ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СНАРЯД СО ВЗРЫВАТЕЛЕМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ И МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИНИЦИИРУЮЩЕГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

Борис Рыбакин[1,2], Григори Секриеру[2], Елена Гуцуляк[2]
[1] Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова
[2] Институт Математики и Информатики Академии Наук Молдовы
rybakin@math.md, secrieru@renam.md, elena.gutuleac@math.md

Abstract. *The effects of explosive wave on buried in ground charge with exploder were studied in this paper. The main charge is modeled as a steel shell, filled with explosive material. The exploder is located in the end of the shell and has a higher sensitivity than the main charge. The model for saturated three-component ground has been chosen for ground that surrounds the charge. The geometry and location of the initiating explosive charge has a significant impact on the time and nature of the detonation of buried charge with exploder.*

Ключевые слова: *математическое моделирование, упругопластическая деформация, водонасыщенный грунт.*

I. Введение

Рассматривается задача по исследованию интенсивных динамических воздействий на конструкции цилиндрической формы с учетом термоупругопластического характера поведения материалов, процесса образования и распространения ударных волн и других факторов. В данной работе изучается воздействие ударной волны, вызванной взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ), на заглубленный в грунт снаряд с взрывателем. Снаряд моделируется как стальная оболочечная конструкция, заполненная ВВ, со взрывателем в торце оболочки. Взрыватель моделируется в программе прямоугольной областью оболочки с параметрами ВВ, но с более высокой чувствительностью к детонации, чем у заполняющего оболочку взрывчатого вещества.

Комплексное экспериментальное исследование процессов нагружения таких объектов по разным причинам затруднено, а иногда и просто невозможно. Поэтому математическое моделирование происходящих физических процессов с использованием современной компьютерной техники является основой научно-технического подхода, который широко используется для решения таких задач. Численное исследование поставленной задачи осуществляется в рамках двумерной модель упругопластической среды [1-5]. Компьютерная технология решения математической модели в лагранжевой системе координат связана с разработкой методов, алгоритмов и программных средств на основе использования модифицированной конечно-разностной схемы Уилкинса [6].

II. Основные уравнения, методы исследования, результаты

Рассматривается задача воздействия ударной нагрузки, которая моделируется взрывом заряда ВВ в грунте на снаряд, снабженный взрывателем, и заглубленный в грунт. Физические процессы взрывного воздействия на оболочечные конструкции носят нестационарный характер и описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных, которые определяют законы сохранения массы, количества движения и энергии. В рамках двумерной модели упругопластической среды эта система определяющих уравнений может быть записана в виде:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial r}{\partial t} = \frac{\partial (ru)}{\partial r} - \frac{\partial (ru)}{\partial z} - \frac{ru}{r},\\
&\frac{\partial (ru)}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial s_{rr}}{\partial r} + \frac{s_{rr} - s_{qJ}}{r},\\
&\frac{\partial (ru)}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial s_{rr}}{\partial z} + \frac{\partial s_{zr}}{\partial r} + \frac{s_{rz}}{r},\\
&\frac{\partial (rE)}{\partial t} = -\frac{P}{r}\frac{\partial r}{\partial t} + s_{rr}\frac{\partial u}{\partial r} + s_{qJ}\frac{u}{r} + s_{rz}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r}\right),
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Здесь r - плотность, $\{u,u\} = \check{w}$ - компоненты вектора скорости, P - гидростатическое давление, $s_{i,j} = -Pd_{i,j} + s_{i,j}$, $s_{i,j}$ - тензор напряжений, i, j пробегают значения r, z, q -компоненты девиатора тензора напряжений, E - удельная внутренняя энергия. Компоненты девиатора тензора напряжений связаны с компонентами тензора скоростей деформаций $e_{i,j}$ следующим образом:

$$
\begin{aligned}
&\dot{s}^{\nabla}_{zz} = 2m\left(\dot{e}_{zz} + \frac{1}{3r}\frac{\partial r}{\partial t}\right),\\
&\dot{s}^{\nabla}_{rr} = 2m\left(\dot{e}_{rr} + \frac{1}{3r}\frac{\partial r}{\partial t}\right),\\
&\dot{s}^{\nabla}_{qq} = 2m\left(\dot{e}_{qq} + \frac{1}{3r}\frac{\partial r}{\partial t}\right), \dot{s}^{\nabla}_{zz} = m(\dot{e}_{rz})
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

Здесь ∇ означает производную вдоль пути деформирования в смысле Яуманна:

$$\dot{s}^{\nabla}_{ij} = s_{ij} - s_{ik}w_{jk} - s_{jk}w_{ik}, w_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (3)$$

u_i - компоненты вектора скорости, x_j - декартовы координаты. Компоненты тензора скоростей деформации определяются следующим образом:

$$\dot{e}_{zz} = \frac{\partial u}{\partial z}, \dot{e}_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}, \dot{e}_{qq} = \frac{u}{r}, \dot{e}_{rz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}\right) \qquad (4)$$

Определяющие уравнения теории пластичности Прандтля – Рейса

$$\frac{\partial s_r}{\partial t} + v\frac{\partial s_r}{\partial r} + u\frac{\partial s_r}{\partial z} + l\, s_r = 2G\left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{1}{3r}\frac{\partial r}{\partial t}\right), \qquad (5)$$

$$\frac{\partial s_j}{\partial t} + v\frac{\partial s_j}{\partial r} + u\frac{\partial s_r}{\partial z} + l\, s_j = 2G\left(\frac{v}{r} - \frac{1}{3r}\frac{\partial r}{\partial t}\right), \qquad (6)$$

$$\frac{\partial s_z}{\partial t} + v\frac{\partial s_z}{\partial r} + u\frac{\partial s_z}{\partial z} + l\, s_z = 2G\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{3r}\frac{\partial r}{\partial t}\right), \qquad (7)$$

$$\frac{\partial s_{rz}}{\partial t} + v\frac{\partial s_{rz}}{\partial r} + u\frac{\partial s_{rz}}{\partial z} + l\, s_{rz} = G\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r}\right), \qquad (8)$$

Здесь l - скалярный параметр, который равен 0 при упругой деформации, а при пластической деформации определяется с помощью условия текучести Мизеса:

$$s_r^2 + s_z^2 + s_j^2 + 2s_{rz}^2 = \frac{2}{3}Y_e^2. \qquad (9)$$

Y_e^2 - предел текучести, s_r, s_z, s_j, s_{rz} - девиаторы тензора напряжений, G - модуль сдвига. В модели принимается, что предел текучести Y_e, описываемый выражением (1.8) и другие параметры следующим образом зависят от температуры, давления и других параметров состояния (модель Штейнберга – Гуинана):

$$Y_e = Y_0(1+be_u^p)^n(1-bs\,(\frac{r_0}{r})^{1/3} - h(T-T_0)),$$

$$Y_0(1+be_u^p)^n \le Y_{\max},\ Y_0 = 0,\ \text{при T} > \text{T}_\text{m}, \qquad (10)$$

$$T_m = T_{m0}(\frac{r_0}{r})^{2/3}\exp(2g_0(1-\frac{r_0}{r})),$$

где $e_u^p = \sqrt{2e_{ij}^p e_{ij}^p/3}$ - интенсивность тензора пластических деформаций; T_m - температура плавления материала; $Y_0, Y_{\max}, T_{m0}, b, b, g_0$ - константы материала. Считается, что $s_* = s_*^0 Y/Y^0, s_*^0$ - константа.

В качестве уравнения состояния для материалов оболочки и взрывчатого вещества принято уравнение типа Ми - Грюнайзена:

$$p = k_1(1-\frac{r_0}{r}) + k_2(1-\frac{r_0}{r})^2 + k_3(1-\frac{r_0}{r})^3 + g_0 r_0 U \quad (11)$$

Мягкий грунт можно рассматривать как трехкомпонентную среду (твердые частицы, воздух и вода), характеристики которой зависят от объемного содержания каждой из компонент [7]. Для описания физико-механических характеристик грунта при динамических нагрузках обозначим через d_i объемное содержание в грунте i-ой компоненты, i=1, 2, 3. При этом (i=1) соответствуют газообразным, (i=2) - жидким и (i=3) – твердым компонентам. Величины d_i связаны соотношением $d_1 + d_2 + d_3 = 1$, а начальная плотность грунта r_0 при исходном давлении p_0 определяется по формуле $r_0 = \sum_{i=1}^{3} d_i r_i$. Исходя из этих предположений, в [7] получено уравнение состояния для грунта как трехкомпонентной среды в виде:

$$\frac{r_0}{r} = \sum_{i=1}^{3} d_i\left[\frac{k_i(p-p_0)}{r_i c_i^2} + 1\right]^{-\frac{1}{k_i}} \qquad (12)$$

Здесь k_i - показатели изэнтропы, c_i - скорости звука при начальном давлении p_0 (атмосферное давление).

Применимость данной формулы для различных типов водонасыщенного и сухого грунта подтверждена опытами, которые показали хорошее совпадение опытных данных и численных значений уравнения (12) в большом интервале давлений и различных сочетаний параметров a_1, a_2, a_3 [7].

В численных расчетах, вместо формулы (12), удобнее использовать зависимость давления от плотности в явном виде. Такая зависимость аппроксимирована кубическим многочленом относительно степени сжатия $m = r/r_0 - 1$:

$$p = a_0 + a_1 m + a_2 m^2 + a_3 m^3 \qquad (13)$$

Коэффициенты полинома определяются на основании (12) с использованием метода наименьших квадратов.

Уравнение состояния взрывчатого вещества до детонации было выбрано в форме закона Тета:

$$p = \frac{C_k}{n}\left[\left(\frac{r}{r_0}\right)^n - 1\right] \qquad (14)$$

для твердой фазы [7]. В уравнении (1.13) $r_0 = 1{,}72$, $C_k = 0{,}123$, n=3. Для продуктов детонации было использовано уравнение состояния политропы в виде

$$p = A r^{g} \qquad (15)$$

При проектировании вычислительного эксперимента, для решения таких связанных задач, необходимо задать начальные и граничные условия, а также задать константы различных материалов для реалистичных уравнений состояния. Заметим, что размеры расчетной области составляют 180x100 ячеек сетки. Стальная оболочка (радиус – R, длина – $2R$, толщина – $\frac{R}{10}$) заполнена взрывчатым веществом (TNT), с торца оболочки находится взрыватель размером $\frac{R}{10} x \frac{R}{4}$ (TNT, чувствительность выше на 4%, чем у заполнителя). Взрыватель находится в торце контейнера, вплотную к оси симметрии OX, чувствительность на 4% выше, чем у заполнителя контейнера. Конструкция окружена грунтом (0,1 воздуха, 0,3 воды, 0,6 кварца).

Параметры грунта для (13): воздух - $k_1 = 1,4$, $r_1 = 12*10^{-4}$ г/см^3, $c_1 = 300$ м/сек; вода - $k_2 = 3$, $r_2 = 3$ г/см^3, $c_2 = 1500$ м/сек; кварц - $k_3 = 3$, $r_3 = 2,65$ г/см^3, $c_3 = 4500$ м/сек.

Параметры стали для (11): $r_0 = 7900$ кг/м^3, $k_1 = 1.648$, $k_2 = 3.124$, $k_3 = 9.556$, $g_0 = 2.17$, s = 1.49, C = 0.46, $Y^0 = 3.40*10^{-3}$, $Y^0_{\max} = 2.0*10^{-2}$, β=4.0*10^1, n=0.35, b=3.6, h=0.45, $T_{m0} = 1.93*10^3$, $m_0 = 2.76*10^{-1}$

Параметры взрывчатого вещества (TNT) для (14): $r_0 = 1,72$, $C_k = 0,123$, n=3.

Параметры TNT для (15): $A = 0,0764, g = 3,0$

Скорость детонационной волны в слое ВВ - 8,523 км/с.

Характерное исходное состояние двумерной расчетной области, близкое к начальному моменту времени, показано на Рис. 1. Здесь отображены контуры оболочки (двойные жирные черные линии) и место исходного расположения заряда взрывчатого вещества.

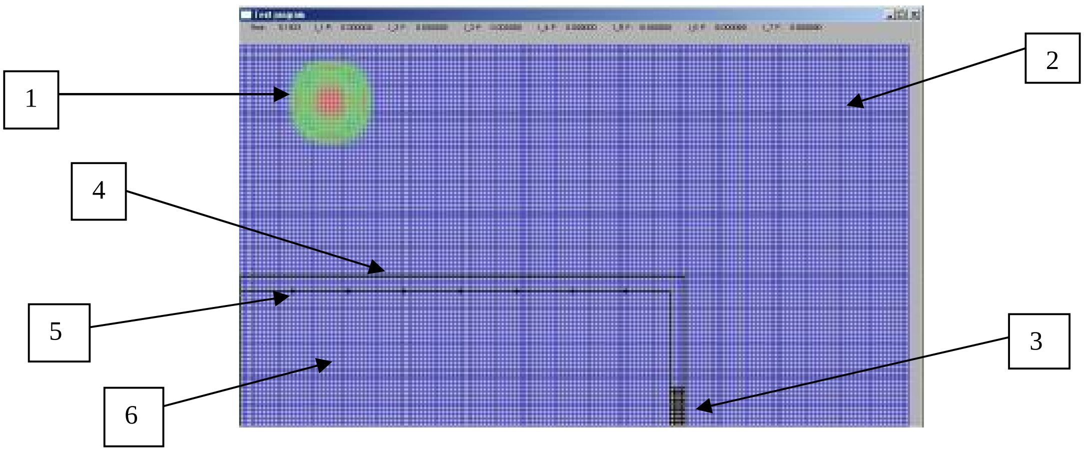

Рис.1. Расчетная область для варианта №1
в t=5,2 мксек.

<u>Обозначения на рисунке 1:</u>

1- инициирующее ВВ	4-оболочка основного заряда
2-грунт	5-датчик
3-взрыватель	6-заполняющее ВВ

<u>Вариант расчета №1:</u> Инициирующий заряд ВВ представляет квадрат размером $\frac{R}{4}\times\frac{R}{4}$, находящийся на расстоянии $\frac{R}{4}$ от оси симметрии OY и на расстоянии R от продольной стенки снаряда, мгновенно детонирует в первый момент времени (рис. 1). По грунту распространяется сферическая ударная волна. При взрыве в грунте основная часть энергии взрыва передается окружающей массе грунта и производит мощное сотрясение грунта, напоминающее по своему действию землетрясение. Взрыватель основного заряда инициирует под действием УВ в момент времени t=116 мксек. Детонационная волна распространяется по заполняющему ВВ, и происходит детонация заполнителя (рис. 2).

<u>Вариант расчета №2:</u> Инициирующий заряд размером $\frac{3R}{4}\times\frac{R}{4}$ имеет прямоугольную форму, находится на таком же расстоянии от снаряда с взрывателем, что и в варианте №1 (рис. 3). Возбуждает более мощную ударную волну (УВ), которая, достигая осей симметрии OX, OY и отражаясь от них, усиливается и возбуждает в заполняющем ВВ детонацию раньше, чем УВ достигает взрывателя. Заполнитель детонирует с левого края в момент времени t=73 мксек и со стороны взрывателя в t=88 мксек (рис. 3).

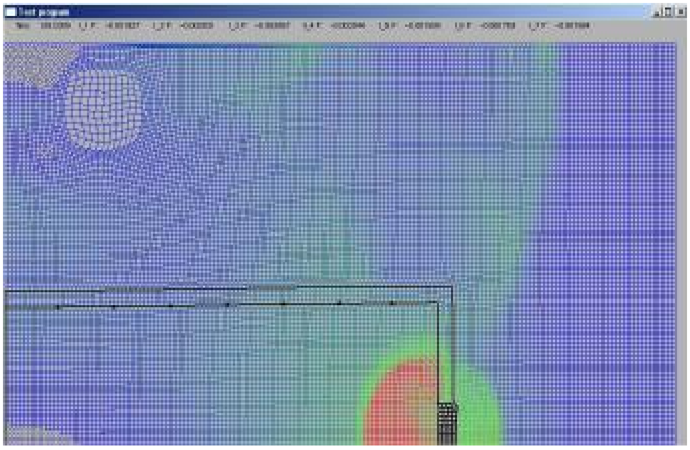

Рис.2. Расчетная область для варианта №1
в t=128 мксек.

<u>Вариант расчета №3:</u> Если инициирующий заряд размером $\frac{3R}{4}\times\frac{R}{4}$ поместить на расстоянии R от оси OY и на расстоянии R от продольной стенки снаряда, то детонация заполнителя произойдет от взрывателя в t=80 мксек.

На рис.4 изображены показания радиальной компоненты напряжения, фиксированные датчиком, ближайшим к оси OY, для трех вышеперечисленных вариантов (датчик расположен на границе сталь/заполнитель). Общее время расчета составляет 155 сек$^{-6}$.

Кривая, соответствующая варианту расчета №1, показывает изменение по времени напряжения, вызванные УВ, до момента инициирования детонации в заполнителе. Профиль напряжения в случае №1 не так выражен, как в вариантах №2 и №3, когда детонация внутри заряда произошла, и детонационная волна сильно повлияла на изменение напряжения.

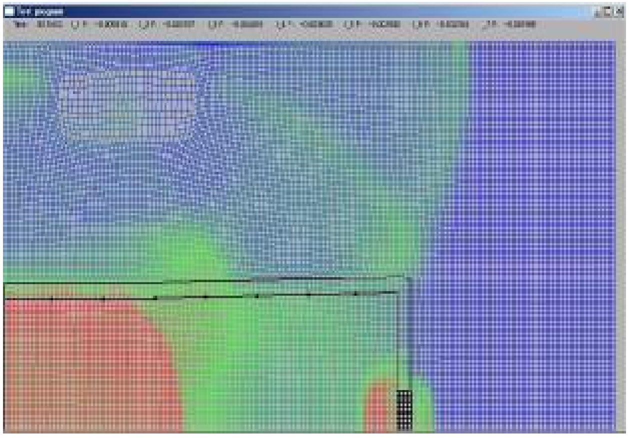

Рис.3. Расчетная область для варианта №2
в t=93,5 мксек.

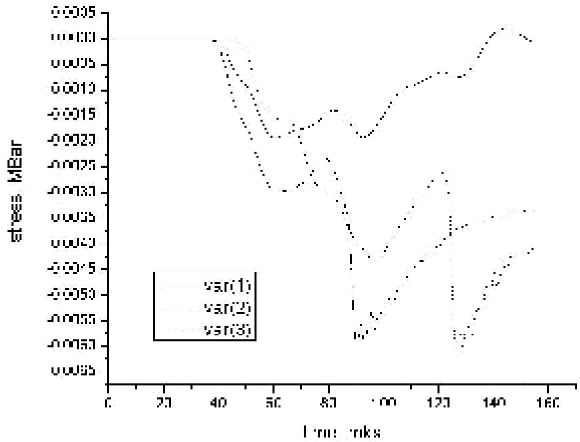

Рис. 4. Напряжения на границе сталь/ВВ

III. Заключение

Исходя их проведенных расчетов, можно заключить, что геометрия и расположение инициирующего заряда ВВ существенно влияет на время и характер детонации заряда с взрывателем.

IV. Библиография

1. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. Москва, Мир, 1985, 384 с.
2. Kiselev A.B., Yumashev M.V., "Deforming and fracture under impact loading. The model of thermoelastoplastic medium", J. Appl. Mech. Tech. Phys., vol. 31 no. 5, 1990, pp. 116-123.
3. Rybakin B. Numerical Modeling of Hyper-Velocity Collision of Debris Particles with Space Vehicles Proceedings of the 15-th IMACS World Congress, v. III, Computational Physics, Biology and Chemistry, pp.233-238, 1997, Berlin.
4. Rybakin B. Computer Modeling of Dynamic Processes. CSJM, v.8, N 2(23), 2000, pp.150-180.
5. Rybakin B., Strelnikova E., Secrieru G., Gutuleac E. «Computer simulation of dynamic loading of fluid-filled shell structures», Abstracts: International Conference Mathematicals & Information Technologies: research and education. Молдова, Кишинев, 2011 p. 102-103.
6. Wilkins M.L. Modelling the behavior of materials. Struct. Impact and Grashworth. Proceeding of International Conference. V.2, London, New York, 1984, pp. 243-277.
7. Ляхов Г.М., Покровский Г.И. Взрывные волны в грунтах. Госгортехиздат 1962 г., 99 с.