МЕХАНИКА

УДК 539.3

Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, С.А. Афанасьева, О.Ю. Федосов, А.А. Югов, Р.С. Мамцев

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЁННЫХ СТАЛЕБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ СОСТАВНЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ УДАРНИКОМ[1]

Представлена математическая модель поведения бетона в условиях ударно-волнового нагружения. В рамках данной модели методом конечных элементов, модифицированным на решение динамических задач, в полной трёхмерной постановке проведено решение задачи о высокоскоростном ударе стального стержня в дюралюминиевой оболочке по конструкции, представляющей набор пространственно-разнесённых сталебетонных плит при различных скоростях и углах встречи.

Ключевые слова: *математическое моделирование, высокоскоростное соударение, бетон, сталебетонные плиты, составной ударник, разрушение, динамическая прочность.*

При проектировании железобетонных конструкций многих промышленных объектов возникает необходимость оценки их способности противостоять динамическим нагрузкам [1, 2]. Исследование их прочности экспериментальными методами без глубокого теоретического анализа не даёт необходимого результата, несмотря на огромные материальные затраты.

В [2, 3–11] предложена математическая модель, описывающая поведение конструкционных материалов, в том числе бетона, в условиях ударно-волнового нагружения. Разрушение материалов в рамках данной модели описывается как процесс роста и слияния микродефектов под действием образующихся в процессе нагружния напряжений. Модель реализована в программном комплексе «РАНЕТ-3» [12], предназначенном для решения задач удара и взрыва в полной трёхмерной постановке модифицированным на решение динамических задач методом конечных элементов [1, 2]. В программном комплексе имеется специальный блок подпрограмм для расчёта элементов железобетонного каркаса на взрывные и ударные нагрузки. В частности, данный комплекс использовался для исследований прочности бетонных, железобетонных и стальных трубобетонных моделей колонн на неоднократные торцевые и поперечные удары падающего груза на копровой установке [2, 13], а также бетонных и железобетонных плит на высокоскоростной удар стальными цилиндрическими ударниками [2, 14]. В [1, 15] представлены результаты математического моделирования динамики соударения модельного сна-

[1] Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-01-00573а.

ряда с конструкциями из прямоугольных бетонных плит и песчаного грунта и результаты математического моделирования процессов ударного взаимодействия стального цилиндрического ударника с железобетонной стеной обстройки реакторного отделения АЭС.

В данной работе комплекс программ «РАНЕТ-3» используется для анализа прочности конструкций, представляющих собой набор пространственно-разнесённых сталебетонных плит, на высокоскоростной удар стального стержня в дюралюминиевой оболочке.

1. Математическая модель поведения бетона при ударно-волновом нагружении

Бетон содержит большое число концентраторов напряжений-пор, границ зерен, трещин, зарождение разрушения на которых происходит в области упругого деформирования. Микроразрушения в бетоне могут появиться при сжатии под действием девиаторных напряжений, что приводит к падению сопротивления разрушению.

Удельный объем пористой среды υ представляется в виде суммы удельного объема материала матрицы υ_m, удельного объема пор υ_p и удельного объема υ_t, образующегося при раскрытии трещин: $\upsilon = \upsilon_m + \upsilon_p + \upsilon_t$. Пористость материала характеризуется относительным объемом пустот $\xi = \xi_p + \xi_t$, либо параметром $\alpha = \upsilon / \upsilon_m$, которые связаны зависимостью $\alpha = 1/(1-\xi)$. Здесь $\xi_p = \upsilon_p / \upsilon$, $\xi_t = \upsilon_t / \upsilon$ – относительные объемы пор и трещин соответственно[2, 7–8].

Система уравнений, описывающих движение пористой упругопластической среды, имеет вид

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho dV = 0,$$

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho \boldsymbol{u} dV = \int_S \boldsymbol{n}\cdot\sigma dS,$$

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho E dV = \int_S \boldsymbol{n}\cdot\sigma\cdot\boldsymbol{u} dS, \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{e} = \frac{\boldsymbol{s}^{CR}}{2\mu} + \lambda \boldsymbol{s},$$

$$\boldsymbol{s}:\boldsymbol{s} = \frac{2}{3}\sigma_T^2,$$

$$p = \frac{\rho_0}{\alpha}\left[\gamma_0\varepsilon + \frac{c_0^2(1-\gamma_0\eta/2)\eta}{(1-S_0\eta)^2}\right],$$

где t – время; V – объем интегрирования; S – поверхность объема интегрирования; $\boldsymbol{n}$ – единичный вектор внешней нормали; ρ – плотность; $\sigma = -p\boldsymbol{g} + \boldsymbol{s}$ – тензор напряжений; $\boldsymbol{s}$ – девиатор тензора напряжений; p – давление; $\boldsymbol{g}$ – метрический тензор; $\boldsymbol{u}$ – вектор скорости; $E = \varepsilon + \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{u}/2$ – удельная полная энергия; ε – удельная внутренняя энергия; $\boldsymbol{e} = \boldsymbol{d} - (\boldsymbol{d}:\boldsymbol{g})\boldsymbol{g}/3$ – девиатор тензора скоростей деформаций;

$\boldsymbol{d} = (\nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T)/2$ – тензор скоростей деформаций; $\boldsymbol{s}^{CR} = \dot{\boldsymbol{s}} + \nabla \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{s} + \boldsymbol{s} \cdot \nabla \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}$ – корротационная производная Коттер и Равлина; $\mu = \mu_0 (1-\xi)\left[\dfrac{1-(6\rho_0 c_0^2 + 12\mu_0)\xi}{(9\rho_0 c_0^2 + 8\mu_0)}\right]$ – модуль сдвига; $\sigma_T = \left[\sigma_{\min} + \dfrac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})kp}{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) + kp}\right] / \alpha$ – предел текучести; ρ_0, c_0, μ_0, $\sigma_{\min}$, $\sigma_{\max}$, k, S_0, γ_0 – константы материала матрицы; $\eta = 1 - \rho_0 \upsilon / \alpha$. Параметр λ исключается с помощью условия текучести.

Для замыкания системы (1) необходимы уравнения, описывающие изменение параметра α при растяжении и сжатии.

Разрушение хрупких материалов происходит главным образом в связи с возникновением и ростом микротрещин. Максимальное упругое полураскрытие монетообразной трещины под действием растягивающего напряжения, перпендикулярного плоскости трещины, определяется из соотношения [16, 17]

$$\delta = -\frac{2(1-\nu)}{\pi \mu_0} R p_m ,$$

где ν – коэффициент Пуассона; R – радиус трещины; $p_m = \alpha p$ – давление в материале матрицы.

Предполагая, что при раскрытии трещины ее берега образуют эллипсоид вращения с полуосями δ, R, R, найдем объем трещины:

$$V_T = -\frac{8(1-\nu)}{3\mu_0} R^3 \alpha p . \tag{2}$$

Пусть в процессе нагружения не происходит образования новых трещин, а деформирование материала сопровождается ростом изначально существующих с характерным размером R. Тогда из (2) следует

$$\xi_t = -\frac{8(1-\nu)}{3\mu_0} N_0 R^3 \alpha p , \tag{3}$$

где N_0 – число трещин в единице объема.

Считая, что до начала фрагментирования поврежденного трещинами материала объем пор остается неизменным и равен ξ_0, получим

$$\xi_t = \xi - \xi_0 = \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_0 \alpha} . \tag{4}$$

Подставляя (4) в (3), окончательно имеем

$$p = -\frac{3\mu_0 (\alpha - \alpha_0)}{8(1-\nu) N_0 \alpha_0 R^3 \alpha^2} . \tag{5}$$

Рост трещин определяется уравнением

$$\dot{R} / R = F_1 + F_2 ,$$

где $F_1 = (\alpha s_i - s_*)/\eta_1$ при $\alpha s_i > s_*$; $F_1 = 0$ при $\alpha s_i \le s_*$; $F_2 = (|\alpha p| - p_*)/\eta_2$ при $p < 0 \wedge |\alpha p| > p_*$; $F_2 = 0$ при $p \ge 0 \vee |\alpha p| \le p_*$; $s_i = \sqrt{\frac{3}{2} \boldsymbol{s} : \boldsymbol{s}}$; $s_* = s_{01}(1 - R/R_*)$; $p_* = (1 - R/R_*)$; $R_* = \beta / \sqrt[3]{N_0}$; $s_{01}, p_0, \eta_1, \eta_2, \beta$ – константы материала.

Из последнего уравнения системы (1) и (5) получаем уравнение для определения параметра α при упругом деформировании бетона

$$\gamma_0\varepsilon\rho_0 + \frac{\rho_0 c_0^2(1-\gamma_0\eta/2)\eta}{(1-S_0\eta)^2} + \frac{3\mu_0(\alpha-\alpha_0)}{8(1-\nu)N_0\alpha_0 R^3\alpha} = 0\,. \qquad (6)$$

Предполагается, что слияние микротрещин начинается, когда их характерный размер R при постоянном числе трещин в единице объема N_0 достигает критической величины $R_* = \beta/\sqrt[3]{N_0}$. Процесс фрагментирования поврежденного трещинами материала и поведение разрушенного материала описывается в рамках модели пористой упругопластической среды. Система (1) замыкается уравнениями, связывающими давление p и пористость α при сжатии:

$$\gamma_0\varepsilon\rho_0 + \frac{\rho_0 c_0^2(1-\gamma_0\eta/2)\eta}{(1-S_0\eta)^2} - \frac{2}{3}\alpha\sigma_T \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right) = 0 \text{ при } p \ge \frac{2}{3}\sigma_T \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right), \qquad (7)$$

и при разгрузке:

$$\gamma_0\varepsilon\rho_0 + \frac{\rho_0 c_0^2(1-\gamma_0\eta/2)\eta}{(1-S_0\eta)^2} + a_s \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right) = 0 \text{ при } p \le -\frac{a_s}{\alpha}\ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right). \qquad (8)$$

Фрагментация поврежденного трещинами материала, подвергнутого воздействию растягивающих напряжений, происходит, когда относительный объем пустот достигает критической величины

$$\xi_* = \frac{\alpha_* - 1}{\alpha_*}.$$

Если поврежденный трещинами материал подвергнут воздействию сжимающих напряжений, то критерием фрагментирования является предельная величина интенсивности пластических деформаций

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{3T_2 - T_1^2}\,,$$

где T_1, T_2 – первый и второй инварианты тензора деформаций соответственно.

При растяжении фрагментированный материал описывается как порошок, движение которого происходит в соответствии с уравнениями среды, лишенной напряжений.

2. Результаты математического моделирования

Методом компьютерного моделирования в диапазоне скоростей 700–1500 м/с исследованы процессы ударного взаимодействия составных металлических ударников массой 125 г с двумя типами защитных конструкций, представляющих собой наборы из пространственно-разнесенных сталебетонных плит. Сталебетонная плита состоит из двух слоев бетона толщиной $h_б$, разделенных стальным листом толщиной $h_{ст}$. Расстояние между плитами 200 мм. Ударник представляет собой стальной стержень диаметром 14 мм и длиной 52 мм, помещенный в оболочку из дюралюминиевого сплава. Длина составного ударника $L_0 = 81$ мм, его диаметр $d_0 = 23$ мм ($L_0/d_0 = 3{,}52$). В первом варианте защитных конструкций толщина бетонных слоев $h_б = 15$ мм, стального листа – $h_{ст} = 1$ мм, общая толщина сталебетонной плиты $h = 31$ мм. Во втором варианте – $h_б = 30$ мм, $h_{ст} = 2{,}5$ мм, общая толщина сталебетонной плиты $h = 62{,}5$ мм. Считалось, что стальной лист выполнен из стали марки ЭИ 712, имеющей высокие прочностные характеристики.

В расчете на границе раздела материалов в ударнике ставилось условие жесткого сцепления, т.е. отсутствия проскальзывания материалов друг относительно друга и отделения дюралюминиевой оболочки от стального стержня в процессе внедрения в мишень.

В табл. 1 приведены результаты расчёта ударного взаимодействия ударника с пространственно-разнесёнными мишенями, состоящими из сталебетонных преград первого типа ($h_б = 15$ мм, $h_{ст} = 1$ мм, $h = 31$ мм), при взаимодействии по нормали ($\beta_0 = 0°$, β_0 – угол, образованный осью симметрии ударника с нормалью к лицевой поверхности мишени) со скоростями $u_0 = 700$ м/с и $u_0 = 1500$ м/с, где обозначено: $d_л$ – диаметр лицевого откола, $d_т$ – диаметр тыльного откола в сталебетонных плитах, $d_с$ – диаметр отверстия в стальном листе, L – длина и m – масса остатка ударника после пробития преграды, h_Σ – суммарная глубина проникания в мишени без учёта прогиба стального листа последней мишени. После пробития преграды остаток ударника обладает скоростью центра масс u.

Таблица 1

Результаты соударения ударника с набором пространственно-разнесенных преград первого типа

u_0, м/с	β_0, град.	№ прег.	$d_л/d_0$	$d_с/d_0$	$d_т/d_0$	L/d_0	m, г	u, м/с
700	0	1	2,56	1,60	4,48	2,72	113,0	444
		2	3,52	1,60	5,20	2,64	109,3	297
		3	5,60	1,44	5,92	2,64	109,2	181
		4	-	-		2,45	109,1	
1500	0	1	2,56	1,92	3,52	2,24	101,6	1160
		2	2,72	1,92	3,60	2,0	84,4	816
		3	3,6	1,6	3,20	1,84	75,6	572
		4	3,52	1,28	3,36	1,68	72,7	383
		5	4,24	1,28	4,08	1,65	69,8	258
		6	-	-	-	-	55,3	

На рис. 1 приведена картина последовательного взаимодействия ударника со сталебетонными плитами (*а* – начальная конфигурация, *б* – побитие первой, *в* – второй, *г* – третьей преград, *д* – взаимодействие с четвёртой преградой) при скорости $u_0 = 700$ м/с и $\beta_0 = 0°$.

При взаимодействии с первой преградой дюралюминиевая оболочка ударника в области головной части полностью срабатывается, в то же время стальной стержень остаётся практически недеформированным. С тыльной стороны в слое бетона образуется откол диаметром $d_т = 4{,}48\ d_0$. После пробития первой преграды деформированный остаток ударника массой $m = 113$ г и удлинением $L/d_0 = 2{,}78$ имеет скорость $u = 444$ м/с. Этой скорости достаточно для пробития ещё двух сталебетонных плит. За третьей преградой остаток ударника ($L/d_0 = 2{,}64$, $m = 109{,}2$ г) имеет скорость $u = 181$ м/с, которой недостаточно для пробития последующей преграды. Он останавливается в четвертой преграде при взаимодействии со стальным листом. Суммарная глубина проникания ударника в мишени h_Σ составила 108 мм.

На рис. 2 приведена картина последовательного взаимодействия ударника со сталебетонными плитами (*а* – начальная конфигурация, *б* – побитие первой, *в* – второй, *г* – третьей, *д* – четвертой, *е* – пятой преград) при скорости $u_0 = 1500$ м/с и $\beta_0 = 0°$.

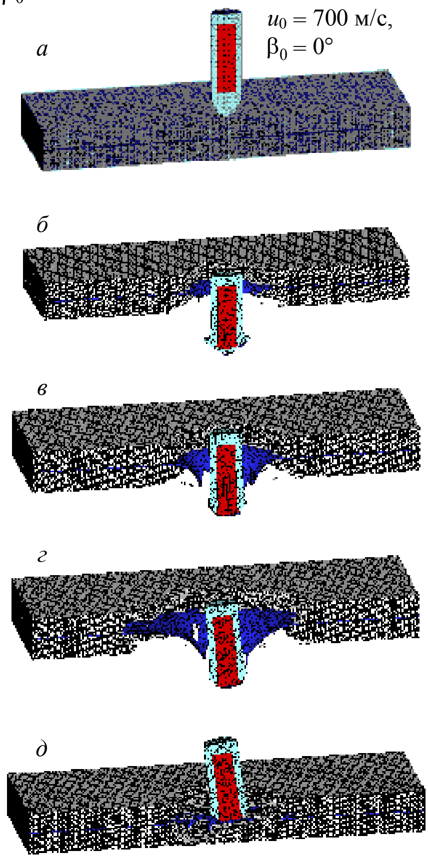

Рис. 1. Конфигурации ударника и сталебетонных плит первого типа при ударном взаимодействии с четырьмя преградами

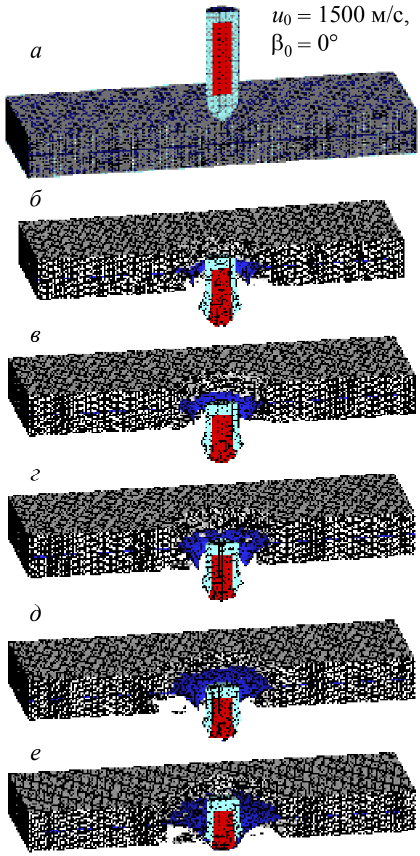

Рис. 2. Конфигурации ударника и сталебетонных плит первого типа при ударном взаимодействии с пятью преградами

В данном случае ударник пробивает пять преград и застревает в шестой. За пятой преградой остаток ударника массой $m = 69{,}8$ г и удлинением $L/d_0 = 1{,}65$ имеет скорость $u = 258$ м/с. В момент остановки его в шестой преграде $m = 55{,}3$ г. Суммарная глубина проникания ударника в мишень h_Σ составляет 170 мм.

В табл. 2 приведены результаты расчёта ударного взаимодействия ударника с пространственно-разнесёнными мишенями, состоящими из сталебетонных преград второго типа ($h_б = 30$ мм, $h_{ст} = 2{,}5$ мм, $h = 62{,}5$ мм), при $u_0 = 700$ м/с и $u_0 = 1500$ м/с и β_0: 0°, 45°, 60°.

При $u_0 = 700$ м/с и $\beta_0 = 0°$ ударник пробивает первую преграду и застревает во второй. На момент остановки деформированного остатка ударника ($L/d_0 = 2{,}38$, $m = 106{,}7$ г) в преграде образовались отколы с лицевой стороны диаметром $d_л = 3{,}08d_0$ и тыльный стороны диаметром $d_т = 2{,}5d_0$. Пробитие второй преграды определяется прочностными характеристиками стального листа, так как под ним бетонный слой в области действия остатка ударника разрушен. Таким образом, вторая преграда находится на пределе пробития. Суммарная глубина проникания h_Σ составила 92,5 мм, что на 15,5 мм меньше, чем при взаимодействии с защитной конструкцией первого типа. Суммарная глубина проникания в разнесённые мишени с учётом изгиба стального листа в непробитой мишени $h_\Sigma^1 = 112{,}2$ мм. Увеличение скорости удара до 1500 м/с при $\beta_0 = 0°$ приводит к тому, что снаряд пробивает две преграды. Как и в предыдущем случае, третья преграда находится на пределе пробития. С тыльной стороны третьей преграды произошёл откол во втором бетонном слое диаметром $d_т = 2{,}69\ d_0$. Суммарная глубина проникания h_Σ составила 155 мм, что на 15 мм меньше, чем при взаимодействии с защитной конструкцией первого типа. Суммарная глубина проникания в мишени с учётом прогиба стального листа третьей мишени $h_\Sigma^1 = 173{,}6$ мм.

Таблица 2

Результаты расчетов соударения ударника с набором пространственно-разнесенных преград второго типа

u_0, м/с	β_0, град.	№ прег.	$d_л/d_0$	$d_с/d_0$	$d_т/d_0$	L/d_0	m, г	u, м/с
700	0	1	2,31	2,54	3,08	2,54	109,2	215
		2	3,08	-	2,5	2,38	106,7	-
1500	0	1	3,08	1,92	4,46	1,77	70,6	780
		2	3,53	1,69	3,08	1,46	58,0	338
		3	3,69	-	2,69	1,33	54,5	-
700	45	1	3,86	-	3,86	2,46	107,1	-
1500	45	1	4,42	2,57	4,86	1,57	65,6	530
		2	6,42	-	3,57	1,47	61,1	-
1500	60	1	8,57	3,42	7,14	2,0	69,6	231
		2	7,14	-	-	1,5	65,7	-

В табл. 3 представлены результаты расчёта ударного взаимодействия ударника с пространственно-разнесёнными мишенями, состоящими из сталебетонных преград первого типа, при $u_0 = 700$ м/с и $u_0 = 1500$ м/с и $\beta_0 = 45°$ и $\beta_0 = 60°$.

Таблица 3

Результаты соударения ударника с набором пространственно-разнесенных преград первого типа

u_0, м/с	β_0, град.	№ прег.	$d_л/d_0$	$d_с/d_0$	$d_т/d_0$	L/d_0	m, г	u, м/с
700	45	1	3,57	2,86	4,28	2,57	111,4	375
		2	4,57	2,86	4,00	2,50	110,6	146
		3	-	-	-	-	-	-
700	60	1	6,42	5,00	8,00	2,64	114,1	211
		2	-	-	-	-	-	-
1500	45	1	3,57	2,86	4,57	2,14	94,3	976
		2	3,71	2,57	3,71	1,86	78,8	576
		3	4,71	2,28	5,28	1,78	73,4	260
		4	-	-	-	1,74	72,5	-
1500	60	1	5,56	4,44	6,67	1,89	85	741
		2	4,21	1,20	3,01	1,81	76,1	277

На рис. 3 приведена картина последовательного взаимодействия ударника со сталебетонными плитами (*а* – начальная конфигурация, *б* – побитие первой, *в* – второй преграды) при скорости $u_0 = 700$ м/с и $\beta_0 = 45°$. В данном случае ударник пробивает две преграды и застревает в третьей. За второй преградой деформированный остаток ударника ($L/d_0 = 2{,}62$, $m = 110{,}6$ г) имеет вертикальную составляющую скорости $u = 146$ м/с. Удар по следующей преграде наносится боковой поверхностью остатка ударника, поэтому данной скорости недостаточно для пробития третьей преграды. Суммарная глубина проникания в мишени h_Σ не превышает 77 мм.

На рис. 4 приведена картина последовательного взаимодействия ударника со сталебетонными плитами (*а* – начальная конфигурация, *б* – побитие первой, *в* – второй, *г* – третьей преграды и *д* – взаимодействие с четвертой преградой) при скорости $u_0 = 1500$ м/с и $\beta_0 = 45°$. В данном случае происходит пробитие трёх преград. За третьей преградой деформированный ударник ($L/d_0 = 1{,}78$, $m = 73{,}4$ г) имеет вертикальную составляющую скорости $u = 260$ м/с. На момент прекращения расчёта деформированный ударник имел вертикальную составляющую скорости $u = 184$ м/с. Этой скорости недостаточно для пробития стального листа четвёртой преграды при ударе боковой поверхностью. Таким образом, суммарная глубина проникания h_Σ не превышает 108 мм.

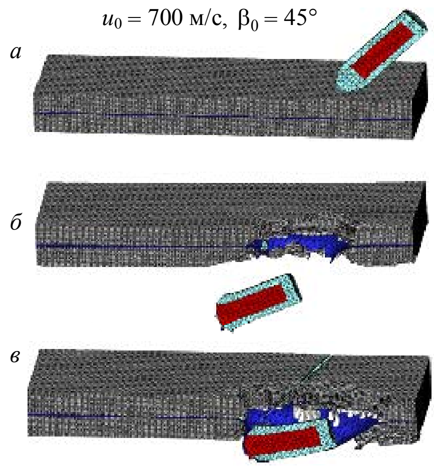

Рис. 3. Конфигурации ударника и сталебетонных плит первого типа при ударном взаимодействии с двумя преградами

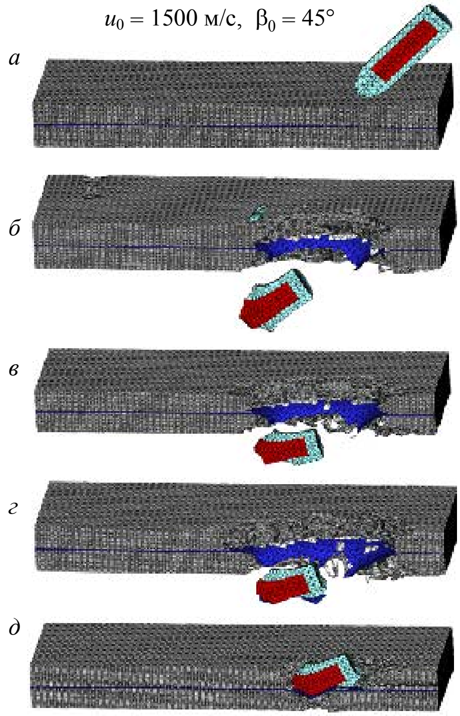

Рис. 4. Конфигурации ударника и сталебетонных плит первого типа при ударном взаимодействии с четырьмя преградами

На рис. 5 и рис. 6 приведена картина последовательного взаимодействия ударника со сталебетонными плитами со скоростями u_0 : 700 м/с и 1500 м/с при $\beta_0 = 60°$. Увеличение угла встречи приводит к снижению суммарной глубины проникания ударника. Так при скорости удара 700 м/с и угле подхода 60° ударник пробивает лишь первую преграду и застревает во второй (на рис. 5 представлено: *а* – начальная конфигурация, *б* – побитие первой преграды). Суммарная глубина проникания $h_\Sigma \le 46$ мм . Следует отметить, что при данной скорости удара и угле подхода к мишеням второго типа глубина проникания в мишень $h_\Sigma = 30$ мм. Ударник пробил первый слой бетона и остановился при взаимодействии со стальным листом.

$u_0 = 700$ м/с, $\beta_0 = 60°$

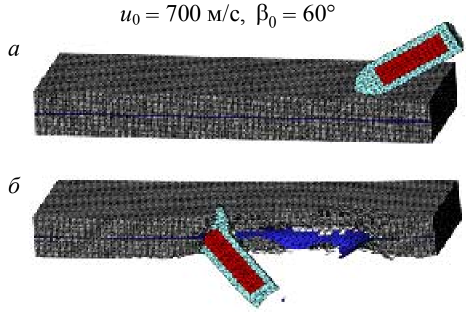

Рис. 5. Конфигурации ударника и сталебетонной плиты первого типа
при ударном взаимодействии

$u_0 = 1500$ м/с, $\beta_0 = 60°$

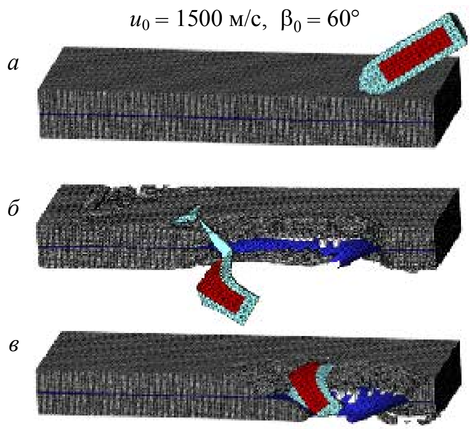

Рис. 6. Конфигурации ударника и сталебетонных плит первого типа
при ударном взаимодействии с двумя преградами

Увеличение скорости до 1500 м/с приводит к тому, что ударник пробивает обе преграды. После пробития второй преграды (рис. 6, *б*) он имеет вертикальную составляющую скорости $u = 277$ м/с. С этой скоростью он взаимодействует боковой поверхностью со второй преградой (рис. 6, *в*), двигаясь вдоль неё до полной остановки, не выходя за тыльную поверхность. При этом $h_\Sigma = 62$ мм. При таких же параметрах ударного взаимодействия ударника с системой пространственно-разнесённых мишеней второго типа $h_\Sigma = 92{,}5$ мм.

Представленные результаты математического моделирования демонстрируют возможность использования вычислительного комплекса «РАНЕТ-3» при исследовании прочности конструкций, в том числе представляющих набор пространственно-разнесённых сталебетонных плит, на высокоскоростной удар тел произвольной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белов Н.Н.*, *Копаница Д.Г.*, *Кумпяк О.Г.*, *Югов Н.Т.* Расчёт железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки. Northampton: STT; Томск: STT, 2004. 466 с.
2. *Белов Н.Н.*, *Кабанцев О.В.*, *Копаница Д.Г.*, *Югов Н.Т.* Расчётно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций. Томск: STT, 2008. 292 с.
3. *Белов Н.Н.*, *Югов Н.Т.*, *Копаница Д.Г.*, *Югов А.А.* Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. Northampton: STT; Томск: STT, 2005. 360 с.
4. *Белов Н.Н.*, *Корнеев А.И.*, *Николаев А.П.* Численный анализ разрушения в плитах при действии импульсных нагрузок // ПМТФ. 1985. № 3. С. 132–136.
5. *Белов Н.Н.*, *Демидов В.Н.*, *Ефремова Л.В. и др.* Компьютерное моделирование динамики высокоскоростного удара и сопутствующих физических явлений // Изв. вузов. Физика. 1982. № 8. С. 5–48.
6. *Афанасьева С.А.*, *Белов Н.Н.*, *Толкачев В.Ф. и др.* Особенности ударно-волнового деформирования пористой керамики Al_2O_3 //Докл. РАН. 1999. Т. 368. № 4. С. 477–479.
7. *Белов Н.Н.*, *Югов Н.Т.*, *Афанасьева С.А. и др.* Исследование процессов деформирования и разрушения хрупких материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2001. Т. 7. № 2. С. 131–142.
8. *Белов Н.Н.*, *Югов Н.Т.*, *Копаница Д.Г.*, *Югов А.А.* Модель динамического разрушения мелкозернистого бетона //Вестник ТГАСУ. 2005. № 1. С. 14–22.
9. *Белов Н.Н.*, *Дзюба П.В.*, *Кабанцев О.В.*, *и др.* Математическое моделирование процессов динамического разрушения бетона // Механика твердого тела. 2008. № 2. С. 124–133.
10. *Белов Н.Н.*, *Кабанцев О.В.*, *Коняев А.А и др.* Расчёт прочности железобетона на ударные нагрузки // ПМТФ. 2006. Т. 47. № 6. С. 165–173.
11. *Афанасьева С.А.*, *Белов Н.Н.*, *Югов Н.Т.* Проникание цилиндрических ударников в преграды из бетона и песчаного грунта // ДАН. 2002. Т. 387. № 5. С. 1–4.
12. *Югов Н.Т.*, *Белов Н.Н.*, *Югов А.А.* Расчёт адиабатических нестационарных течений в трёхмерной постановки (РАНЕТ-3) // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201 061 104 2. Москва, 2010.
13. *Белов Н.Н.*, *Югов Н.Т.*, *Копаница Д.Г. и др.*Исследование прочности моделей стальных трубобетонных и железобетонных колонн на неоднократный торцевой удар падающего груза расчётно-экспериментальным методом // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16. № 2. С. 181–190.
14. *Белов Н.Н.*, *Югов Н.Т.*, *Копаница Д.Г.*, *Югов А.А.* Расчет прочности конструкций из бетонных и железобетонных плит при высокоскоростном ударе // ПМТФ. 2005. Т. 46. № 3. С. 165–173.
15. *Афанасьева С.А.*, *Белов Н.Н.*, *Копаница Д.Г. и др.* Разрушение бетонных и железобетонных плит при высокоскоростном ударе и взрыве //ДАН. 2005. Т. 401. № 2. С. 185–188.
16. *Seaman L.*, *Gurran D.,R.*, *Shockey D.A.* Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. No. 11. P. 4814–4826.
17. *Хелан К.* Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.

Статья поступила 21.06.2012 г.

Belov N.N., *Yugov N.T.*, *Afanas'eva S.A.*, *Fedosov O.Yu.*, *Yugov A.A.*, *Mamtsev R.S.* DURABILITY ANALYSIS FOR DESIGNS OF SPATIALLY-CARRIED STEEL-CONCRETE PLATES AT HIGH-SPEED BLOW BY THE COMPOUND METAL DRUMMER. The mathematical model of the behavior of concrete in the conditions of great dispatch-wave loading is presented. In the context of this model, using the finite elements method modified to solving dynamic problems, in the full three-dimensional statement, the problem about high-speed blow of a steel core in a dural cover on the design in the form of a set of spatially-carried steel-concrete plates is solved for different speeds and striking angles.

Keywords: mathematical modeling, high-speed impact, concrete, steel-concrete plates, compound striker, destruction, dynamic durability.

BELOV Nikolay Nikolaevich (Tomsk State University)
E-mail: n.n.belov@mail.ru

YUGOV Nikolay Tikhonovich (Tomsk State University)
E-mail: n.t.yugov@mail.ru

AFANASYEVA Svetlana Ahmed-Ryzovna (Tomsk State University)
E-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru

FEDOSOV Oleg Yurievich (MP 21055)
E-mail: olefed78@mail.ru

YUGOV Aleksey Aleksandrovich (Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering)
E-mail: yugalex@sibmail.com

MAMTSEV Roman Sergeyevich (Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering)
E-mail: rmamcev@mail.ru