

УДК 614.8

С.В. Говаленков,<sup>1</sup> Д.П. Дубинин<sup>2</sup>, Р.В. Корниенко<sup>2</sup>, К.В. Корытченко<sup>3</sup><sup>1</sup> *Університет громадянської захисту України, Харків*<sup>2</sup> *Научно-дослідницький відділ №1, УкрНІИПБ МЧС України, Харків*<sup>3</sup> *Національний технічний університет "ХПИ", Харків*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ОБЪЕМНО-ШЛАНГОВОГО ЗАРЯДА В ПОЛОГЕ ЛЕСА

*Проведен расчет параметров взрыва объемно-шлангового заряда в пологе леса с использованием пакета прикладных программ FIRE. Математическое моделирование взрыва объемно-шлангового заряда позволяет определить характер протекания взрыва при заданных параметрах за различный промежуток времени и ширину противопожарного барьера в зависимости от избыточного давления взрыва и диаметра заряда*

**Ключевые слова:** *противопожарный барьер, минерализованная полоса, математическое моделирование, объемно-шланговый заряд.*

### Введение

По площади лесов и запасам древесины Украина является так называемым государством с дефицитом лесных ресурсов. Леса занимают около 15,7 процента территории страны (9,58 миллионов гектаров) и расположенные в основном на севере (Полесье) и западе (Карпаты). Оптимальным, согласно европейскими рекомендациям, является показатель лесистости 20 процентов, для достижения которого необходимо наличие более 2 миллионов гектаров новых лесов. Общая площадь покрытой лесной растительностью земли увеличилась с 1961 года с 7,1 до 9,5 миллионов гектаров (на 33,8 процента) [1].

Статистические данные за последние годы свидетельствуют об увеличении количества как лесных, так и степных пожаров, которые, в свою очередь, приводят к катастрофическим последствиям. Ежегодно на планете возникает до 400 тысяч лесных пожаров, которые уничтожают около 0,5% общей площади лесов. В результате пожаров погибают представители флоры и фауны, снижается плодородие земли, ухудшается состояние окружающей среды. Кроме того, пожары способствуют увеличению содержания углекислого газа в атмосфере, которое способствует глобальному потеплению климата во всем мире.

В силу просторности территорий, покрытых лесом, и недостатка средств на ликвидацию загораний проблема борьбы с пожарами стоит особенно остро. В пожароопасный сезон на территории страны ежедневно возникает значительное количество лесных пожаров.

Трудности, связанные с доставкой к удаленным, а часто и к труднодоступным местам пожара сил и средств для тушения пожаров, требуют использования научно-обоснованных рекомендаций по организации оперативно-тактических мероприятий. Последние в своей основе должны базироваться на закономерности возникновения и развития лесного

пожара, а также учитывать особенность использования сил и средств тушения пожаров. Наиболее эффективным инструментом выявления данной закономерности является математическое моделирование.

### Основная часть

Расчет параметров взрыва объемно-шлангового заряда в пологе леса произведен с использованием пакета прикладных программ FIRE [3] с корректировкой на сопротивление лесного массива. В данной программе используется алгоритм численного решения основных уравнений на базе законов сохранения с использованием схемы распада произвольного разрыва. Расчетной областью  $\Omega$  является параллелепипед с прямолинейными образующими, расположенный в правой декартовой системе координат  $(X, Y, Z)$  с основанием в плоскости  $XOZ$  (ось  $Y$  ориентирована в направлении, противоположном действию сил тяжести Земли).

Векторное уравнение (1) является следствием законов сохранения массы, импульса и энергии, которые могут быть представлены в интегральной форме для каждой расчетной ячейки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \bar{a} dV + \iint_{\sigma} B d\bar{\sigma} = \iiint_V \rho \bar{f} dV, \quad (1)$$

где  $V$  – объем элементарной расчетной ячейки;  $\bar{\sigma}$  – ограничивающая поверхность данной ячейки, которая имеет внешнюю нормаль  $\bar{n}$  ( $\bar{\sigma} = \sigma \bar{n}$ );  $B$  – тензор плотности потока консервативных переменных  $\bar{a}$ , столбцами которого являются векторы  $\bar{b}, \bar{n}$  и  $\bar{d}$ , соответственно.

Закон переноса компоненты смеси с учетом скорости диффузии имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho Q)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Q)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Q)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w Q)}{\partial z} = \rho Q_t, \quad (2)$$

где  $Q$  – относительная массовая плотность примеси (отношение плотности газообразного вещества при-

меси к плотности смеси);  $\rho_{Qt}$  – интенсивность изменения плотности примеси вследствие диффузии (в соответствии с законом Фика –  $\rho_{Qt} = \text{div}(\rho \mathfrak{D} \text{grad} Q)$ ; коэффициент диффузии  $\mathfrak{D}$  определялся по методике, предложенной М.Е. Берляндом.

Уравнение (2) может быть также представлено в интегральной форме для каждой расчетной ячейки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho Q dV + \iint_{\sigma} \rho Q \vec{q} d\vec{\sigma} = \iiint_V \rho Q_t dV. \quad (3)$$

Уравнения (1, 3) допускают возникновение и существование поверхностей разрыва двух видов: ударных волн и тангенциальных разрывов. Функции, удовлетворяющие уравнениям (1, 3), можно рассматривать в качестве обобщенных решений уравнений газовой динамики. Использование интегральных законов сохранения в качестве исходных для построения разностных уравнений обеспечивает построение разрывных решений без выделения разрывов. Расчетная область разбивалась тремя семействами поверхностей на конечное число пространственных ячеек. Размеры граней были подобраны в соответствии с характерным размером особенностей расчетной области. В частности, чтобы вписать в окружность диаметром 1 м не менее 12 ячеек, имеющих в поперечном разрезе цилиндра квадратное сечение, размер ячеек в данных направлениях не превышал 20 см.

В численном алгоритме положение любой ячейки определялось набором индексов  $i, j, k$  ( $i = 0 \dots L; j = 0 \dots M; k = 0 \dots N$ ). В результате, в данной системе каждая грань ячейки может быть определена через сетку тройки чисел, выраженную одним целым и двумя полуцелыми числами, а номер элементарного объема выражается через тройку полуцелых чисел ( $i - 1/2, j - 1/2, k - 1/2$ ). Параметры смеси газов для фиксированного времени  $t^n$  внутри каждой ячейки считаются постоянными, осредненными по её объёму и изменяющимися при переходе от одной ячейки к другой. В основу вычисления поверхностных интегралов взято положение, что газодинамические величины, вызывающие потоки через грани ячеек, не изменяются в течение рассматриваемого интервала времени  $\tau$ , а алгоритм расчета потоков импульса, массы и энергии через грани ячеек разностной сетки строится на основании решения задачи о распаде произвольного разрыва [2].

Совокупность газодинамических параметров во всех ячейках в момент времени  $t^n$  представляет собой известное решение на временном слое с индексом  $n$ . Параметры в момент времени  $t^{n+1} = t^n + \tau$  (на слое  $n + 1$ ) рассчитывались посредством применения явных разностных аппроксимаций для соотношений в рамках интегро-интерполяционного метода С.К. Годунова [2]. В соответствии с данным методом, решение находится по следующей схеме:

$$\bar{a}_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}^{n+1} = \bar{a}_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}^n - \tau \left[ (\hat{A}\bar{\sigma})_{i-1, j-1/2, k-1/2} + (\hat{A}\bar{\sigma})_{i, j-1/2, k-1/2} + \right.$$

$$\left. + (\hat{A}\bar{\sigma})_{i-1/2, j-1, k-1/2} + (\hat{A}\bar{\sigma})_{i-1/2, j, k-1/2} + (\hat{A}\bar{\sigma})_{i-1/2, j-1/2, k-1} + (\hat{A}\bar{\sigma})_{i-1/2, j-1/2, k} \right] / \left[ V_{i-1/2, j-1/2, k-1/2} + \tau(\rho \bar{f})_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}; \right. \\ \left. (\rho Q)_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}^{n+1} = (\rho Q)_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}^n - \tau \left[ (\rho Q \bar{q} \bar{\sigma})_{i-1, j-1/2, k-1/2} + (\rho Q \bar{q} \bar{\sigma})_{i, j-1/2, k-1/2} + (\rho Q \bar{q} \bar{\sigma})_{i-1/2, j-1, k-1/2} + (\rho Q \bar{q} \bar{\sigma})_{i-1/2, j, k-1/2} + (\rho Q \bar{q} \bar{\sigma})_{i-1/2, j-1/2, k-1} + (\rho Q \bar{q} \bar{\sigma})_{i-1/2, j-1/2, k} \right] / \right. \\ \left. V_{i-1/2, j-1/2, k-1/2} + \tau(\rho Q_t)_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}; \right. \quad (4)$$

где  $(\hat{A}\bar{\sigma})_{l,m} = (\hat{A}_{1,l}\alpha_m + \hat{A}_{1,2}\beta_m + \hat{A}_{1,3}\varepsilon_m)\sigma_m, \quad 1=1\dots 5;$

$\hat{A}_{1,i}$  – компоненты тензора  $\hat{A}$  вида, столбцами которого являются векторы  $\vec{a}, \vec{n}, \vec{d}$  системы уравнений (6):

$$\frac{\partial \vec{a}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{b}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{c}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{d}}{\partial z} = \rho \vec{f}; \quad (6)$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \rho u & \rho v & \rho w \\ P + \rho u^2 & \rho uv & \rho wu \\ \rho uv & P + \rho v^2 & \rho vw \\ \rho uw & \rho vw & P + \rho w^2 \\ (E + P)u & (E + P)v & (E + P)w \end{bmatrix};$$

$\bar{\sigma}_m = \sigma_m \vec{n}; \quad \vec{n} = (\alpha, \beta, \varepsilon)$  – вектор единичной нормали к боковой грани  $\sigma_m$ ;  $m$  – тройка чисел, определяющая боковую грань  $m$  ячейки с номером  $(i - 1/2, j - 1/2, k - 1/2)$ .

Выражения для потоков векторов и тензоров через боковые грани элементарного объема принято называть “большими” величинами, в отличие от “малых” величин – кусочно-постоянных значений газодинамических параметров в ячейках [2]. Таким образом, в соответствии с уравнениями (5), (6) для определения малых величин  $(\bar{a}, Q)^{n+1}$  в момент времени  $t^{n+1}$  для ячейки с номером  $(i-1/2, j-1/2, k-1/2)$  необходимо знать малые величины  $(\bar{a}, Q)^n$  в момент времени  $t^n$  в этой же ячейке и большие величины этих параметров на боковых гранях рассматриваемой ячейки.

Площади граней элементарных объемов находились по следующим формулам. Учитывая, что порядок аппроксимации разностной схемы не выше первого [3], определяем площади граней с точностью до величины второго порядка малости относительно длин шагов разностного разбиения:

$$\sigma_x = \frac{(h'_y + h''_y)h_z}{2\varepsilon_x}, \quad \sigma_y = \frac{(h'_z + h''_z)(h'_x + h''_x)}{4\beta_y}, \\ \sigma_z = \frac{(h'_y + h''_y)h_x}{2\alpha_z}, \quad (7)$$

где  $h_x, h_y, h_z$  – шаги разностной сетки в направлении координатных осей  $X, Y, Z$ .

Один штрих и два штриха, соответственно, обозначают меньший и больший номера ребер, ограничивающих боковую грань.

Объем ячейки можно представить в виде

$$V = \sigma_y \beta_y \langle h_y \rangle, \quad (8)$$

где  $\langle h_y \rangle$  – средний для ячейки шаг в направлении  $y$ .

Нижние индексы в формулах (7), (8) определяют принадлежность используемых параметров к поверхностям, нормали к которым ориентированы в направлении соответствующих осей выбранной системы координат. При этом границы ячейки представляют собой неустойчивые поверхности произвольного разрыва, которые распадаются на устойчивые волновые элементы: ударную волну, контактную поверхность и волну разрежения. Для каждого такого разрыва определяются потоки массы, импульса, энергии через грани газовых ячеек.

Устойчивость конечно-разностной схемы обеспечивается за счет выбора величины шага по времени:

$$\tau \leq \frac{\tau_x \tau_y \tau_z}{\tau_x \tau_y + \tau_y \tau_z + \tau_x \tau_z}, \quad (9)$$

где  $\tau_x, \tau_y, \tau_z$  – временные интервалы, за которые волны, образовавшиеся в задаче о распаде разрыва, достигают противоположных граней ячейки по осям  $X, Y, Z$ . В соответствии с формулой (9) для каждой ячейки использовалось минимальное по ячейкам расчетной области значение временного шага.

В результате численного моделирования была получена трехмерная динамика изменения термодинамических параметров в процессе взрыва одного цилиндрически объемно-шлангового заряда и одновременно двух объемно-шланговых зарядов в пологе леса. Теплофизические свойства компонентов смеси рассчитывались путем усреднения. При моделировании взрыва объемного шлангового заряда в пологе леса, ось заряда в расчетной области располагалась на середине высоты леса  $H_{зар} = 0,5 \cdot H_{леса}$ , которая принята  $H_{леса} = 3$  м (рис. 1). Диаметр заряда 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, для которого коэффициент сопротивления среды  $k$  составляет 0,7 (представлен заштрихованной областью на рис. 1).

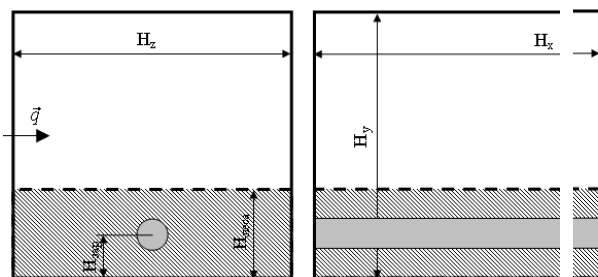


Рис. 1. Схема задания начальных условий взрыва объемно-шлангового заряда в пологе леса

Результаты моделирования распределения давления, температуры продуктов детонации в поперечном сечении к оси объемно-шлангового заряда приведены на различные моменты времени (рис. 2 – 7). Давление газов в центре взрыва стремительно уменьшается за несколько миллисекунд. Так, к моменту времени, равному 0,5 мс, давление в эпицентре взрыва падает до 6,8 атм, а к моменту времени, равному 1,5 мс, давление уменьшается до 3,76 атм.



Рис. 2. Поле давления, формируемое на момент 0,0005 с от начала разлета продуктов детонации

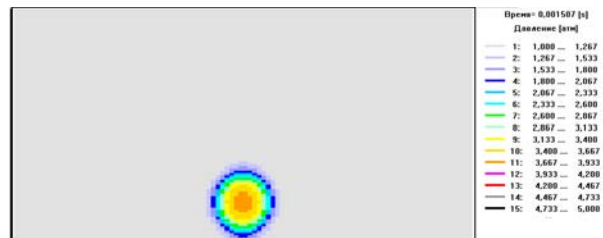


Рис. 3. Поле давления, формируемое на момент 0,0015 с от начала разлета продуктов детонации

Симметричность распределения термодинамических параметров в поперечном сечении от условной оси, когда ударная волна является достаточно интенсивной, подтверждает экспериментальный результат, полученный в работе [4], о практическом отсутствии влияния ветра на процесс взаимодействия ударной волны с лесным фитоценозом.

Уменьшение температуры газа в эпицентре взрыва происходит более медленно. Так, к моменту времени, равному 0,5 мс, температура в эпицентре взрыва составляет 2457 °С, а к моменту времени, равному 1,5 мс, температура падает до 2218 °С (рис. 4).

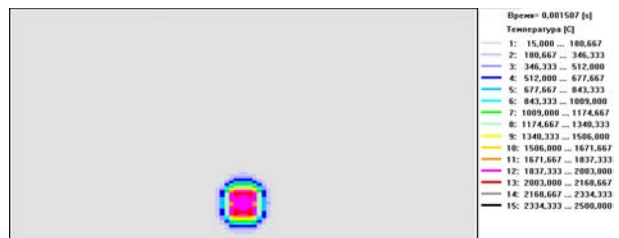


Рис. 4. Поле температуры, формируемое на момент 0,0015 с от начала разлета продуктов детонации

Анализ результатов, приведенных на рис. 5, позволяет сделать вывод, что к моменту времени, равному около 3,5 мс от начала расширения продуктов взрыва, происходит взаимодействие ударной волны с земной поверхностью с соответствующим её отражением. Это приводит к уменьшению скорости

затухання ударної волни в процесі її розповсюдження вздовж земної поверхності.

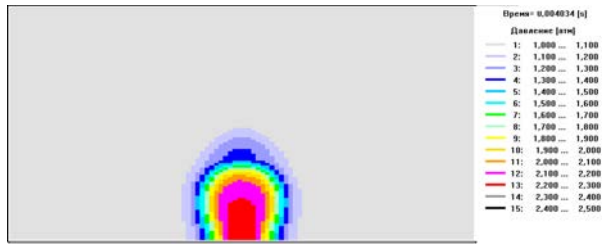


Рис. 5. Взаємодія ударної волни з земною поверхністю

На момент часу, рівний 20 мс, максимальне тиск продуктів вибуху не перевищує 1,2 атм. При цьому, в процесі розповсюдження ударної волни поза фітоценозу, тиск в ній падає більш стрімко (рис. 6).

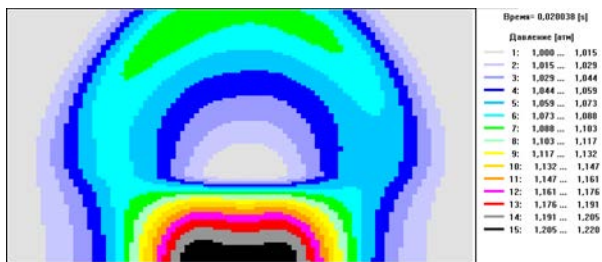


Рис. 6. Поле тиску, формуються на момент часу 0,02 с від початку розльоту продуктів детонації

В результаті розрахунків встановлено, що дальність розповсюдження вибувальної волни об'ємно-шлангового заряду діаметром 0,9 м при заданих зовнішніх умовах досягає приблизно 2,5 м і 5 м для критичних перепадів тиску, рівних  $1,2 \cdot 10^5$  Па і  $0,4 \cdot 10^5$  Па, відповідно (рис. 7).

Під критичним перепадом тиску розуміється тиск, в разі перевищення якого забезпечується сдування тонких хвоїнок і гілок. Слід урахувати, що в фронті ударної волни скачок тиску в два рази перевищує розрахункові. Отриманий результат показує, що при даному діаметрі заряду забезпечується створення протипожежного бар'єру шириною від 5 м до 10 м в молодому основному лісі висотою 3 м.

#### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИБУХУ ОБ'ЄМНО-ШЛАНГОВОГО ЗАРЯДУ В ПОЛОЗІ ЛІСУ

С.В. Говаленков, Д.П. Дубінін, Р.В. Корнієнко, К.В. Коритченко

*Проведено розрахунок параметрів вибуху об'ємно-шлангового заряду в полозі лісу з використанням пакету прикладних програм FIRE. Математичне моделювання вибуху об'ємно-шлангового заряду дозволить визначити характер протікання вибуху при заданих параметрах за різних проміжків часу і ширину протипожежного бар'єру залежно від надлишкового тиску вибуху і діаметру заряду.*

**Ключові слова:** протипожежний бар'єр, мінералізована смуга, математичне моделювання, об'ємно-шланговий заряд.

#### MATHEMATICAL DESIGN OF PARAMETERS OF VOLUME- EXPLOSION HOSE CHARGE IS IN THE FOREST

S.V. Govalenkov, D.P. Dubinin, R.V. Kornienko, K.V. Koritchenko

*The calculation of parameters of explosion by volume of hose charge is conducted in of the forest with the use of application of FIRE package. A mathematical design of explosion is a volume hose charge will allow to define character of flowing of explosion at preset parameter for the different interval of time and width of fire-prevention barrier depending on surplus pressure of explosion and diameter of charge.*

**Keywords:** fire-prevention barrier, saline bar, mathematical design, by volume of-hose charge.

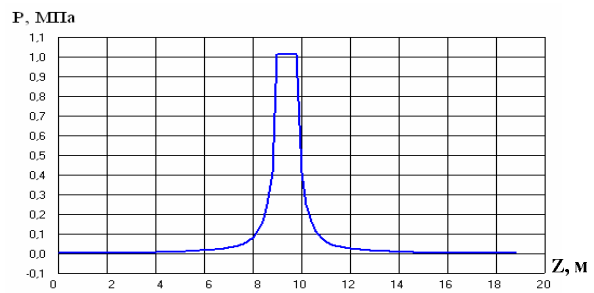


Рис. 7. Крива максимумів надлишку тиску в поперечному сеченні заряду, виникаючого при вибуху об'ємно-шлангового заряду діаметром 0,9 м

#### Выводы

В результате численного моделирования взрыва об'ємно-шлангового заряду встановлено, що на рослинний покрив заданих параметрів впливає ударна волна з надлишковим тиском за її фронтом більш  $1,2 \cdot 10^5$  Па.

Отримана математична модель вибуху об'ємно-шлангового заряду в полозі лісу дозволяє визначати характер протікання вибуху при заданих параметрах за різних проміжків часу і ширину протипожежного бар'єру в залежності від надлишкового тиску вибуху і діаметру заряду.

#### Список литературы

1. Закон України Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 року 21 грудня 2010 року N 2818-VI.
2. Белоцерковский О.М. Численный эксперимент в турбулентности. От порядка к хаосу / О.М. Белоцерковский, А.М. Опарин. – М.: Наука, 2000. – 223 с.
3. Математическое моделирование экологических процессов: Учеб. пособие по лаб. практикуму / Н.В. Нечипорук, Ю.А. Скоб, М.Л. Урюмов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 89 с.
4. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – М.: Наука, 1992. – 408 с.

Поступила в редколлегию 8.02.2011

**Рецензент:** л-р воен. наук, проф. И.О. Кириченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.