

Результаты данной работы четко подтверждают наличие двух первых процессов, обуславливающих изменение взрывных характеристик гремучей ртуть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патри М. Горение и детонация взрывчатых веществ.— М.: Л.: Оборонгиз, 1938.
2. Wallbaum-Wittenberg R. // Z. Schiessen-und-Sprengstoff.— 1938.— 34.— P. 197.
3. Mugaour H., Ertaud A. // Comptes rendus.— 1953.— 237.— P. 1245.
4. Kaufman J. V. R. // Proc. Roy. Soc.— 1958.— A246.— P. 1245.
5. Болт Р., Кэррол Дж. Действие радиации на органические материалы.— М.: Атомиздат, 1965.
6. Кецкало В. И., Сериков Л. Ф. и др. // Сб. тез. докл. VII Всесоюз. конф. по радиационной химии.— Обнинск: ВНИИФТРИ, 1983.— С. 41—43.
7. Шпак В. Т. // Приборы и техника эксперимента.— 1980.— № 3.— С. 165.
8. Жуланова В. П., Рябых С. М. // Сб. тез. докл. II Всесоюз. конф. по теоретической и прикладной радиационной химии.— Обнинск, 1990.— С. 91—92.
9. Рябых С. М. // Химия высоких энергий.— 1988.— 22, № 5.— С. 387—397.
10. Семенов Н. Н. // Иницирующие взрывчатые вещества.— М.; Л.: ОНТИ, 1936.— № 2.— С. 47.
11. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом.— М.: Наука, 1968.
12. Singh K. // Chemic. Soc.— 1959.— P. 459.
13. Boddington T., Iqbal Z. // Trans. Faraday Soc.— 1969.— 65.— P. 509.
14. Рябых С. М. // Хим. физика.— 1990.— 9, № 2.— С. 191.
15. Рябых С. М., Мартынова Н. В., Лавренюк О. А. // Химия высоких энергий.— 1990.— 24, № 4.— С. 335.

г. Кемерово

Поступила в редакцию 9/XII 1991

УДК 533.6.011.72

В. А. Антонов, А. М. Гришин, Ю. М. Ковалев, Л. Ю. Наймушина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВА ШНУРОВОГО ЗАРЯДА В ПОЛОГЕ ЛЕСА ПРИ ОТСУТСТВИИ ПОЖАРА

С помощью математического моделирования рассматривается решение двух задач: определение оптимального расположения заряда в пологе леса по высоте, при котором объем оборванных лесных горючих материалов будет наибольшим; выяснение влияния отражающего экрана на эффективность взрыва шнуrowого заряда. Из рассмотренных случаев расположения заряда (0,75, 1,5 и 2,25 м) получено, что для подрыва заряда наиболее оптимальна высота 1,5 м. При наличии отражающего экрана эффективность взрыва шнуrowого заряда увеличивается, и чем ближе экран расположен к заряду, тем она выше.

Для борьбы с низовыми лесными пожарами широко используются шнуrowые заряды [1]. В результате их подрыва на напочвенном покрове создается минерализованная полоса, ограничивающая распространение низовых лесных пожаров. В последнее время для локализации по-вальных верховых лесных пожаров используются шнуrowые заряды [2], которые взрывают над поверхностью напочвенного покрова, в кронах деревьев. Известен также способ тушения пожаров, когда параллельно заряду в пологе леса подвешивают отражающий экран, выполненный, например, из полиэтиленовой пленки [3].

При взрыве заряда возникает ударная волна (УВ), которая, распространяясь в пологе леса, обрывает листья, хвоинки, мелкие ветки деревьев и тем самым создает лесопожарную полосу, непреодолимую для верхового лесного пожара. Отражающий экран предназначен для усиления действия УВ от заряда.

На формирование поля скоростей и давлений в лесном массиве влияют энергия, выделяющаяся при взрыве, расположение заряда в пологе леса по высоте, расположение экрана, а также характеристики самого лесного массива. Ясно, что для нахождения оптимальных значений мощности и местоположения заряда и экрана необходимо либо

провести значительное число натуральных или полунатурных экспериментов, либо решить задачу численно.

В силу того, что в натуральных условиях практически невозможно поставить два совершенно идентичных эксперимента, более подробную информацию о процессах, происходящих при взаимодействии УВ с лесными массивами и фронтом пожара, можно получить только в результате математического моделирования.

В данной работе рассматривается решение двух задач: 1) определение оптимального расположения заряда в пологе леса по высоте, при котором объем оборванных лесных горючих материалов (ЛГМ) будет наибольшим; 2) выяснение влияния отражающего экрана на эффективность взрыва шнурового заряда.

Постановка задачи

Рассмотрим объем среды, включающий в себя приземный слой атмосферы и лесной массив высотой H_1 без ярко выраженной нижней границы полога леса. На заданной высоте H_2 над поверхностью земли и параллельно ей подвешен шнуровой заряд. В момент времени $t=0$ заряд подрывается и по пологу леса распространяется УВ. Требуется определить поля давления, скорости и плотности в любой момент времени t , анализ которых позволяет, в частности, судить об эффективности взрыва с точки зрения создания противопожарного заслона, т. е. области лесного массива, свободной от ЛГМ.

Для математического описания поставленной задачи введем декартову систему координат, начало которой совпадает с началом лесной полосы, ось x направлена слева направо, а ось z — перпендикулярно оси x .

Сформулируем основные физические допущения, позволяющие упростить математическую постановку задачи: а) полог леса в отсутствие пожара можно рассматривать как среду, состоящую из многокомпонентной инертной k -фазы (сухое органическое вещество, связанная вода в жидкокапельном состоянии); б) газовая среда состоит из воздуха или продуктов взрыва; в) характерное время, необходимое для обрыва хвоя и тонких веток, больше времени прохождения УВ лесной полосы, длина которой на порядок больше ширины зоны УВ; г) микродеформации и смещения k -фазы пренебрежимо малы; д) газ в основной области течения является совершенным и идеальным; е) поверхности напочвенного покрова и экрана недеформируемы; ж) полог леса однороден по своим физическим свойствам ($s = \text{const}$ — удельная поверхность фитомассы), что в достаточной степени выполняется для молодых лесов с высотой деревьев до 3 м.

При решении задачи считаем также, что полог леса (совокупность крон деревьев) представляет собой продуваемую среду, для которой $\alpha_k \ll \alpha_r$, где α_k , α_r — объемные доли конденсированной и газовой фаз.

Обрыв ЛГМ — достаточно сложный механический процесс. Это связано с тем, что само дерево представляет собой сложную механическую систему, состоящую из набора стержней с одним закрепленным концом (для хвойного дерева), которая начинает колебаться под действием динамической нагрузки. По-видимому, обрыв ЛГМ происходит тогда, когда скелет дерева и ЛГМ начинают колебаться в противофазе. Для упрощения анализа этого явления приняты допущения в и г. Первое позволяет при построении математической модели считать, что структура среды не меняется, а второе дает возможность пренебрегать вкладом конвективной составляющей в субстанциональных производных от параметров k -фазы. Кроме того, допущения в и г с учетом а позволяют считать k -фазу недеформируемой пористой средой с исчезающе малой объемной долей пористого скелета. Поэтому законы сохранения массы, количества движения и энергии необходимо выписывать только для газовой фазы.

С учетом сделанных выше допущений и результатов работ [4, 5] имеем следующие уравнения для определения полей газодинамических параметров для плоского двумерного течения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (p + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial z} &= -f_x, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial (p + \rho v^2)}{\partial z} &= -f_z, \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho u (\varepsilon + p/\rho)}{\partial x} + \frac{\partial \rho v (\varepsilon + p/\rho)}{\partial z} &= A_s (T_s - T). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь u, v — проекции скорости газа на оси x и z ; p — давление в газовой фазе; f_x, f_z — проекции силы взаимодействия между газовой и конденсированной фазами на осях x и z ; $\vec{f} = \rho s c_d \vec{v} |\vec{v}|$ (c_d — коэффициент сопротивления, s — удельная поверхность фитомассы); $\varepsilon = e + \frac{u^2 + v^2}{2}$ — удельная энергия газовой фазы; e — внутренняя энергия газовой фазы; T_s, T — температуры компонентов конденсированной и газовой фаз; A_s — эмпирический коэффициент объемного теплообмена, который в общем случае зависит от характера процесса теплообмена. Опыты, проведенные в [5], позволяют пренебречь контактным теплообменом между фазами за время прохождения УВ лесной полосы, поэтому при решении задачи полагалось $A_s (T_s - T) = 0$.

При взрыве цилиндрического заряда, расположенного в пологе леса, образуется цилиндрическая УВ, которая затем отражается в момент времени $t = t_0$ от подстилающей поверхности. Кроме того, взрывная волна через верхнюю границу полога леса уходит в приземный слой атмосферы при $t > t_1$, где t_1 — момент времени, соответствующий положению взрывной волны на верхней границе полога леса. Очевидно, что распространение взрывной волны в цилиндрической системе координат, начало которой совпадает с центром цилиндрического заряда, для $t \leq \min(t_0, t_1)$ можно считать одномерным. Используя переменные Лагранжа и систему уравнений (1) с учетом сделанных выше допущений, для моментов времени $t \leq \min(t_0, t_1)$ имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho_i} \right) &= \frac{\partial}{\partial s} (r u_i), \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} &= -r \frac{\partial p}{\partial s} - f, \quad \frac{\partial r}{\partial t} = u_i, \\ \frac{\partial e_i}{\partial t} + p \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho_i} \right) &= f u_i, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь s и r — лагранжева и эйлера переменные; ρ, u, e — плотность, массовая скорость, удельная внутренняя энергия; индекс $i = 1$ отвечает параметрам продуктов взрыва конденсированного цилиндрического заряда ВВ, $i = 2$ — параметрам воздуха. Система (2) замыкается уравнением состояния продуктов взрыва (ПВ), справедливого в области от центра взрыва до контактной границы, отделяющей ПВ от воздуха, и уравнением состояния воздуха. Уравнение состояния ПВ выбирается согласно [6] в виде

$$e_i = \frac{p_i}{\rho_i (\gamma(\rho_i) - 1)}, \quad (3)$$

где $\gamma(\rho) = \gamma_0 + k(1 + b\rho_1)b\rho_1$; $\gamma_0 = 1, 3$; k, b — коэффициенты, определяемые по параметрам ПВ в точке Чепмена — Жуге. Запишем начальные условия в приближении мгновенной детонации заряда для распределе-

ния величин, характеризующих поведение ПВ ($i=1$):

$$\rho_1(s, 0) = \rho_{10}, \quad u_1(s, 0) = 0, \quad p_1(s, 0) = Q_0 \rho_{10} (\gamma(\rho_{10}) - 1), \quad (4)$$

$$0 \leq s \leq s_K$$

(s_K — координата контактной границы). Уравнение состояния воздуха ($i=2$) для больших давлений бралось из работы [7]:

$$e_2 = \frac{p_2}{\rho_2 (\gamma_2 - 1)}, \quad (5)$$

$$\gamma_2 = \begin{cases} \gamma_0 - 0,42 (e_2/e_K)^2, & e_2 \leq e_K, \\ a_K + (1,36 - a_K) \exp[0,233(1 - e_2/e_K)], & e_2 > e_K, \end{cases}$$

$a_K = 1 + 0,163 / [(1 - 0,0573) \ln(\rho_2/\rho_K)]$, $e_K = 1,116 \cdot 10^3$ кДж/кг, $\rho_K = 1,2921$ кг/м³, $\gamma_0 = 1,402$. Начальные условия для величин, характеризующих поведение воздуха, ставятся естественным образом:

$$\rho_2(s, 0) = \rho_{20}, \quad u_2(s, 0) = 0, \quad p_2(s, 0) = p_{20}, \quad s_K < s < \infty. \quad (6)$$

В качестве граничных условий для системы (1) используются обычные условия симметрии течения при $r=0$:

$$u_1 = 0, \quad \frac{\partial p_1}{\partial r} = \frac{\partial \rho_1}{\partial r} = 0. \quad (7)$$

Момент времени $t = \min(t_0, t_1)$ является начальным для системы (1). Допущение ж позволяет ввести плоскость симметрии течения, проходящую через центр подрыва заряда. Считаем, что при $t > \min(t_0, t_1)$ термодинамические свойства ПВ совпадают со свойствами воздуха. Поэтому система (1) — (4) замыкается обычным уравнением состояния совершенного газа

$$e = \frac{p}{\rho (\gamma - 1)} \quad (\gamma = 1,402). \quad (8)$$

Начальные условия: $t = \min(t_0, t_1)$.

При $0 \leq x \leq R$ и $H_2 - \sqrt{R_0^2 - x^2} \leq z \leq H_2 + \sqrt{R_0^2 + x^2}$

$$p = \begin{cases} p_1(s, t_0), & 0 \leq s \leq s_K, \\ p_2(s, t_0), & s_K < s \leq s_0, \end{cases}$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_1(s, t_0), & 0 \leq s \leq s_K, \\ \rho_2(s, t_0), & s_K < s \leq s_0, \end{cases} \quad (9)$$

$$\vec{v} = \begin{cases} \vec{v}_1(s, t_0), & 0 \leq s \leq s_K, \\ \vec{v}_2(s, t_0), & s_K < s \leq s_0, \end{cases}$$

где R_0 — радиус ударной волны, отсчитывающийся от центра заряда. Во всей остальной области течения, включающей прямоугольник в плоскости xoz ($0 \leq x \leq R$, $0 \leq z \leq H$) с вырезанным полукругом, ставятся невозмущенные значения параметров:

$$p = p_0 = \text{const}, \quad \vec{v} = 0, \quad \rho = \rho_0 = \text{const}. \quad (10)$$

В качестве граничных условий при $t > \min(t_0, t_1)$ для системы (1) — (4) выбираются условия на плоскости симметрии ($x=0$):

$$u = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0, \quad (11)$$

условие непротекания на поверхности земли ($z=0$):

$$v = 0, \quad (12)$$

мягкие граничные условия на верхней ($z=H$) и на правой ($x=R$)

границах области интегрирования, допускающие свободное протекание для газа:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=R} = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=\bar{H}} = 0, \quad \varphi = \{p, \rho, u, v\}. \quad (13)$$

Таким образом, математическая модель распространения в лесном массиве при отсутствии пожара УВ, вызванной взрывом шнурового заряда, включает в себя при $0 \leq t \leq \min(t_0, t_1)$ систему уравнений (2) со всеми замыкающими соотношениями (3)–(6), а при $t > \min(t_0, t_1)$ — систему (1) с начальными условиями (9), (10) и граничными условиями (11)–(13).

Методика численного решения задачи

Задача решалась в два этапа. На первом, до момента выхода УВ на верхнюю границу полога леса или на подстилающую поверхность, задачу можно считать симметричной. В этом случае течение описывается системой уравнений одномерной газовой динамики (2) с соответствующими начальными и граничными условиями. После выхода УВ на верхнюю границу цилиндрическая симметрия течения нарушается, так как в приземном слое атмосферы $sc_d = 0$. Цилиндрическая симметрия нарушается также при выходе УВ на подстилающую поверхность, так как здесь падающая ударная волна отражается от подстилающей поверхности. Этот процесс имеет неоднородный характер. Здесь течение остается симметричным с плоскостью симметрии, проходящей через центр шнурового заряда перпендикулярно поверхности земли, и описывается системой уравнений (1).

Одномерная задача решалась методом Неймана — Рихтмайера [8], а двумерная система — известным конечно-разностным методом С. К. Годунова [9]. В качестве начального условия бралось решение задачи, полученное на первом этапе с соответствующей переинтерполяцией результатов с одномерной разностной сетки на двумерную.

Тестирование программы расчета одномерной задачи подрыва заряда ВВ проводилось на известных решениях уравнений одномерной газовой динамики [10] и задачи распада разрыва. Из условий согласования с точными решениями подбирались шаг по пространственной переменной и коэффициенты в выражении для искусственной вязкости разностной схемы. Программа расчета двумерной системы уравнений газовой динамики тестировалась на задачах распада разрыва и взаимодействия плоской ударной волны со стенкой [9]. Контролировалось также выполнение интегральных законов сохранения с точностью до 1 %.

Основные характеристики среды и ВВ и некоторые результаты расчетов

Основная задача расчетов состоит в определении изобар в различные моменты времени и «дальности» взрыва цилиндрического заряда ВВ. Использовались следующие значения параметров, характеризующие геометрические и физические свойства рассматриваемого явления: высота полога леса $H_1 = 3$ м, высота всей рассматриваемой области $H = 5,5$ м, ширина лесного массива от плоскости симметрии $R = 5,5$ м.

Цилиндрический заряд — это штатный шнуровый заряд ЭШ-1П (профилированный эластичный шнур с эффективным диаметром $d = 0,022$ м и начальной плотностью $\rho_{13} = 1052$ кг/м³). Согласно [10], заряд ЭШ-1П состоит в основном из гексогена, теплота сгорания которого при указанной выше плотности $Q_v = 5447$ кДж/кг и параметры детонации в точке Чепмена — Жуге $p_{1н} = 104 \cdot 10^8$ Па, $\rho_{1н} = 1441$ кг/м³ и $D = 6050$ м/с [10]. Используя эти данные, находим постоянные $k = -8,5090929$ и $b = -6,9194296 \cdot 10^5$, которые входят в уравнение состояния продуктов детонации (3).

Как следует из постановки задачи, наличие лесного массива в математической модели характеризуется комплексом sc_d , где c_d — коэффициент сопротивления лесного массива, s — удельная поверхность фитомассы. Были проведены расчеты для значения $sc_d = 0$, моделирующего взрыв шнуrowого заряда в воздухе, величины $sc_d = 0,03$, типичной для сосновых лесов [11], и $sc_d = 0,7$, отвечающего условиям проведения полунатурного эксперимента с молодыми сосенками [5].

Расчеты проведены для двух случаев расположения шнуrowого заряда над подстилающей поверхностью ($H_2 = 0,75$ м, $H_2 = 1,5$ м) при моделировании взрыва в чистом воздухе ($sc_d = 0$) и в лесном массиве ($sc_d = 0,7$). Полученные результаты показывают, что при взрыве шнуrowого заряда в лесном массиве с большим запасом ЛГМ максимальное давление во фронте УВ меньше, чем при взрыве в воздухе:

$$\begin{aligned} H_2 = 0,75 \text{ м: } p_{\max}(sc_d = 0) &= 12,4 \cdot 10^5 \text{ Па,} \\ p_{\max}(sc_d = 0,7) &= 10,35 \cdot 10^5 \text{ Па;} \\ H_2 = 1,5 \text{ м: } p_{\max}(sc_d = 0) &= 4,28 \cdot 10^5 \text{ Па,} \\ p_{\max}(sc_d = 0,7) &= 3,46 \cdot 10^5 \text{ Па.} \end{aligned}$$

За фронтом УВ уровни давления в лесном массиве выше, чем в открытом пространстве. Следует отметить, что лесной массив, характеризующийся величиной $sc_d = 0,03$, практически не оказывает сопротивления распространению УВ от взрыва шнуrowого заряда на рассматриваемых расстояниях от центра взрыва.

Определение «дальнобойности» при взрыве шнуrowого заряда

Под «дальнобойностью» взрыва шнуrowого заряда в сплошной диссипативной среде при решении одномерной задачи подразумевается расстояние, пройденное от центра подрыва до точки, где избыточное давление во фронте УВ стало меньше заданного критического значения $\Delta p_{\text{кр}} = p_{\text{к}} - p_0$ (p_0 — давление в невозмущенной среде). Это давление считается известным априори, и его значение связано с целью использования шнуrowого заряда.

Оценки [5, 12] показывают, что $\Delta p_{\text{кр}} = 1,2 \cdot 10^5$ Н/м² отвечает условиям, при которых происходит обрыв хвоинок, веток и даже вывал леса. При $\Delta p_{\text{кр}} < 0,4 \cdot 10^5$ Н/м² действие УВ не оказывает существенного влияния на различные автомашины и механизмы, используемые для борьбы с лесными пожарами [12]. Согласно [12], $\Delta p_{\text{кр}} = 0,35 \cdot 10^5$ Н/м² — пороговое значение разрыва барабанных перепонок у человека. Важен с практической точки зрения вопрос о том, на каком расстоянии от центра подрыва заряда достигаются критические давления в зависимости от состояния лесного массива, характеризуемого величинами s и c_d .

Результаты расчетов представлены на рис. 1. Анализ кривых показывает, что при больших значениях $\Delta p_{\text{кр}}$ состояние лесного массива оказывает слабое влияние на $x_{\text{кр}}$. В диапазоне изменения sc_d от 0 до 1 уменьшение «дальнобойности» взрыва при увеличении sc_d для $\Delta p_{\text{кр}} = 1,2 \cdot 10^5$ Н/м² составляет $\sim 0,7$ м, а для $\Delta p_{\text{кр}} = 0,4 \cdot 10^5$ Н/м² — 2,38 м.

Расчеты также показывают, что для хвойных лесов ($sc_d = 0,03$) объем лесного массива, свободного от ЛГМ, в результате взрыва равен ~ 22 м³ на один погонный метр шнуrowого заряда ЭШ-1П в условиях одномерности задачи. По-видимому, эта величина может служить оценкой сверху

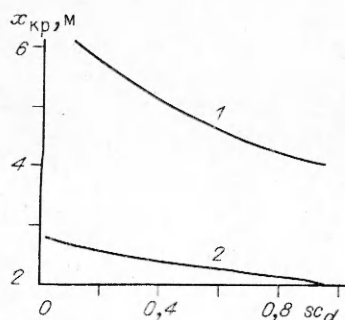


Рис. 1. Графики «дальнобойности» взрывной волны $x_{\text{кр}}$ для $\Delta p_{\text{кр}} = 0,4 \cdot 10^5$ (1) и $1,2 \cdot 10^5$ (2).

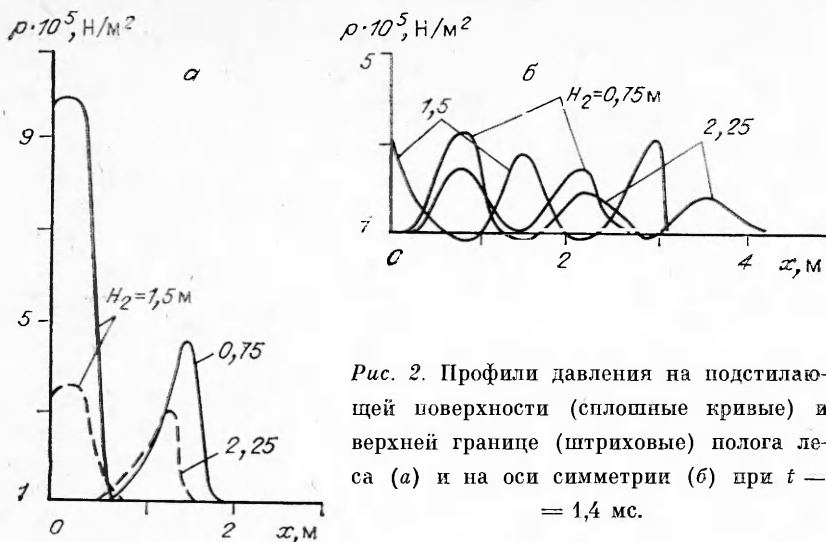


Рис. 2. Профили давления на подстилающей поверхности (сплошные кривые) и верхней границе (штриховые) полога леса (а) и на оси симметрии (б) при $t = 1,4$ мс.

для реальных случаев подрыва заряда в лесном массиве, так как в реальных условиях дву- и трехмерной задачи затухание УВ должно происходить быстрее.

Влияние высоты подрыва заряда на его эффективность

Рассматривалось расположение шнурового заряда над подстилающей поверхностью: $H_2 = 0,75, 1,5$ и $2,25$ м, $sc_d = 0,03$, $\Delta p_{кр} = 1,2 \cdot 10^5$ Н/м² (это давление определено экспериментально в [5, 12] для распространения УВ в сосновых молодняках).

На рис. 2 представлены некоторые результаты расчетов, анализ которых показывает, что в данном случае реализуется достаточно сложная картина течения с наличием отраженных и падающих УВ. К рассматриваемому моменту УВ от шнурового заряда, расположенного на высоте $2,25$ м, еще не достигла подстилающей поверхности. УВ от заряда, подорванного у поверхности земли при $H_2 = 0,75$ м, также не достигла верхней границы полога леса.

На момент $t = 2,5$ мс наибольшие уровни давления у поверхности земли и верхней границы полога леса (рис. 3, а) достигаются при начальном расположении заряда в середине лесного массива, $H_2 = 1,5$ м. При таком H_2 следует ожидать наибольшей эффективности от взрыва с точки зрения создания противопожарной полосы, свободной от ЛГМ. Расчеты объема лесного массива $V_{кр}$, свободного от ЛГМ, т. е. в точках

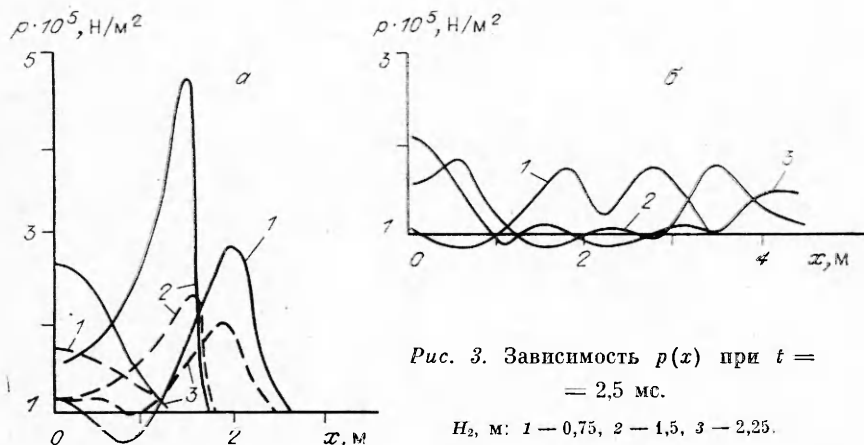


Рис. 3. Зависимость $p(x)$ при $t = 2,5$ мс.

H_2 , м: 1 — 0,75, 2 — 1,5, 3 — 2,25.

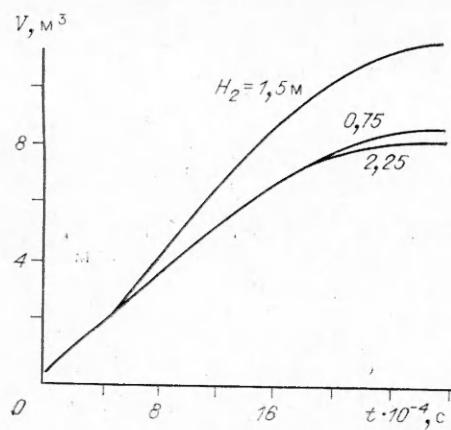


Рис. 4. Зависимость величины объема, свободного от ЛГМ, от времени.

и 2,25 м соответствующие зависимости $V_{\text{кр}}(t)$ практически достигли при $t = 2,6$ мс своих асимптотических значений, в то время как для $H_2 = 1,5$ м следует ожидать дальнейшего увеличения $V_{\text{кр}}$ при $t > 2,6$ мс. Этот вывод подтверждается распределением давления на подстилающей поверхности (см. рис. 3, а) при $t = 2,6$ мс. В этот момент для $H_2 = 1,5$ м избыточное давление во взрывной волне почти в 2 раза выше ($\Delta p_{\text{кр}} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$), а для других случаев эта величина близка к $\Delta p_{\text{кр}}$.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что они согласуются друг с другом. В частности, экспериментально найденная оптимальная высота подрыва заряда 1,5 м [5], для которой при проведении экспериментов имеет место наибольший обрыв ЛГМ, совпадает с величиной, найденной теоретически. Этот факт косвенно доказывает достоверность полученных результатов и адекватность используемой модели для взаимодействия УВ с пологом леса.

Влияние отражающего экрана на эффективность взрыва шнурового заряда

Для повышения эффективности взрыва шнурового заряда в соответствии с предлагаемым способом тушения пожаров [3] можно использовать отражающий экран, расположенный в пологе леса перпендикулярно направлению пожара и параллельно заряду. Взрыв шнурового заряда моделировали в предположении, что на некотором расстоянии l параллельно шнуровому заряду на всю высоту полога леса ставится отражающий экран. При этом делали упрощающее допущение о недеформируемости отражающего экрана при взаимодействии с УВ, которое позволяет расценивать результаты по эффективности экрана как оценку сверху.

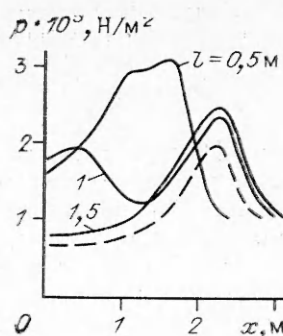
Решение задачи строится следующим образом: до выхода УВ на подстилающую поверхность, границу полога леса или пока УВ не достигнет поверхности экрана решается система (2) с теми же начальными и граничными условиями. На втором этапе используется система уравнений (1), но уже записанная для плоского случая, а на границе, отвечающей положению экрана, ставится условие «непротекания»: нормальная составляющая скорости равна нулю.

В проведенных расчетах заряд располагается на высоте 1,5 м, а экран — на расстояниях 0,5, 1 и 1,5 м. На рис. 5 представлены графики распределения давления на поверхности земли на момент $t = 4$ мс для различных расположений экрана и без экрана (штриховая кривая). Видно, что уровень давления выше для экрана с $l = 0,5$ м, влияние экрана на эффективность шнурового заряда может оказаться существ-

которого достигнуто критическое давление обрыва хвой $\Delta p_{\text{кр}} = 1,2 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$, подтверждают эти соображения.

На рис. 4 представлены графики изменения $V_{\text{кр}}$ на один погонный метр шнурового заряда от времени для различных положений заряда по высоте полога леса. Как показывает анализ представленных результатов, наиболее эффективен с точки зрения противопожарных мероприятий взрыв шнурового заряда на высоте 1,5 м, а минимальная эффективность достигается при подвешивании заряда на высоте 2,25 м от поверхности земли. Анализ кривых на рис. 4 показывает также, что для $H_2 = 0,75$

Рис. 5. Распределение давления на поверхности земли при $t = 4$ мс для различных расположений экрана.



венным. Ниже представлено отношение величины объема, свободного от ЛГМ, полученного с использованием отражающих экранов, к объему без экрана для различных значений l :

$(V_{\text{экр}}/V_{\infty}) \cdot 100\%$	240	137	0
$l, \text{м}$	0,5	1,0	1,5

Результаты говорят о том, что эффективность отражающего экрана тем выше, чем ближе экран расположен к заряду, но при этом следует иметь в виду, что при близком расположении экрана к заряду он может разрушиться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов О. К., Кустов Ю. В. // Лесные пожары и борьба с ними.— Л., 1986.— С. 102—108.
2. А. с. 1136811, МКИ А62 с. Способ тушения лесного пожара/А. М. Гришин, В. М. Бабаев, В. Е. Абалтусов и др., 1985.
3. А. с. 1644976, МКИ А62 с. Способ тушения лесных пожаров/А. М. Гришин, Н. А. Алексеев, А. Н. Голованов, 1991.
4. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров.— Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981.— 227 с.
5. Гришин А. М., Ковалев Ю. М. Экспериментальное и теоретическое исследование воздействия взрыва на фронт верхового лесного пожара // ФГВ.— 1989.— 25, № 6.— С. 72—79.
6. Каширский А. В., Орленко Л. П., Охитин В. Н. // ПМТФ.— 1973.— № 2.— С. 165—170.
7. Селиванов В. В. Численная оценка влияния формы ВВ на параметры воздушных ударных волн // ФГВ.— 1985.— 21, № 4.— С. 93—98.
8. Рихтмайер Р. Д., Мортон К. У. Разностные методы решения краевых задач.— М.: Мир, 1972.— 418 с.
9. Численные решения многомерных задач газовой динамики.— М.: Наука, 1976.— 400 с.
10. Баум Ф. А., Орленко Л. Н., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.— 704 с.
11. Дубов А. С., Быкова Л. П., Марунич С. В. Турбулентность в растительном покрове.— Л.: Гидрометеониздат, 1978.— 182 с.
12. Взрывные явления. Оценки и последствия.— М.: Мир, 1986.— 319 с.

г. Томск

Поступила в редакцию 27/VII 1992

УДК 539.31

А. Д. Реснянский, Е. И. Роменский

МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТОГО ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО КОМПОЗИТА

С помощью феноменологической процедуры осреднения получена модель слоистого гомогенного термовязкоупругого композита. Для ее построения использовались только свойства фаз. Система уравнений динамики композита замыкается уравнением состояния (упругим потенциалом), по которому вычисляются напря-

© А. Д. Реснянский, Е. И. Роменский, 1993.

9*

123