

**УДК 614.8**

*Ю.А. Скоб, канд. техн. наук, доцент, НАКУ «ХАИ»,  
К.В. Корытченко, канд. техн. наук, с.н.с., НТУ «ХПИ»,  
М.Л. Угрюмов, д-тор техн. наук, профессор, НАКУ «ХАИ»,  
С.А. Вамболь, канд. техн. наук, доцент, УГЗУ*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ОБЪЁМНОГО ШЛАНГОВОГО  
ЗАРЯДА НА ЛЕСНОЙ ФИТОЦЕНОЗ И РАСТИТЕЛЬНЫЙ  
ПОКРОВ**

(представлено д-ром техн. наук В.М. Комяк)

Представлены результаты трехмерного математического моделирования ударного действия взрыва объёмного шлангового заряда, расположенного в лесном фитоценозе и на травяном покрове.

**Ключевые слова:** минерализованная полоса, объёмный взрыв.

**Постановка проблемы.** Одним из способов локализации лесных пожаров является создание минерализованных полос с помощью взрыва. Данный способ относительно прост в применении, имеет малую стоимость и высокую эффективность. Его целесообразно использовать в случае большого удаления очага пожара от источников воды, на труднодоступных для техники участках местности и каменистых грунтах. Вместе с тем, этот способ обладает недостатками, которые приводят к ограничению его широкого применения. В первую очередь, высокий риск вызывает применение взрывчатых веществ. Использование в качестве источника взрыва конденсированных взрывчатых веществ, как правило, приводит к загрязнению окружающей среды.

Наличие преимуществ во взрывном способе создания минерализованных полос с помощью топливовоздушных зарядов послужило причиной его использования в технике локализации лесных пожаров, рассматриваемой в данной работе. Учитывая, что с возрастанием ширины минерализованной полосы происходит возрастание её эффективности, требуется решить задачу об оптимальном распределении зарядов для создания сплошных широких полос.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Способ локализации лесных пожаров созданием минерализованных полос с помощью взрыва рассматривался в работах [1, 2]. Часть недостатков данного способа устраняется применением зарядов объёмного взрыва. Так, давление во фронте детонационной волны в топливовоздушных смесях на порядки меньше давления, возникающего в конденсированных взрывчатых веществах. В результате, вероятность выворачивания деревьев или обрыва крупных веток резко снижается. Ис-

пользование углеводородных топлив минимизирует воздействие на экологическую систему. Кроме того, при одинаковой энергии взрыва, импульс давления, создаваемый зарядом объёмного взрыва, превосходит импульс от взрыва конденсированных веществ [3]. То есть, коэффициент полезного действия по созданию противопожарной преграды в зарядах объёмного взрыва возрастает.

Вместе тем, остается множество вопросов, связанных с практической реализацией данного способа. Предложенный Гришиным А.М. и др. вариант формирования топливовоздушной смеси с помощью разрывного заряда, первоначально примененный в боеприпасах объёмного взрыва, не снижает риски во время эксплуатации таких зарядов. В случае взрывного распыления топлива основная масса детонационно-способной смеси распределяется по периферии облака, что приводит к снижению ударного действия с соответствующим повышением расхода топлива.

**Постановка задачи и ее решение.** Увеличение диаметра оболочки шлангового заряда приводит к возрастанию ширины минерализованной полосы. Но при этом увеличиваются материальные затраты, связанные с ростом расхода топлива и массы материала оболочки на создание заряда. Также происходит уменьшение производительности инженерной техники в связи с ограниченной скоростью наполнения оболочки шлангового заряда. Таким образом, возникает задача оптимизации размеров заряда, которая может быть решена путем математического моделирования.

Трёхмерное математическое моделирование проводилось с использованием нестационарных уравнений газовой динамики для сжимаемого газа в декартовой системе координат. Система газодинамических уравнений дополнялась уравнением изменения концентрации компонентов смеси и уравнением состояния. Процесс диффузии учитывался в соответствии с законом Фика. Для учета влияния лесного фитоценоза и растительного покрова на распространение ударной волны использовался подход А.М. Гришина. Учитывалось влияние силы тяжести. Полная система уравнений имела вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial pu}{\partial x} + \frac{\partial pv}{\partial y} + \frac{\partial pw}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial pu}{\partial t} + \frac{\partial (P + pu^2)}{\partial x} + \frac{\partial puv}{\partial y} + \frac{\partial puw}{\partial z} = -k \cdot p \cdot u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial pv}{\partial t} + \frac{\partial pvu}{\partial x} + \frac{\partial (P + pv^2)}{\partial y} + \frac{\partial pvw}{\partial z} = -k \cdot p \cdot v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial pw}{\partial t} + \frac{\partial pwu}{\partial x} + \frac{\partial pwv}{\partial y} + \frac{\partial (P + pw^2)}{\partial z} = -k \cdot p \cdot w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial(E + P)u}{\partial x} + \frac{\partial(E + P)v}{\partial y} + \frac{\partial(E + P)w}{\partial z} = -gv, \quad (5)$$

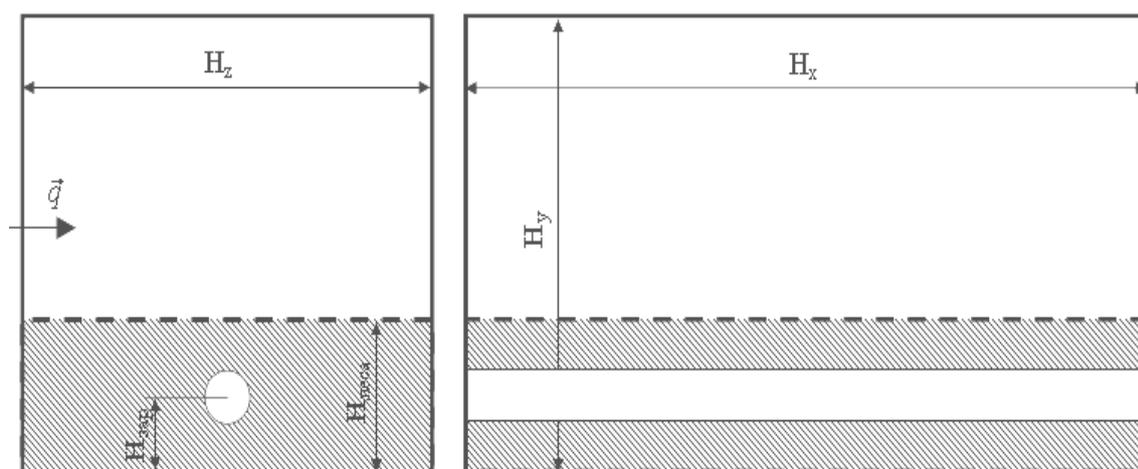
$$\frac{\partial(pQ)}{\partial t} + \frac{\partial(puQ)}{\partial x} + \frac{\partial(pvQ)}{\partial y} + \frac{\partial(pwQ)}{\partial z} = \text{div}(p \cdot v_D \cdot \text{grad}Q), \quad (6)$$

$$e = \frac{P}{(\gamma - 1)p}, \quad (7)$$

где  $t$  – время;  $u, v, w$  – проекции вектора скорости на оси;  $P, \rho$  – давление и плотность;  $E$  – полная энергия единицы объёма смеси;  $g$  – ускорение свободного падения,  $Q$  – относительная массовая плотность примеси;  $v_D$  – коэффициент диффузии,  $e$  – внутренняя энергия единицы массы газа;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $k$  – коэффициент сопротивления среды.

Теплофизические свойства компонентов смеси рассчитывались путем усреднения.

При моделировании взрыва объёмного шлангового заряда в пологе леса, ось заряда в расчетной области располагалась на середине высоты леса  $H_{\text{зар}} = \frac{1}{2} \cdot H_{\text{леса}}$ , которая равнялась  $H_{\text{леса}} = 3$  м (рис. 1).



**Рис. 1.** – Схема задания начальных условий взрыва объёмного шлангового заряда в пологе леса

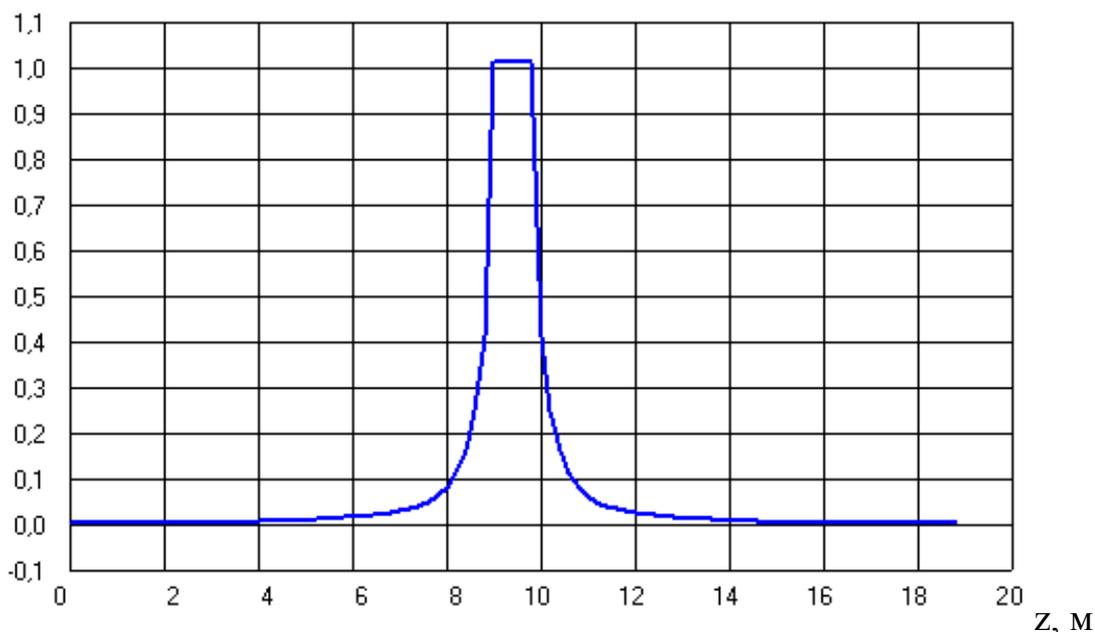
Диаметр заряда был принят равным  $d = 0,9$  м. Размеры расчетной области составляли  $H_x = 5$  м,  $H_y = 9$  м,  $H_z = 19$  м, которые разбивались на 25, 45 и 95 секущих плоскостей, соответственно. Полагалось, что фитоценоз образован сосновым молодняком (представлен заштрихованной областью на рис. 1), где коэффициент сопротивления среды равняется  $k = 0,7$ . При расчете распространения ударной волны в воздухе данный коэффициент приравнивался нулю. Динамика расширения продуктов детонации рассматривалась применительно к физическому взрыву. Принято, что в начальный момент времени в оболочке заряда расположены продукты детонации смеси пропана

с воздухом с параметрами:  $P_d \approx 11 \cdot 10^5$  Па,  $T_d = 2842$  К,  $\gamma_d = 1,278$ ,  $\rho_d = 1,32$  кг/м<sup>3</sup> и средней молярной массой  $M_n = 28,36 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. В начальный момент времени во всех «газообразных» ячейках расчетной области приняты параметры окружающей среды, которые соответствовали воздуху с параметрами:  $T_c = 293$  К,  $P_c = 101325$  Па,  $\gamma_c = 1,4$ . Скорость набегающего потока ветра равнялась  $\bar{q} = 3$  м/с. Земная поверхность в расчетах представлялась в виде непроницаемых участков, ограничивающих расчетную область поверхностями. На этих поверхностях выполнялось условие непротекания.

Система уравнений (1)-(7) решалась методом сквозного счета по схеме Годунова С.К. первого порядка точности. Устойчивость схемы обеспечена за счет выбора величины шага по времени в соответствии с условием Куранта.

В результате расчетов получено, что дальность взрывной волны объемного шлангового заряда диаметром 0,9 м при заданных внешних условиях достигает около 2,5 м и 5 м для критических перепадов давления, равных  $1,2 \cdot 10^5$  Па и  $0,4 \cdot 10^5$  Па, соответственно (рис. 2). Под критическим перепадом давления понимается давление, в случае превышения которого обеспечивается сдувание тонких хвоинок и веточек. Следует учесть, что во фронте ударной волны скачек давления в два раза превышает расчетные. Полученный результат показывает, что при данном диаметре заряда обеспечится создание минерализованной полосы шириной от 5 м до 10 м в молодом сосновом лесе высотой 3 м.

$P$ , МПа



**Рис. 2.** – Кривая максимумов избытка давления в поперечном сечении заряда, возникающего при взрыве шлангового заряда диаметром 0,9 м

Математическое моделирование ударного воздействия на растительный покров проведено в соответствии со схемой (рис. 3), в которой применялось два параллельно расположенных шланговых заряда (поз. 1). Полагалось, что средняя высота растительного покрова (поз. 2) составляет  $h = 0,15$  м. В расчетных ячейках, моделирующих сопротивление данного слоя, коэффициент сопротивления принят равным  $k = 0,9$ . В проведенной серии расчетов изменялось расстояние между оболочками их диаметр.

В результате численного моделирования получено, что на растительный покров заданных параметров воздействует ударная волна с избытком давления за её фронтом более  $1,2 \cdot 10^5$  Па на ширине около 8 м.

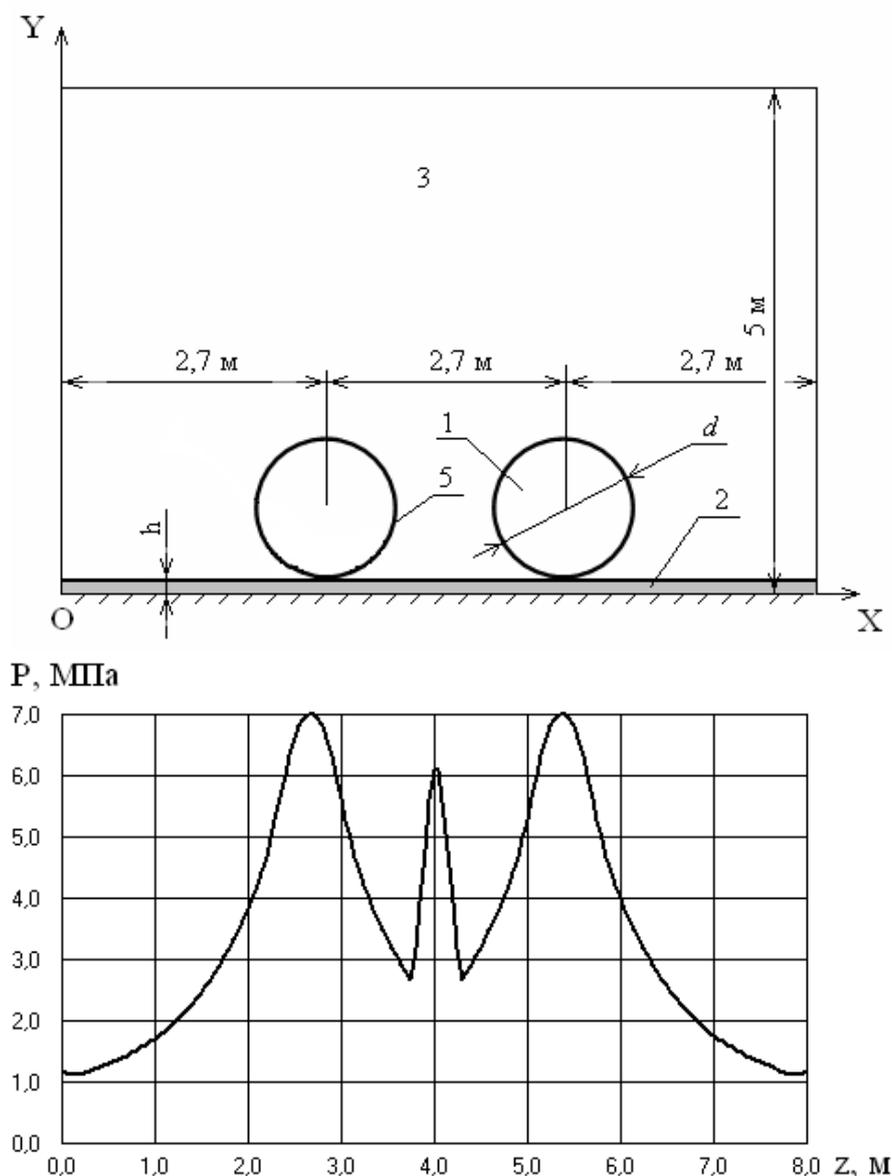


Рис. 3. – Схема задания начальных условий взрыва объёмных шланговых зарядов на растительном покрове

Увеличение дальности ударной волны в данном случае обеспечивается процессом отражения волн от земной поверхности и встречным взаимодействием ударных волн от взрыва двух зарядов (рис. 4).



Рис. 4. – Поле давления в поперечном сечении 2-х шланговых зарядов на момент времени 0,0025 с от начала взрыва

Так как при взрыве двух зарядов необходимо добиться не только срыва растительного покрова, но и его выброс за область формируемой минерализованной полосы, то расстояние между зарядами должно быть таким, чтобы в результате взаимодействия разлетающихся продуктов взрыва произошло перестроение динамики разлета в полусферический взрыв одного заряда. Например, при диаметре двух зарядов  $d = 0,9$  м данное условие достигается, если расстояние между их осями не превышает 2,7 м.

Следует учитывать, что применяемая математическая модель позволяет рассчитать ударное действие взрыва шлангового заряда исходя из энергии взрыва заряда. Это позволяет оптимизировать размер зарядов в диаметре и расстояние между зарядами. Но может иметь место случай, когда в рассчитанном диаметре объёмного шлангового заряда не может распространяться самоподдерживающаяся детонация. В этом случае диаметр заряда задается исходя из размеров критического диаметра (табл. 1).

Таблица 1. – Критический диаметр заряда различных топлив в стехиометрической смеси с воздухом

Топливо	Размер детонационной ячейки $\lambda$ , мм	Критический диаметр $D_{кр}$ , м
H <sub>2</sub>	15,9±2	0,32
CH <sub>4</sub>	500±80	10
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	13,6±1,6	0,27
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	39±6	0,78
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	88±14	1,76
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	72±12	1,44
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	85	1,7

**Выводы.** В данной работе рассмотрен способ локализации лесных пожаров созданием минерализованных полос с помощью объемного взрыва. На основе численного моделирования решена задача оптимизации диаметра шланговых зарядов в зависимости от требуемой энергии на 1 погонный метр заряда и условия распространения самоподдерживающейся детонации в неограниченном объеме.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рева Г.В. Метод розрахунку циліндричних відбивачів вибухових хвиль для гасіння лісових пожеж: Автореф. дис. ... канд. техн. Наук. – Донецьк, 2000. – 18с.

2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – М.: Наука, 1992. – 408с.

3. Нетлетон М. Детонация в газах: [монография] / Нетлетон М.; пер. с англ. – М.: «Мир», 1989. – 278 с.

nuczu.edu.ua

Ю.А. Скоб, К.В. Коритченко, М.Л. Угрюмов, С.О. Вамболь

**Математичне моделювання дії вибуху об'ємного шлангового заряду на лісний фітоценоз та рослинний покров.**

Представлені результати тримірної математичної моделювання ударної дії вибуху об'ємного шлангового заряду, розташованого у лісному фітоценозі та на рослинний покрові.

**Ключові слова:** мінералізована полоса, об'ємний вибух.

Yu.O. Skob, K.V. Korytchenko, M.L. Ugryumov, S.O. Vambol

**Mathematical design of influence of explosion of by volume hose charge on forest fytotsenoz and vegetable cover.**

The results of three-dimensional mathematical design of shock action of explosion of the by volume hose charge located in forest fytotsenoz and on soil-covering are represented.

**Key terms:** mineralizing cover, volume hose charge.