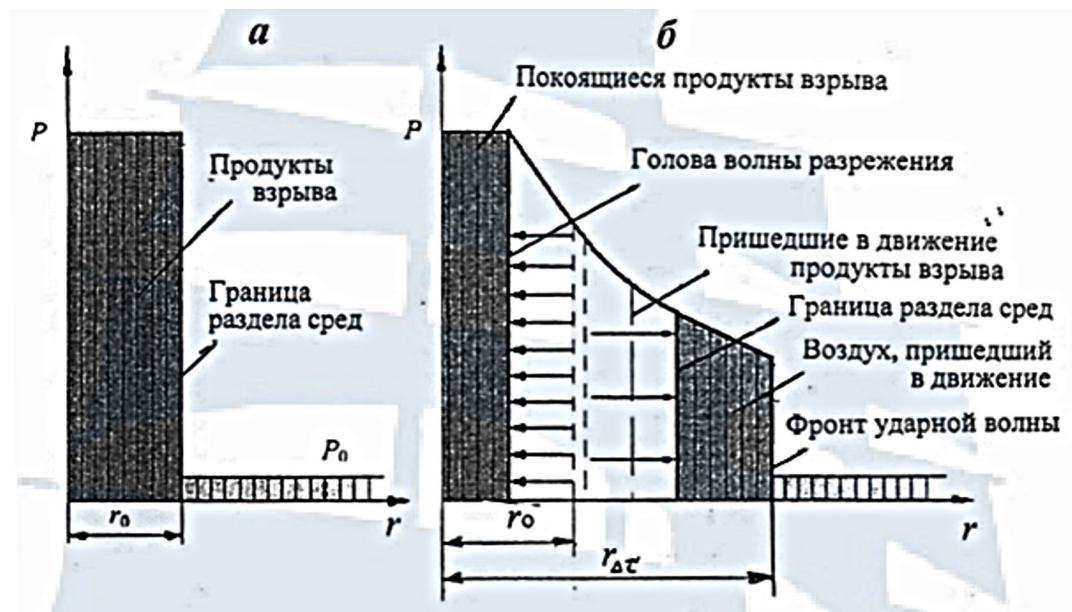


Рис. 1. Этапы формирования воздушной ударной волны: а – исходное состояние; б – последующее состояние Δt ; r_0 – проведённый радиус заряда взрывчатого вещества; r – расстояние; P_0 – нормальное атмосферное давление; P – давление в продуктах взрыва [5]

А гексоген применяют для изучения взрывной химии, энергетики и механизмов реакций при взрывах. Его также используют в изготовлении стандартных проб, необходимых для испытаний и анализа взрывных материалов.

Цель исследования – математическая оценка выбора оптимального количества взрывчатого вещества, формирующего ударно-воздушную волну достаточной мощности, для обоснования принципиальной применимости и эффективности выбранного вещества в реализации метода тушения направленным взрывом (рис. 1).

В числе основных задач, позволяющих реализовать цель, можно выделить следующие:

- изучение физических принципов формирования очагов неконтролируемого горения в разных условиях и средах;
- выявление характерных численных условий сред, обеспечивающих максимальные параметры горения (рис. 2);
- выявление наиболее эффективных веществ, принимающих участие в формировании ударно-воздушной волны с учетом бризантности и фугасности;
- расчетное обоснование веществ, формирующих минимальные значения давления при взрыве.

Для осуществления цели и решения поставленных для этого задач были использованы уравнение Д. И. Менделеева и та-

блица теплосодержания газов при постоянном давлении.

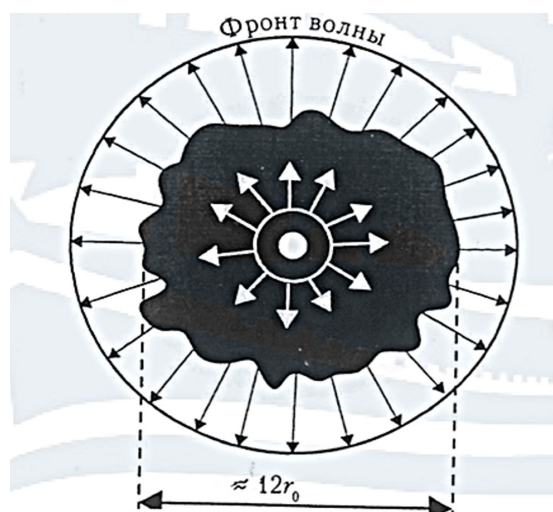


Рис. 2. План формирования ударной воздушной волны в воздухе [5]

Как известно, для эффективного пожаротушения оптимальным считается создание максимального давления при минимально возможном снижении температуры внешней среды [8; 9]. Данный баланс давления и температуры среды обуславливается необходимостью подавления горения посредством механического вытеснения

кислорода для тушения горения, а не только с помощью охлаждения среды. Максимальное давление позволяет ввести в очаг горения большее количество огнетушащего вещества (например, азота или аргона) за доли секунды, создаваемое при этом облако инертного газа предохранит очаг горения от повторного воспламенения, надолго сохраняя тушащий эффект.

Материалы и методы исследования

Одной из основных задач исследования, решение которой позволит реализовать его цель, является расчет значения давления взрыва 1 кг взрывчатого вещества [10]. Для этого будем исходить из закона сохранения энергии и уравнения состояния идеального газа, используя для расчетов три известных взрывчатых вещества: *тринитротолуол*, *пироксилин* и *гексоген*.

На основании метода Бринкли – Уилсона как итерационного термодинамического метода, позволяющего корректно рассчитать параметры детонации (давление, P , температуру, T , и показатель политропы, γ , который описывает закон изменения состояния газа при его расширении или сжатии), исходя из уравнения состояния продуктов взрыва.

Выбор метода Бринкли – Уилсона объясняется тем, что данный метод учитывает реальный состав газов при экстремальных температурах через константы химического равновесия.

Для 1 кг взрывчатого вещества расчет основывается на решении системы уравнений:

1. Уравнение сохранения энергии:

$$Q_{\text{det}} = \sum n_i \cdot [H_{f,i}^o(298) + \Delta H_i(T)], \quad (1)$$

где Q_{det} – теплота детонации, кДж; n_i – количество молей i -го вещества, моль; $H_{f,i}^o(298)$ – стандартная молярная энтальпия образова-

ния вещества, кДж/моль; $\Delta H_i(T)$ – энтальпия нагрева газа от 298 К до температуры взрыва, T , кДж/моль.

2. Уравнение состояния в форме Бринкли – Уилсона в удельных величинах для 1 кг вещества:

$$P = \frac{\rho_o \cdot R \cdot T}{M_{pg} \left(1 - \rho_o \frac{\alpha}{M_{pg}} \right)}, \quad (2)$$

где P – давление газа, Па; ρ_o – плотность заряда, кг/м³; α – коволюм, или собственный объем молекул газа, обычно принимаемый равным объему кристаллической решетки взрывчатого вещества; M_{pg} – средняя молекулярная масса продуктов.

3. Химическое равновесие

Для исследуемых веществ тринитротолуола, пироксилина и гексогена основными продуктами являются N_2 , H_2O , CO , CO_2 . Однако при давлении свыше 10 ГПа часть углерода выделяется в виде сажи. При этом необходимо определить такое значение температуры T , при котором сумма парциальных давлений всех компонентов будет соответствовать заданной плотности энергии.

В соответствии с вышеприведенным алгоритмом, на основании применения термодинамического метода Бринкли – Уилсона, учитывая, что плотность веществ $\rho = 1600$ кг/м³, а сами вещества:

- ТНТ (тринитротолуол) $C_7H_5N_3O_6$ – № 1;
- пироксилин $[C_6H_7O_2(ON_2)]_n$ – № 2;
- гексоген (RDX) $C_3H_6N_6O_6$ – № 3,

получены следующие результаты, представленные в таблице 1.

Как представляется, оптимальным взрывчатым веществом, которое может быть применимо для тушения пожара направленным взрывом, является гексоген (табл. 1), практически все параметры детонации которого превышают рассматриваемые в исследовании вещества № 1 и № 2.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров детонации с учетом справочных данных

Параметр	Тринитротолуол (вещество № 1)	Пироксилин* (вещество № 2)	Гексоген (вещество № 3)
Теплота детонации, удельная, Q_{det} , МДж/кг/молярная, Q_{det} , МДж/моль	~ 4,5/1,02	~ 3,7/1,1	~ 5,5/1,2
Давление, P , ГПа	~ 21,0	~ 18,5	~ 29,5
Температура, T , К	~ 3500	~ 3200	~ 3800
Показатель политропы, γ	~ 2,9	~ 2,8	~ 2,9
Скорость детонации, м/с	~ 6900	~ 7200	~ 8400

* Расчеты в таблице произведены для высокоазотного коллоксилина, поскольку эффективность пироксилина существенно зависит от его нитрации

Примечание: рассчитано авторами.

Собственно говоря, выбор указанного вещества обеспечивается не только и не столько наибольшим давлением, P , ГПа, создаваемым данным веществом в момент взрыва, сколько физическими свойствами формирующейся при этом ударно-воздушной волны. Так, наибольшее значение удельной теплоты детонации у гексогена определяет большой запас тепла на килограмм этого вещества, что обуславливает наибольшее сжатие воздуха во фронте первичной ударной волны. Давление, P , ГПа, создаваемое данным веществом и его продуктами детонации, намного выше: на 40,48% выше, чем у тринитротолуола, и на 59,46% выше, чем у пироксилина. Наконец, высокая скорость детонации гексогена обуславливает резкий градиент давления, что очень полезно использовать именно при «сбивании» пламени пожара, когда из-за крутизны ударной волны возникает резкий удар, вызывающий эффект тушения открытого горения [11]. Кроме прочего, как показало изучение литературных данных, при детонации гексогена выделяется меньше свободного углерода в виде сажевых частиц, при этом в окружающую среду выбрасывается больше таких газов, как двуокись углерода CO_2 , азот N_2 и водяной пар H_2O , что также соответствует принципу экологичности и эффективности применения исследуемого взрывчатого вещества.

В связи с этим применение гексогена в качестве основного вещества для тушения неконтролируемого горения показывает более высокую эффективность реакции. В то же время применение тринитротолуола или пироксилина демонстрирует противо-

положный результат, не являясь, очевидно, эффективным решением для реализации цели исследования.

Как представляется, метод направленного взрыва может быть эффективно применен при тушении ландшафтных пожаров, чаще всего возникающих на открытых участках местности, площадь которых может достигать тысяч гектаров. До 90% таких пожаров возникает в связи с деятельностью человека, и к моменту прибытия сил и средств пожаротушения огонь уже покрывает значительные площади. Так, для успешного использования гексогена, как оптимального взрывчатого вещества, его необходимо подготовить на некотором расстоянии от фронта пламени, в сторону которого распространяется огонь и направлен приземный ветер [12; 13]. Далее, после дистанционного срабатывания взрывчатки, происходят срыв пламени за счет нарастающего давления и подача огнетушащих веществ для охлаждения площади пожара.

Отсюда высокая мощность детонации обеспечивает его максимальную технико-экономическую эффективность за счет снижения требуемой массы заряда. В плане обеспечения экологической безопасности применение гексогена предпочтительнее за счет образования менее токсичных продуктов детонации, а также из-за отсутствия твердой дисперсной фазы (сажевых частиц), что, несомненно, минимизирует вторичное загрязнение приземного слоя воздуха в районах взрывных работ.

Расчеты параметров безопасности для людей и техники, особенно при тушении лесных пожаров, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчетов параметров безопасности для людей и техники при тушении пожаров направленным взрывом

Масса взрывчатого вещества, W , кг	Расстояние от центра взрыва, R , м	Максимальное давление во фронте ударной волны, ΔP , кПа	Отраженное давление, ΔP_r , кПа	Импульс фазы сжатия, I^+ , Па·с	Длительность положительной фазы, τ^+ , с
0,085	100	4,32	8,64	4-5	0,0026
0,085	200	2,16	4,32	10-12	0,0052
0,085	300	1,44	2,88	18-20	0,0078

Так, для расчетов максимального давления во фронте ударной волны (ΔP , кПа) была использована формула М. А. Садовского:

$$\Delta P = 95 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right) + 390 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^2 + 1300 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^3, \quad (3)$$

где W – масса заряда, кг (тротильный эквивалент), R – расстояние от центра взрыва, м.

Отраженное давление, ΔPr , κPa , вычислялось по формуле:

$$\Delta Pr \approx 2 \cdot \Delta P, \quad (4)$$

определяя величину давления преграды распространению ударной волны, в данном случае – лесной массив и пр. Импульс фазы сжатия, I^+ , $Pa \cdot c$, позволяющий оценить механическое действие волны, рассчитывался по формуле:

$$I^+ \approx \frac{2 \cdot R}{C_0} \cdot \Delta P, \quad (5)$$

где C_0 – скорость звука в воздухе, составляет около 340 км/с.

Время превышения значения давления во фронте ударной волны над величиной атмосферного давления или длительность положительной фазы, τ^+ , с, было оценено по формуле:

$$\tau^+ = \alpha \cdot \frac{\sqrt[3]{W}}{C_0}, \quad (6)$$

при этом эмпирический коэффициент α зависит и определяется величиной безразмерного коэффициента подобия Z , расчет которого производился по формуле:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (7)$$

где W – масса заряда в кг; R – расстояние от центра взрыва, м.

Скорость разлета оболочки заряда или скорость разлета фрагментов, V_0 , м/с, определялась по формуле:

$$V_0 = k \cdot D, \quad (8)$$

где V_0 – скорость разлета фрагментов, м/с; k – безразмерный эмпирический коэффициент, равный 0,02–0,05 для разных материалов; D – скорость детонации гексогена 8300–8400 м/с.

Для определения радиуса зоны сплошного поражения незащищенной живой силы, R , можно использовать формулу:

$$R = 150 \cdot \sqrt[3]{W}, \text{ или } R = 200 \cdot \sqrt[3]{W}, \quad (9),$$

указанный расчет позволяет оценить масштаб разлета обычных стальных осколков или высокоэффективных сферических поражающих элементов. Результаты расчетов скорости разлета фрагментов и величины радиуса опасной зоны сплошного поражения живой силы сведены в таблицу 3.

Исходя из данных таблицы 3, можно видеть, что летальная угроза ограничена радиусом зоны 66–88 м, исследуемые нами дистанции в соответствии с нормативными документами (РД 03-409-01) 100, 200 или 300 м находятся за пределами зоны гарантированного поражения. При этом важно отметить, что на расстоянии 100 м находиться без капитальной преграды людям небезопасно из-за риска прямого попадания первичных крупных осколков.

Оценка воздействия максимального давления во фронте ударной волны взрыва на окружающую среду показана в таблице 4.

С точки зрения отсутствия баротравм у людей и серьезных динамических ударов по технике безопасным расстоянием можно считать диапазон от 45 до 60 метров. На этой дистанции давление гарантированно опустится ниже 10 кПа. Однако стоит учитывать, что осколочная зона разлета оболочки для такого заряда (рассчитанная по формулам Г. И. Покровского) составляет около 66–88 метров. Таким образом, истинная «полностью безопасная зона», где нет ни опасного давления, ни летящих со скоростью 200–300 м/с фрагментов металла, начинается со 100 метров и далее.

Действие взрыва, как представляется, можно усилить в определенном направлении с помощью кумулятивного действия [14] Это достигается путем применения заряда с выемкой, обращенной в сторону объекта тушения [15].

Таблица 3

Результаты расчетов скорости разлета фрагментов и величины радиуса опасной зоны сплошного поражения живой силы

Эмпирический коэффициент, k	Скорость детонации гексогена, D , м/с	Скорость разлета фрагментов, V_0 , м/с	Масса заряда, W , кг	Радиус зоны сплошного поражения R , м	
				150	200
0,02-005	8400	168-420	0,085	66	88
0,035	8400	294			

Таблица 4

Уровни максимального давления во фронте ударной волны взрыва
и эффекты воздействия на объекты окружающей среды

Максимальное давление во фронте ударной волны, ΔP , кПа	Эффекты воздействия на объекты окружающей среды				
	Население	Легкие автомобили	Тяжелая техника	Хвоя, листва деревьев	Стволы деревьев
3-5				срывается полностью, «ошкуривание»	
10-15	потеря равновесия		выход из строя стекол и зеркал		тонкий сухостой ломается
20-30	травмы от ударов о поверхность	опрокидывание, повреждение кузова			
35 и более	баротравмы				
50			повреждение ходовой части		

Валидация полученных результатов проведенных исследований проводилась с помощью классического метода инженерных оценок: на основе сопоставления с литературными справочными данными (сравнение с аналитикой справочников М. А. Садовского) [15; 16], а также посредством изучения результатов аналитических расчетов первого приближения. Достаточно близкая сходимость теоретических расчетных значений и известных справочных параметров, установленных экспериментальным путем, позволяет сделать вывод о принципиальной возможности проведения дальнейших практических исследований для уточнения расчетных значений количества взрывчатого вещества и его параметров в плане их использования для ряда хозяйственных задач, в том числе для тушения пожаров.

Заключение

Сравнение рассчитанных значений давления взрыва позволило сделать вывод, что, по предварительным данным, наиболее подходящим веществом для применения метода тушения неконтролируемых очагов горения направленным взрывом является гексоген, однако его практическая применимость требует экспериментальной проверки. Как показали предварительные результаты расчетов, взрывы, обусловленные применением порядка 85 граммов гексогена, создают максимальное значение давления, равное 1,44–4,32 кПа, что соответствует наименее опасному уровню для окружающей среды, позволяющему минимизировать ущерб

от взрывных процессов, сохранив качество среды, не потеряв при этом необходимой мощности ударной волны для срыва пламени при тушении пожаров.

Список литературы

1. Баланюк В. М. Повышение эффективности газового пожаротушения ударной волной // *Bezpieczenstwo i technika pozarnicza*. 2016. Т. 43. № 3. С. 81–94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29038450> (дата обращения: 10.06.2026). DOI: 10.12845/bitp.43.3.2016.8.
2. Баланюк В. М. Тушение диффузионного пламени н-гептана ударной волной // *Bezpieczenstwo i technika pozarnicza*. 2016. Т. 42. № 2. С. 103–111. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29038221> (дата обращения: 10.06.2026). DOI: 10.12845/bitp.42.2.2016.10.
3. Гришин А. М., Зима В. П., Касымов Д. П. Применение взрывчатых веществ в устройствах локализации и тушения природных пожаров // *Пожаровзрывобезопасность* 2015. Т. 24. № 7. С. 52–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23803788> (дата обращения: 10.06.2026). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.07.52-60.
4. Курносов В. В., Андреева Е. С. Возможность тушения неконтролируемого горения с помощью метода направленного взрыва // *Обеспечение безопасности: производственной, пожарной, экологической* 2025. С. 119–120. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=89067715> (дата обращения: 10.06.2026).
5. Лоцилов А. А., Ильичева М. Н., Иконников В. В., Шаулов Д. А., Орлов Ю. Ф., Зенькович А. В. Математическое моделирование тушения лесного пожара при помощи направленного взрыва // *Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева* 2018. № 4 (123). С. 33–40. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36654600> (дата обращения: 10.06.2026). DOI: 10.46960/1816-210X_2018_4_33.
6. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения / Справочник: в 2-х ч. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 2. М.: Пожнаука, 2004. 774 с. EDN: UIAYCP.
7. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е. 2004. Т. 2. 656 С. М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература». URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26062863> (дата обращения: 10.06.2026).

8. Гринько О. И., Шапиро В. Я., Григорьева О. И. Григорьев М. Ф., Степанова Д. И. Григорьева А. И. Инновационный способ остановки верховых лесных пожаров // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 56. С. 15-18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42819657> (дата обращения: 10.06.2026).
9. Касторных А. В., Кузовлев А. В. Инновационные способы тушения газовых фонтанов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 320-322. EDN: YQIGGD.
10. Голованов А. Н., Фатеев В. Н. Экспериментальное исследование процессов усиления ударных волн // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4 (16). С. 96-100. URL: https://www.mathnet.ru/rus/vtgu/y2011/i4/p96https://www.mathnet.ru/php/archive.php?show=paper&jrnid=vtgu&paperid=227&option_lang=rus (дата обращения: 10.06.2026).
11. Андреева Е. С., Сергеева Г. А., Богданова И. В. Уточнение модели низового лесного пожара с учетом конвективной турбулентности // Безопасность техногенных и природных систем. 2025. Т. 9(1). С. 14-21. DOI: 10.23947/2541-9129-2025-9-1-14-21.
12. Ватутин Н. М., Заборовский А. Д., Завьялов В. С., Колтунов В. В., Кияткин Д. В. Новые направления в области изучения ближней зоны взрыва посредством баллистического маятника // Известия Российской академии ракетной и артиллерийских наук. 2019. № 4. С. 106-114. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41469446> (дата обращения: 10.06.2026).
13. ГОСТ 22.0.06-97/ГОСТ Р 22.0.06-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники природных чрезвычайных ситуаций. Поражающие факторы. Номенклатура параметров поражающих воздействий. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/552366066> (дата обращения: 10.06.2026).
14. СП 88.13330.2014. Свод правил. Защитные сооружения гражданской обороны: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 18 февраля 2014 г. № 59/пр; введен в действие 01.06.2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200111826> (дата обращения: 10.07.2026).
15. РБ Г-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия: утв. постановлением Госатомнадзора России от 31 декабря 1996 г. № 100. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200061429> (дата обращения: 11.07.2026).
16. Гельфанд Б. Е., Сильников М. В. Фугасные эффекты взрывов. СПб.: Полигон, 2002. 266 с. ISBN 5-89173-221-1.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.