ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, 2015 №1(14), С.61–69

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 539.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА

© 2015 г. О.А. Губеладзе

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.

Рассматривается проблема решения динамических контактных задач взаимодействия ударника цилиндрической формы с преградой по нормали численными методами.

Ключевые слова: динамическая контактная задача, численные методы, ударник.

Поступила в редакцию 10.03.2015 г.

Получисленные и численные методы решения нестационарных динамических контактных задач наиболее часто используются в настоящий момент времени. Перечисление этих методов составит длинный список: конечно-разностные (сеточные) методы, развитые для решения проблем газовой динамики и адаптированные для численного решения контактных задач динамики удара, метод конечного элемента, различные варианты метода граничных интегральных уравнений, вариационно-разностные методы, сеточно-характеристические методы и многие другие, в том числе комбинированные.

Среди комбинированных численно-аналитических методов наибольшее распространение получил метод, когда начально-краевая задача сводится к решению интегрального уравнения, решение которого строится одним из численных методов. Развитие математических методов решения нестационарных динамических контактных задач позволяет, в отсутствие надежных экспериментальных данных, получить качественное представление о процессе удара твердого тела в упругую и неупругую среду и количественные данные об основных его характеристиках.

При высоких скоростях (высокоскоростной удар) остаточные деформации материалов взаимодействующих тел значительны, а также диссипация энергии при ударе приводит к локальному росту температуры, что в свою очередь влияет на свойства материала. Для соударяющихся металлических тел можно выделить следующие режимы [1]:

– упругий удар (<0,1 м/с);
– вдавливание при полной пластичности (~5 м/с);
– поверхностное квазистатическое вдавливание (~100 м/с);
– обширное пластическое течение (~1000 м/с);
– сверхскоростной удар (~10000 м/с).

При соударениях, описываемых квазистатической теорией, эффектами тепловыделения пренебрегаем. Повышение скорости удара приводит к более выраженным пластическим деформациям. Если материал ударника тверже, чем материал преграды, то диаметр кратера становится больше диаметра ударника и вдавливание происходит на глубину, также превышающую этот диаметр (выделение тепла при сдвиге понижает динамический предел текучести материала). В случае дальнейшего повышения скорости материал становится больше похожим на идеальную жидкость, чем на пластическое тело.

Рассмотрим задачу взаимодействия ударника цилиндрической формы с преградой. С учетом сжимаемости материала ударника система уравнений, описывающая подобное движение, имеет вид [2]:

$$\frac{\partial\rho}{\partial\tau} = -\rho\left[\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2}\right];$$

$$\rho\frac{\partial v_1}{\partial\tau} = \frac{\partial S_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial S_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial P}{\partial x_1};$$

$$\rho\frac{\partial v_2}{\partial\tau} = \frac{\partial S_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial S_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial P}{\partial x_2}; \qquad (1)$$

$$\rho\frac{\partial E}{\partial\tau} = -\frac{P}{S}\frac{\partial P}{\partial\tau} + S_{11}\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + S_{22}\frac{\partial v_2}{\partial x_2} + S_{12}\left(\frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1}\right);$$

$$\frac{\partial V_T}{\partial\tau} = P\frac{A_1\exp\left[V_T/V_{T_0} + P/P_0\right]}{A_2 + \exp\left(P/P_0\right)}U_+,$$

где U+ – ступенчатая функция, равная единице, если Vт >0 или (Vт =0 и p>0); x1 и x2 – координаты;

ρ – плотность материала;

S_{11}, S_{12}, S_{22}, – компоненты девиатора напряжений;

P – давление;

v_1, v_2 –компоненты вектора скорости;

E – удельная внутренняя энергия;

A_1, A_2, P_0, VT_0 – экспериментально определяемые константы материала;

VT – удельный объем пор в материале.

Уравнение состояния материала запишется в виде [2]

$$P = \sum_{m=1}^{3} K_m k^m\left[1 - \frac{K_0 k}{2}\right] + K_0\rho_0 E, \qquad (2)$$

где K_0, K_m – константы материала;

$k=V/(V-V_T) - 1$;

$V=1/\rho$ и $V_0=1/\rho_0$ – текущий и начальный удельные объемы.

Компоненты девиатора напряжений определяются из соотношений [3]:

$$2G\left[\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{1}{3\rho}\frac{\partial\rho}{\partial\tau}\right] = \frac{d^0 S_{11}}{d\tau} + \lambda S_{11};$$

$$2G\left[\frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{1}{3\rho}\frac{\partial\rho}{\partial\tau}\right] = \frac{d^0 S_{22}}{d\tau} + \lambda S_{22}; \qquad (3)$$

$$G\left[\frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1}\right] = \frac{d^0 S_{12}}{d\tau} + \lambda S_{12},$$

где $G=G_0A_3/(V_T+A_3)$ – модуль сдвига;
A_3 – константа материала;
λ – параметр упругости, тождественно равный нулю при упругой деформации и определяемый с помощью условия текучести при пластической деформации.

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 2\sigma^2 / 3.$$

Здесь S_1, S_2, S_3 – главные компоненты девиатора напряжений;
σ – динамический предел текучести.

Для замкнутой системы уравнений сформулируем краевую задачу взаимодействия цилиндрической деформируемой частицы, область которой обозначим D_1, и преградой, занимающей область D_2.

Начальные условия:

– при $(x_1,x_2) \in D_1 \cup D_2$ $\rho(x_1, x_2,0) = \rho_0$ и $v_2(x_1, x_2,0) = 0$;
– при $(x_1,x_2) \in D_2$ $v_1(x_1, x_2,0) = 0$;
– при $(x_1,x_2) \in D_1$ $v_1(x_1, x_2,0) = v_0$; (4)
– при $(x_1,x_2) \in D_1 \cup D_2$
$S_{11}(x_1, x_2,0) = S_{22}(x_1, x_2,0) = S_{12}(x_1, x_2,0) = P(x_1, x_2,0) = E(x_1, x_2,0) = V_T(x_1, x_2,0)$.

Граничные условия:

– на свободной поверхности $\sigma_{ij}(x_1, x_2,\tau) = 0$, $i,j=1,2$;
– на границе контакта F.

$$\begin{cases} \sigma_{11}^{уд} = \sigma_{11}^{прег} \\ \sigma_{22}^{уд} = \sigma_{12}^{уд} = \sigma_{22}^{прег} = \sigma_{12}^{прег} = 0 \end{cases}. \tag{5}$$

Разрушение по типу отрыва происходит в процессе роста и слияния микропор под действием растягивающих напряжений. Материал считается разрушенным при VT $\geq V_T^{кр}$, где $V_T^{кр}$ задается в интервале $1\cdot10^{-5} \div 1\cdot10^{-4}$ м^3/кг (от хрупкого до пластичного материала) [1].

По механизму сдвига материал считается разрушенным при $A_p \geq A_p^{кр}$, где A_p – удельная работа пластических деформаций [4]. Приращение определяется по формуле:

$$\Delta A_p = \frac{1}{3}\sigma \frac{1}{\rho G}\left(\sqrt{\frac{3J_2}{2}} - \sigma\right), \tag{6}$$

где J_2 – второй инвариант компонент девиатора напряжений.

Для решения сформулированной задачи использован конечно-разностный метод с явной схемой расчета. В области D_1 вводится сетка с шагом по координатам x_1-Δh_1^{D1}, x_2-Δh_2^{D1}; в области D_2 сетка с шагами x_1-Δh_1^{D2} и x_2-Δh_2^{D2}. Шаг по времени для всей области D равен $\Delta\tau$. Численные расчеты в областях D_1 и D_2 проводятся в одной временной сетке. Связь между областями осуществляется через граничные условия на поверхности контакта ударника и преграды (5).

В качестве примера рассмотрим:

а) распространение волн напряжений в пластине (сталь 3), вызванных взаимодействием с ударником (свинец). Толщина пластины 0,02 м, диаметр и длина ударника по 0,01 м. Скорость взаимодействия 100 м/с. На рисунках 1а – 1е представлены результаты расчета на момент времени $\tau = 8{,}67\cdot10^{-5}$. Видно, что при воздействии ударника возникают большие перерезывающие усилия, приводящие к высокой концентрации напряжений в данной области.

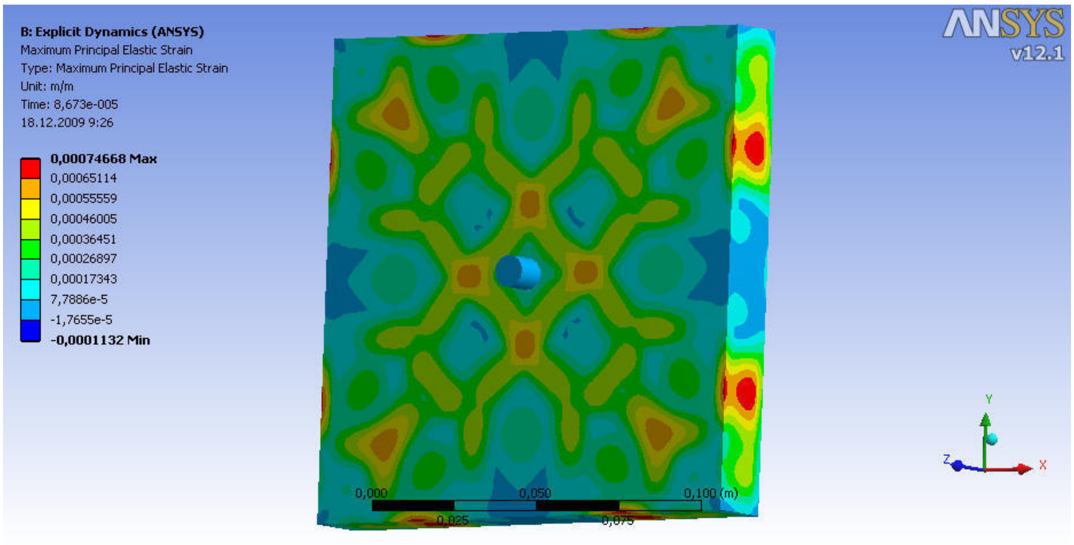

Рис. 1а. – Максимальные нормальные упругие напряжения

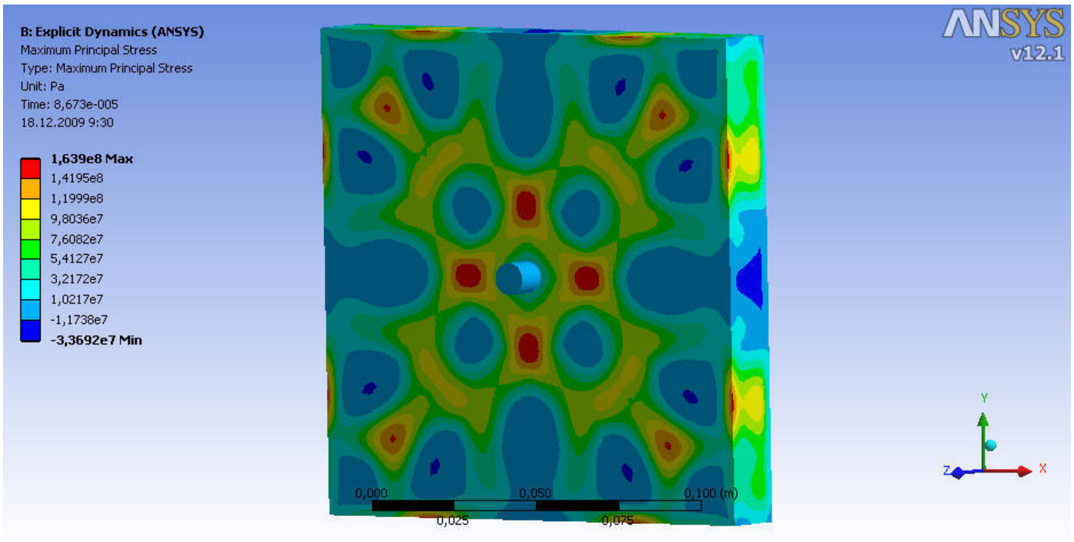

Рис. 1б. – Максимальные нормальные напряжения

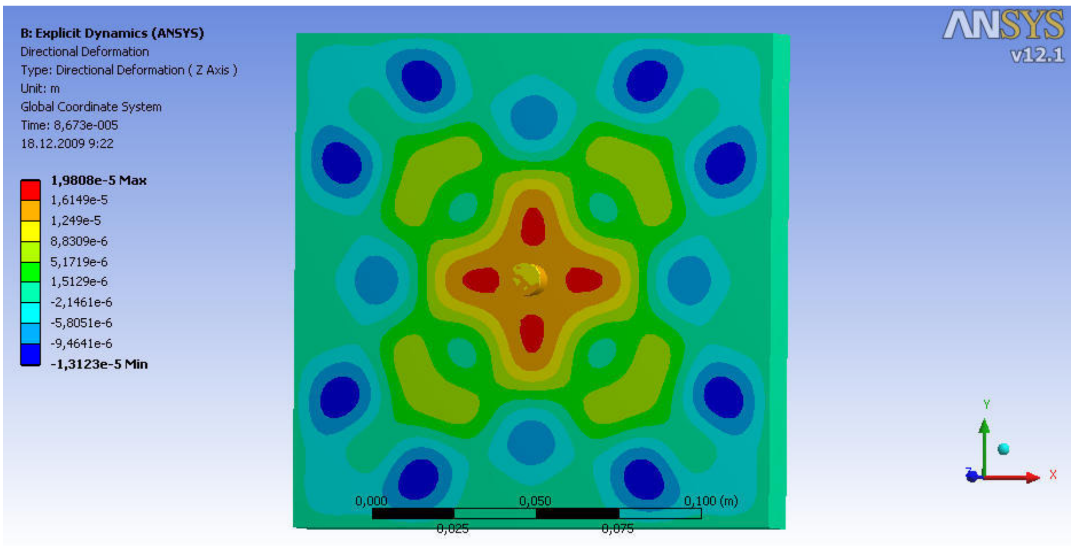

Рис. 1в. – Перемещения относительно Z

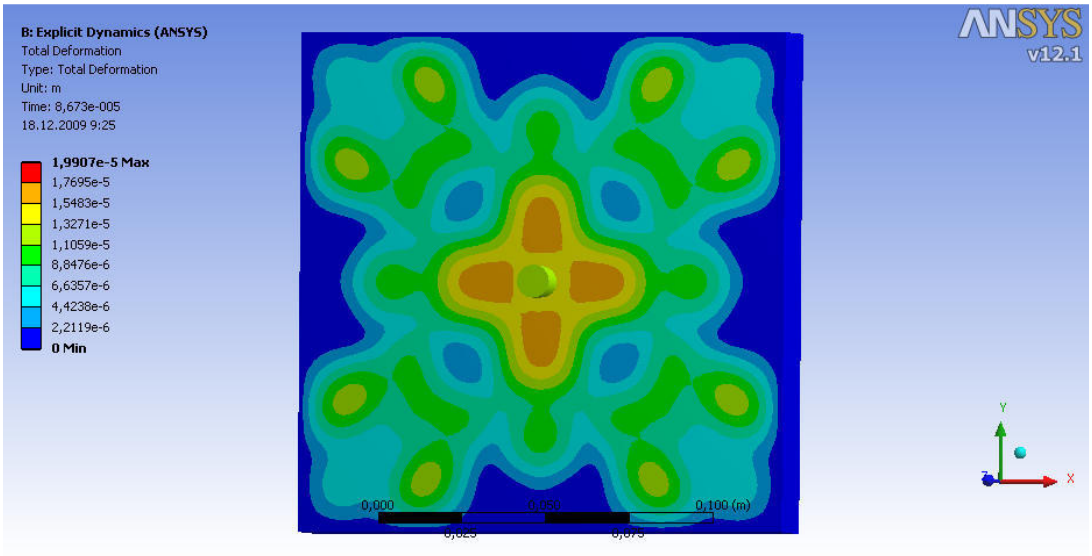

Рис. 1г. – Полное перемещение

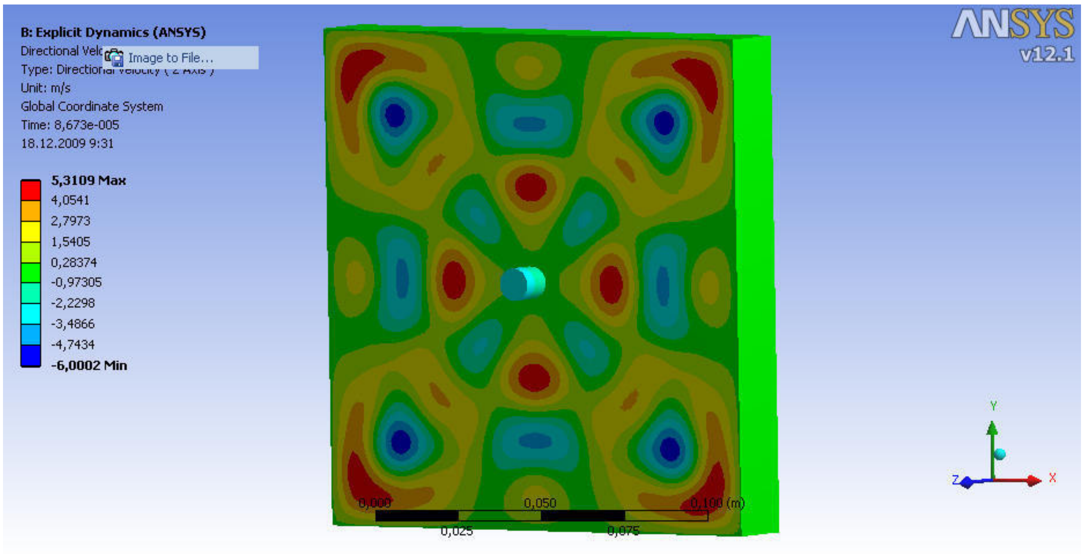

Рис. 1д. – Скорость относительно Z

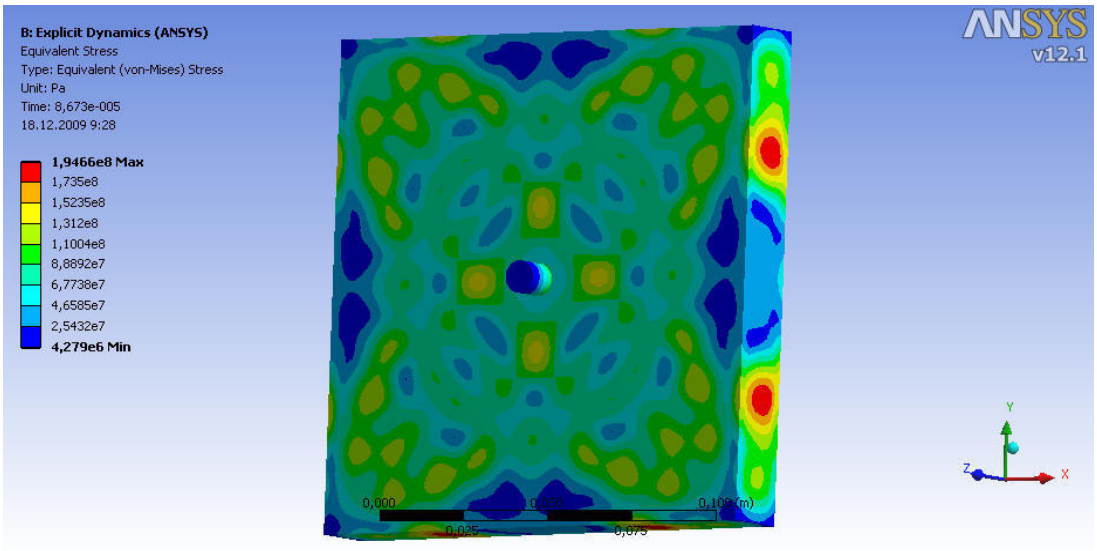

Рис. 1е. – Эквивалентные напряжения

б) на рисунках 2а – 2в показаны результаты определения предельной толщины преграды из материала сталь3 (она составила 15мм) для ударника цилиндрической формы из того же материала (m = 9,5г).

В общем случае критическая скорость пробития преграды может быть определена:

$$v_{кр} = \left[v_{пп}^2 - v_{зп}^2 \exp\left(2\chi^* \cdot {}^{m_n}\!\!\diagup\!{}_{m_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (7)$$

где m_n – масса материала преграды, выбитого ударником;

χ^* – уточненный параметр.

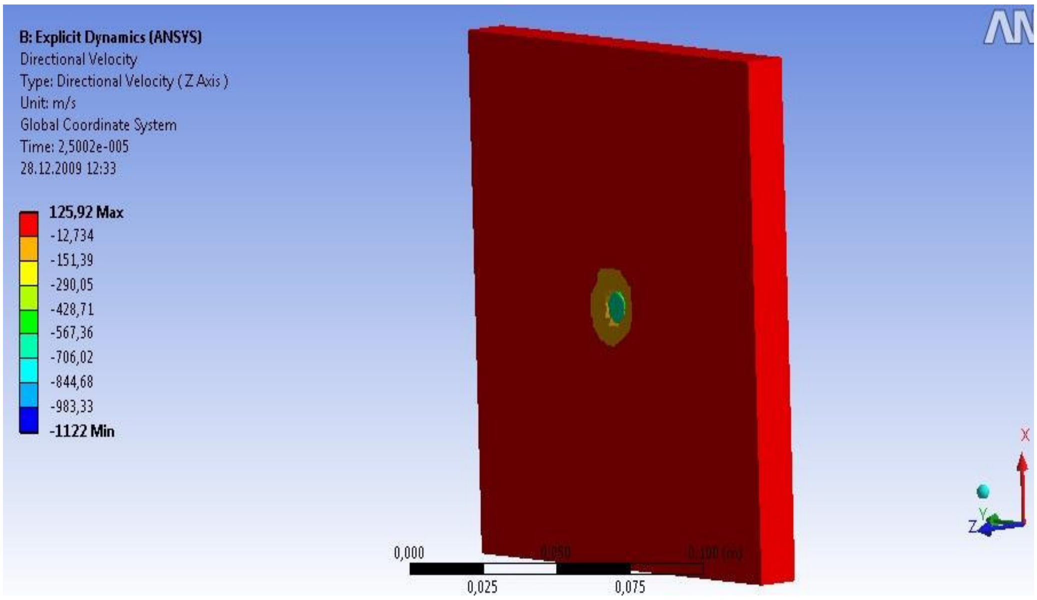

Рис. 2а. – Определение предельной толщины преграды в начальный момент времени

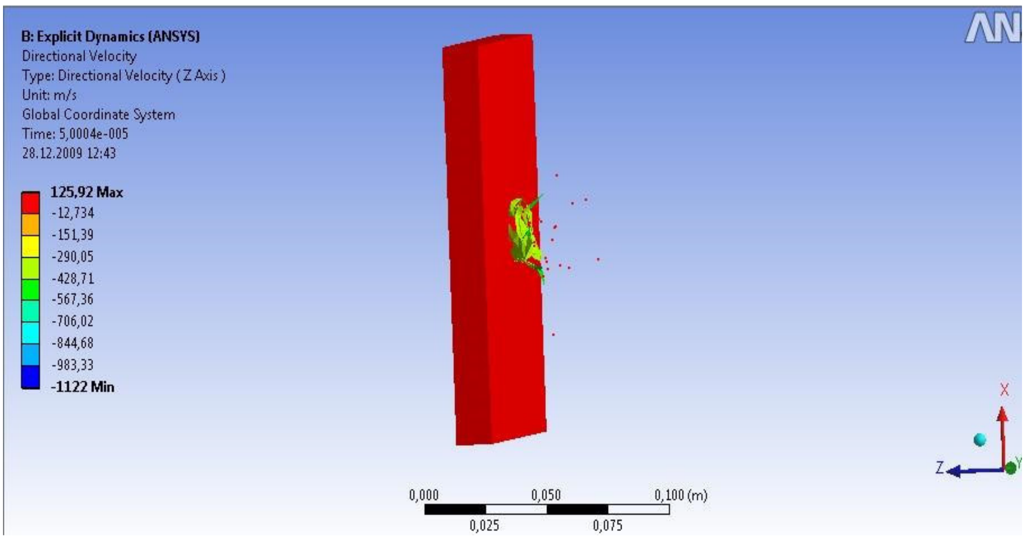

Рис. 2б. – Определение предельной толщины преграды в момент завершения пробития преграды

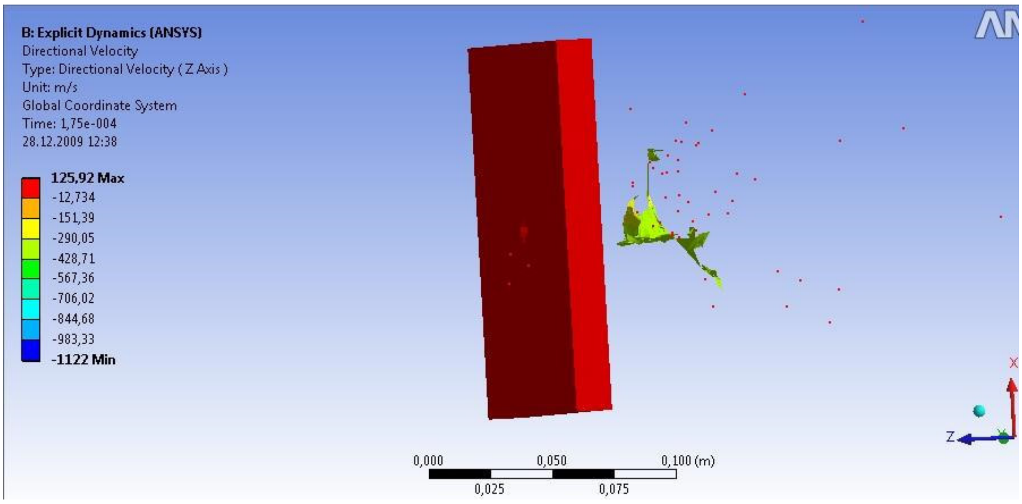

Рис. 2в. – Определение предельной толщины преграды. Завершающая фаза

Из выражения (7) определим $v_{зп}$. С учетом того, что при скоростях ~ $0{,}3 \div 1{,}0$ км/с сопротивляемость проникновению ударника $f = H_д + \chi^* \rho_n v_{nn}$, получим:

$$v_{зп} = \left[\frac{v_{nn}^2}{\exp\left(2\chi^* {m_n}/{m_0}\right)} - \frac{H_д}{\chi^* \rho_n} \left[\exp\left(2\chi^* {m_n}/{m_0}\right) - 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

Скорость перед преградой определяется выражением:

$$v_{nn} = v_0 / \exp(-c_x \rho_в Sl / 2m_0), \tag{9}$$

где c_x – коэффициент сопротивления ударника;

$\rho_в$ – плотность воздуха;

l – расстояние до преграды;

v_0 – начальная скорость ударника (пули).

Аэродинамическое давление от действия скоростного напора $q = \rho v^2 / 2$ при асимметричном обтекании ударника для конуса определим:

$$P = 2q \sin^2 \beta, \tag{10}$$

где β – угол полураствора конуса.

С учетом отличия формы ударника от конуса запишем:

$$P = 2q\chi^*. \tag{11}$$

Введем коэффициент $\xi = S\rho_n h / m_0$, где ρ_n – плотность материала преграды. Так как $B = 2S\chi\rho / m_0$, с учетом (9), выражение (8) запишется в виде:

$$v_{зп} = \left\{ \left(\frac{v_0}{(1+\xi)\exp[-c_x \rho_в Sl/2m_0]} \right)^2 - \sigma_в \left[\frac{3{,}35h(1+0{,}75\xi)}{d_0\rho_0(1+\xi^2)} + \frac{2{,}82h}{d_0\rho_0(1+\xi)} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Проведенные расчеты позволили определить параметры ударников за преградой (табл. 1) и критическую скорость пробивания (табл. 2).

Таблица 1. – Параметры ударников за преградой

Толщина преграды δ мм [Ст.3]	d пули после пробития, мм	$v_{зп}$,м/с (скорость за преградой)	d пули после пробития, мм	$v_{зп}$,м/с (скорость за преградой)
	Пуля 7,62×51М m_0=9,1г, $v_{пп}$=810 м/с		Пуля 7,62×54R m_0=13г, $v_{пп}$=705 м/с	
2	8	780	8	675
4	12	715	14	605
8	16	550	18	450

Таблица 2. – Критическая скорость пробивания

Толщина преграды δ мм [Ст.3]	4	8	14
$v_{кр}$, м/с (критическая скорость пробивания)	440	630	850

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бушман, А.В. и др.* Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий [Текст] / А.В. Бушман, Г.И. Канель, А.Л. Ни. – Черноголовка: Изд. ИХФ АН СССР, 1988. – 198 с.
2. *Сахабудинов, Р.В. и др.* Научно-методические основы обеспечения физической защиты ядерноопасных объектов [Текст] / Р.В. Сахабудинов, О.А. Губеладзе. – Ростов-на-Дону: ООО «Терра», 2006. – 153 с.
3. *Горельский, В.А. и др.* Исследование пробивания преград при несимметричном высокоскоростном ударе с учетом разрушения и тепловых эффектов [Текст] / В.А. Горельский, С.А. Зелепугин, В.Ф. Толкачев // Изв. АН РФ. Механика твердого тела. – 1994. – №5. – С. 121–130.
4. *Афанасьев, С.А. и др.* Численное моделирование разрушения конструкции с керамическим слоем при динамическом нагружении удлиненным ударником [Текст] С.А. Афанасьев, А.Н. Белобородько, В.А. Григорян // Изв. АН РФ. Механика твердого тела. – 1996. – №1. – С. 114–123.

REFERENCES

[1] Bushman A.V., Kanel' G.I., Ni A.L. Teplofizika i dinamika intensivnyh impul'snyh vozdejstvij [Thermophysics and dynamics of intensive pulse influences], Chernogodovka: Izd. IHF AN SSSR [IHPh Academy of Sciences, USSR], 1988, p. 198. (in Russian)

[2] Sakhabudinov, R.V. i dr. Nauchno-metodicheskiye osnovy obespecheniya fizicheskoy zashchity yadernoopasnykh obyektov [Scientific and methodical bases of ensuring physical protection of nuclear-dangerous objects]. Rostov-na-Donu: OOO «Terra» [JSC Terra], 2006, 153 p. (in Russian)

[3] Gorelsky, V.A. i dr. Issledovaniye probivaniya pregrad pri nesimmetrichnom vysokoskorostnom udare s uchetom razrusheniya i teplovykh effektov [Research of punching of barriers at asymmetrical high-speed blow taking into account destruction and

thermal effects] Izvestia AN RF. Mekhanika tverdogo tela.[Russian Federation Academy of Sciences News. Mechanics of a solid body], 1994, Vol. 5, ISSN 0572-3299, p. 121–130. (in Russian)

[4] Afanasyev, S.A. i dr. Chislennoye modelirovaniye razrusheniya konstruktsii s keramicheskim sloyem pri dinamicheskom nagruzhenii udlinennym udarnikom [Numerical modeling of destruction of a design with a ceramic layer at dynamic loading by the extended drummer] Izv. AN RF. Mekhanika tverdogo tela. [Russian Federation Academy of Sciences News. Mechanics of a solid body], 1996, Vol. 1, ISSN 0572-3299, p. 114–123. (in Russian)

Modeling of High Speed Blow

O.A. Gubeladze

Volgodonsk Engineering Technical Institute
the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360
e-mail: geodez@aaanet.ru

Abstract – The problem of dynamic contact problems solution of interaction of a cylindrical form drummer with a barrier on a normal by numerical methods is considered.

Keywords: dynamic contact task, numerical methods, drummer.