

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 539.3

*БЕЛОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
n.n.belov@mail.ru*

*ЮГОВ НИКОЛАЙ ТИХОНОВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
n.t.yugov@mail.ru*

*ФЕДОСОВ ОЛЕГ ЮРЬЕВИЧ, канд. техн. наук,
olefed78@mail.ru*

*ЮГОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук,
yugalex@sibmail.com*

*МАМЦЕВ РОМАН СЕРГЕЕВИЧ, аспирант,
rmatsev@mail.ru*

*БУРЛАКИН ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ, инженер,
volond.88@mail.ru*

*СЫЗДЫКОВ ЕЛТУГАН КИМАШЕВИЧ, канд. техн. наук,
raduga@dubna.ru*

*ПОЛУНИН СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, инженер,
raduga@dubna.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЁННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УДАР*

В статье приведены результаты экспериментальных исследований ударного взаимодействия снаряда, представляющего собой стальной стержень с конической головной частью в оболочке из алюминиевого сплава, с системой пространственно-разнесённых железобетонных плит, имитирующих конструкцию промышленного объекта. Анализ прочности конструкции проведен на основе сопоставления данных эксперимента с результатами математического моделирования в диапазоне скоростей соударения 700–1500 м/с.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; удар; прочность; бетон; разрушение.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ № 10-01-00573а.

BELOV, NIKOLAY NIKOLAYEVICH, Dr. of phys.-math. sc., prof.,
n.n.belov@mail.ru

YUGOV, NIKOLAY TIKHONOVICH, Dr. of phys.-math. sc., prof.,
n.t.yugov@mail.ru

FEDOSOV, OLEG YURYEVICH, Cand. of tech. sc.,
olefed78@mail.ru

YUGOV, ALEKSEY ALEKSANDROVICH, Cand. of tech. sc., assoc. prof.,
yugalex@sibmail.com

MAMTSEV, ROMAN SERGEYEVICH, P.G.,
rmamcev@mail.ru

BURLAKIN, VLADIMIR VLADIMIROVICH, engineer,
volond.88@mail.ru

SYZDYKOV, ELTUGAN KIMASHEVICH, Cand. of tech. sc., assoc. prof.,
raduga@dubna.ru

POLUNIN, SERGEY PAVLOVICH, engineer,
raduga@dubna.ru

Tomsk State University of Architecture and Building,
2 Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia

RESEARCH OF DURABILITY OF A SPATIAL SEPARATED CONCRETE SLABS STRUCTURE AT HIGH – SPEED IMPACT

The results of the experimental studies of shock interaction between a steel rod with a conical head part in the aluminum alloy shell and a system of spatial - separated concrete slabs, simulating a structure of a site, are presented in the article. The analysis of the structural strength by comparing the experimental data with the results of mathematical modeling in the range of impact velocities 700:1500 m/s has been carried out.

Keywords: computer modeling; impact; strength; concrete; destruction.

При проектировании железобетонных конструкций многих промышленных объектов возникает необходимость оценки их способности противостоять динамическим нагрузкам [1]. Одним из эффективных подходов к решению данной проблемы является математическое моделирование процессов деформирования и разрушения таких конструкций при воздействии удара и взрыва.

Вопросы физики проникания стержней и компактных тел на скоростях до 3000 м/с в бетон в целом достаточно изучены. Однако для описания процессов взаимодействия сложных по структуре систем, включающих в себя различные по свойствам материалы, требуется разработка физико-математических моделей. Совместное проведение экспериментальных исследований и математического моделирования позволяет не только глубже понять результаты экспериментальных работ и уточнить параметры модели, но и дать верную интерпретацию полученных результатов.

В [1–5] предложена математическая модель пористой упруго-пластической среды, позволяющая в рамках механики сплошной среды в условиях ударно-волнового нагружения рассчитывать напряжённо-деформированное состояние и разрушение как в пластичных, так и в хрупких материалах. Данная модель поведения конструкционных материалов реализована в программ-

ном комплексе РАНЕТ-3 [6], позволяющем с помощью специального блока подпрограмм для расчёта элементов железобетонного каркаса на взрывные и ударные нагрузки проводить решение задач удара и взрыва в полной трёхмерной постановке методом конечных элементов, модифицированным на решение динамических задач [1, 4].

Комплекс программ РАНЕТ-3 использовался в [2, 7, 8] для анализа процессов проникания цилиндрического снаряда, начинённого взрывчатим веществом (ВВ), в преграды, состоящие из бетонных плит, разделённых песчаным грунтом, с последующим подрывом ВВ.

Для исследования поведения материалов в условиях ударно-волнового нагружения в [5, 9, 10, 11] сформирован расчётно-экспериментальный метод. В частности, расчётно-экспериментальный метод в [5, 11, 12] применялся для анализа прочности бетонных и железобетонных плит на удар стальным цилиндрическим ударником, а также моделей бетонных, железобетонных и стальных трубобетонных колонн на неоднократный торцевой удар падающего груза и подрыв ВВ.

В данной работе расчётно-экспериментальным методом проведено исследование прочности конструкций, состоящих из пространственно-разнесённых железобетонных плит, на высокоскоростной удар снарядом массой $m_0 = 118$ г в диапазоне скоростей $u_0 = 700\text{--}1500$ м/с, а также поведения снаряда при проникании за преграды толщиной порядка и более его длины.

Схема расположения железобетонных плит, моделирующих железобетонную конструкцию промышленного объекта, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема расположения железобетонных плит

Каждая железобетонная плита представляет собой трёхслойную конструкцию, первый и третий слои которой толщиной $h_{жб}$ выполнены из бетона марки 150, армированного сеткой 50×60 мм из стальной проволоки диаметром 1,6 мм. Между железобетонными слоями расположена в плотную стальная пластина толщиной $h_{ст}$. Толщина используемых в опытах железобетонных плиток составила 62,5 мм ($h_{жб} = 30$ мм, $h_{ст} = 2,5$ мм).

Снаряд представляет собой стальной стержень диаметром 14 мм с конической головной частью в оболочке из алюминиевого сплава. Общая длина снаряда $L_0 = 81$ мм, а его диаметр $d_0 = 23$ мм ($L_0/d_0 = 3,52$).

При нормальном соударении ($\alpha_0 = 0^\circ$) со скоростью 635 м/с снаряд массой 118 г пробивает первую железобетонную плиту и взаимодействует с краем второй. Через α_0 обозначен угол, образованный осью симметрии снаряда с нормалью к лицевой поверхности преграды.

В диапазоне скоростей удара 708,5–1447 м/с и при угле подхода к преградам $\alpha_0 = 0^\circ$, как правило, снаряд пробивает две преграды и либо застревает в третьей, либо взаимодействует с её краем. Суммарная глубина проникания снаряда в разнесённые мишени $h_\Sigma \leq 155$ мм.

При нормальном соударении со скоростью 1573 м/с снаряд пробивает три преграды ($h_\Sigma = 187,5$ мм).

На рис. 2 представлены фотографии тыльных поверхностей железобетонных плит после опыта. Скорость удара 1230 м/с, $\alpha_0 = 0^\circ$. Снаряд пробил две преграды и застрял в третьей.

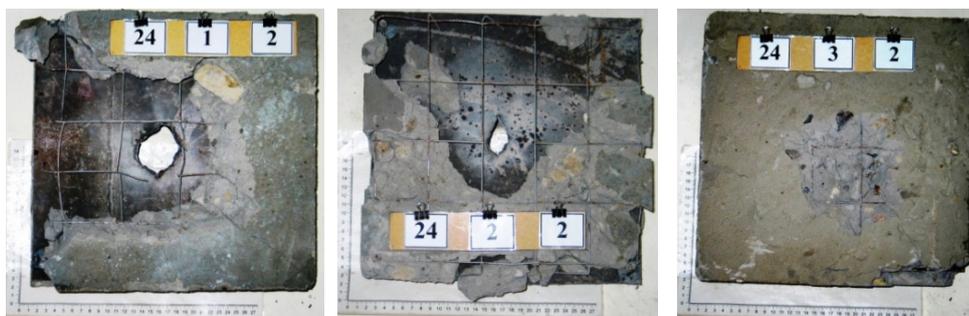


Рис. 2. Фотографии тыльных поверхностей железобетонных плит после опыта

Процесс внедрения снаряда сопровождался образованием лицевых и тыльных отколов в железобетонных слоях плиты. Очевидно, что отклонение движения от нормали, наблюдаемое в большинстве опытов, обусловлено наличием незначительных углов атаки при движении снаряда «классической» формы (оживальная головная часть, переходящая в цилиндр), приводящем к неустойчивому движению в бетоне (траектория криволинейна и даже может иметь u-образный вид).

На рис. 3 представлены фотографии тыльных поверхностей железобетонных плит после удара снаряда со скоростью 1015 м/с под углом $\alpha_0 = 45^\circ$. Снаряд пробил первую преграду и рикошетировал от второй. С тыльной стороны второй преграды наблюдается откольное разрушение.

Аналогичная картина наблюдалась и при скорости удара 1223 м/с и угле подхода к преграде $\alpha_0 = 45^\circ$ ($h_\Sigma \approx 77,5-92,5$ мм).

Сравнение представленных экспериментальных данных с результатами математического моделирования процессов ударного взаимодействия снарядов

с системой разнесённых железобетонных плит толщиной 62,5 мм проведено для скоростей встречи 700 и 1500 м/с и углов подхода к преграде 0, 45 и 60°.

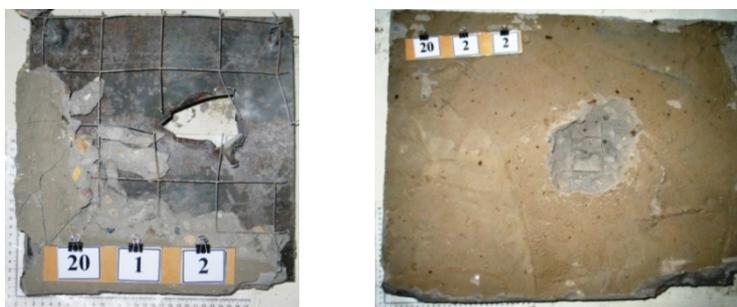


Рис. 3. Фотографии тыльных поверхностей железобетонных плит после опыта

Результаты математического моделирования представлены в таблице и на рис. 4–8.

В таблице через d_t , d_n , d_c соответственно обозначены диаметры тыльного и лицевого отколов в преграде, а также диаметр сквозного отверстия в стальном листе. Через L и m обозначены длины и массы деформированного снаряда. После пробития преграды снаряд обладает скоростью u , которая является скоростью взаимодействия с последующей преградой.

Результаты расчётов соударения модельного снаряда массой 125 г с набором пространственно-разнесённых мишеней

u_0 , м/с	α_0 , град.	m_0 , г	№ миш.	d_n/d_0	d_c/d_0	d_t/d_0	L/d_0	m , г	u , м/с	h_Σ , h_Σ^1
700	0	125	1	2,31	2,54	3,08	2,54	109,2	215	$h_\Sigma = 92,5$
			2	3,08	–	2,5	2,38	106,7	–	$h_\Sigma^1 = 112,2$
1500	0	125	1	3,08	1,92	4,46	1,77	70,6	780	$h_\Sigma = 155$
			2	3,53	1,69	3,08	1,46	58,0	338	$h_\Sigma^1 = 173,6$
			3	3,69	–	2,69	1,33	54,5	–	
700	45	125	1	3,86	–	3,86	2,46	107,1	–	$h_\Sigma = 30$ $h_\Sigma^1 = 55,9$
1500	45	125	1	4,42	2,57	4,86	1,57	65,6	530	$h_\Sigma = 92,5$
			2	6,42	–	3,57	1,47	61,1	–	$h_\Sigma^1 = 114,5$
1500	60	125	1	8,57	3,42	7,14	2,0	69,6	231	$h_\Sigma = 85,5$
			2	7,14	–	–	1,5	65,7	–	

При математическом моделировании не учитывалась форма головной части стального стержня снаряда и ставилось условие жёсткого сцепления на

границе разделов материалов оболочки из алюминиевого сплава и стального стержня снаряда, ввиду сложности моделирования разделения материалов в процессе внедрения снаряда в преграду. Расхождение по массе моделируемого снаряда со снарядом, используемым в эксперименте, составило 6 % ($m_0 = 125$ г). Бетонная преграда смоделирована песочно-цементной смесью, состоящей из одной части цемента марки 400 и двух частей мелкого песка. Поскольку диаметр снаряда вдвое меньше характерного размера армирующей сетки, влияние армирования бетонных плит на процесс пробития не учитывалось. При моделировании преграда рассматривалась как конструкция, состоящая из двух бетонных слоёв, разделённых стальным листом.

На рис. 4 представлены результаты математического моделирования процессов ударного взаимодействия модельного снаряда со скоростью 700 м/с ($\alpha_0 = 0^\circ$) с двумя разнесёнными преградами.

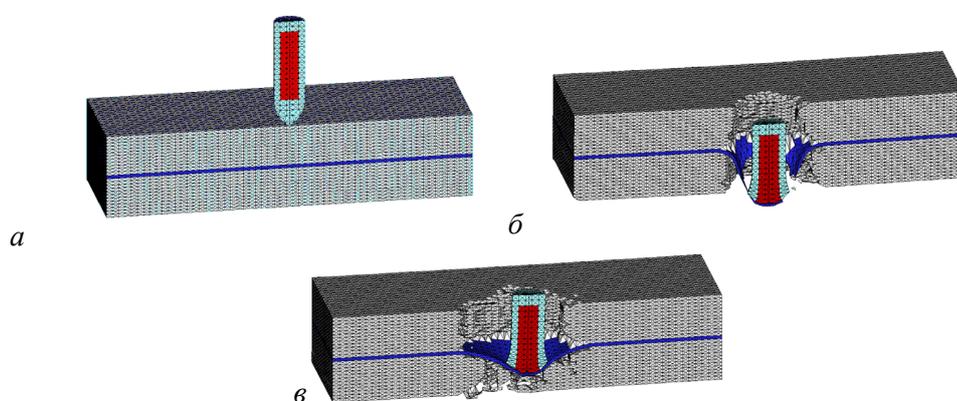


Рис. 4. Конфигурация снаряда и преграды:

a – начальные; *б* – на момент пробития первой преграды; *в* – на момент остановки снаряда во второй преграде

По мере проникания в преграду происходит срабатывание оболочки снаряда в области головной части. На момент взаимодействия снаряда со стальным листом первой преграды оболочка в головной части полностью срабатывается ($t = 100$ мкс). Происходит откольное разрушение в бетоне с тыльной стороны преграды. Под стальным листом в области действия снаряда бетон также находится в разрушенном состоянии. Пробитие первой преграды происходит в момент времени 150 мкс, когда снаряд пробивает стальной лист (рис. 4, б). На момент пробития диаметр лицевого откола $d_{\text{л}} = 2,31d_0$, тыльного – $d_{\text{т}} = 3,08d_0$. В стальном листе образовалось сквозное отверстие диаметром $d_{\text{с}} = 2,54d_0$. В запреградном пространстве деформированный снаряд ($L/d_0 = 2,54$) массой 109,2 г имеет скорость $u = 215$ м/с. Данной скорости недостаточно для пробития второй мишени (рис. 4, в).

На момент остановки деформированного снаряда ($L/d_0 = 2,38$, $m = 106,7$ г) в преграде образовались лицевой ($d_{\text{л}} = 3,08d_0$) и тыльный ($d_{\text{т}} = 2,5d_0$) отколы. Пробитие второй преграды определяется прочностными

характеристиками стального листа, т. к. под ним бетонное тело в области действия деформированного снаряда разрушено. Следует отметить, что в расчёте использовались довольно высокие прочностные характеристики стали. Таким образом, вторая преграда также находится на пределе пробития. Кроме того, в отличие от используемого при проведении экспериментальных исследований снаряда, имеющего стальной стержень с заострённой головной частью, модельный снаряд взаимодействует со стальным листом плоским торцом стального стержня, что оказывает влияние на напряжённо-деформированное состояние взаимодействующих тел. Процесс пробития стального листа модельным снарядом происходит по типу «выбивания пробки». Суммарная глубина внедрения модельного снаряда в разнесённые преграды – h_{Σ} составила 92,5 мм, а суммарная глубина внедрения с учётом прогиба стального листа в непробитой преграде $h_{\Sigma}^1 = 112,2$ мм.

Увеличение скорости удара до 1500 м/с (рис. 5) приводит к тому, что уже на первой преграде происходит сильная деформация модельного снаряда ($L/d_0 = 1,77$, $m = 70,6$ г) и потеря скорости. В запреградном пространстве деформированный снаряд имеет скорость $u = 780$ м/с. В плите образовалось сквозное отверстие. Диаметр лицевого откола $d_{\text{л}} = 3,08d_0$, тыльного – $d_{\text{т}} = 4,46d_0$. Запреградная скорость достаточна для пробития второй преграды. В третьей преграде при пробитии стального листа (рис. 5, з) снаряд останавливается. На момент остановки масса остатка снаряда составляет 54,5 г ($L/d_0 = 1,33$). С тыльной стороны преграды образовался откол $d_{\text{т}} = 2,69d_0$. Бетон под стальным листом в области действия снаряда выкрошился. С лицевой стороны в бетонном слое произошёл откол диаметром $d_{\text{л}} = 3,65d_0$. Как и в предыдущем случае, преграда находится на пределе пробития. Суммарная глубина проникания в системе преград h_{Σ} составила 155 мм, а с учётом деформации стального листа третьей преграды – $h_{\Sigma}^1 = 173,6$ мм.

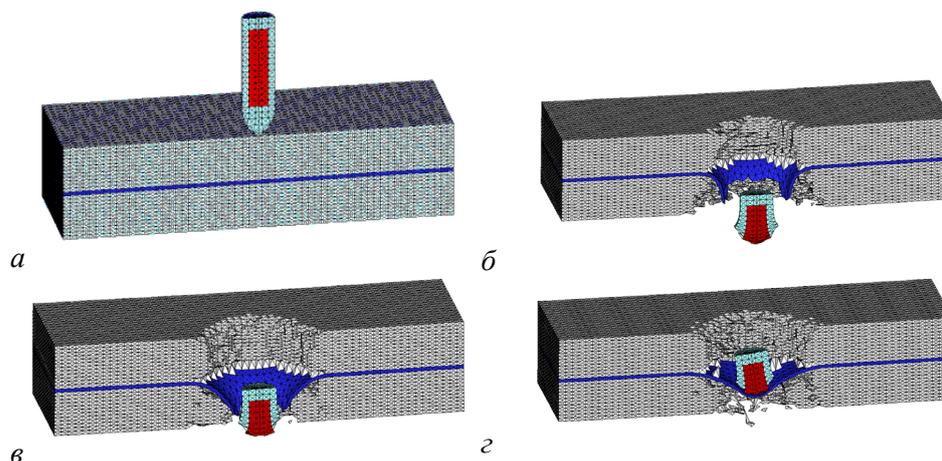


Рис. 5. Конфигурация снаряда и преград:

a – начальные; *б* – на момент пробития первой преграды; *в* – на момент пробития второй преграды; *г* – на момент остановки ударника в третьей преграде

На рис. 6. представлены данные математического моделирования ударного взаимодействия модельного снаряда с рассмотренным выше набором преград со скоростью 700 м/с под углом 45° к нормали лицевой поверхности преграды.

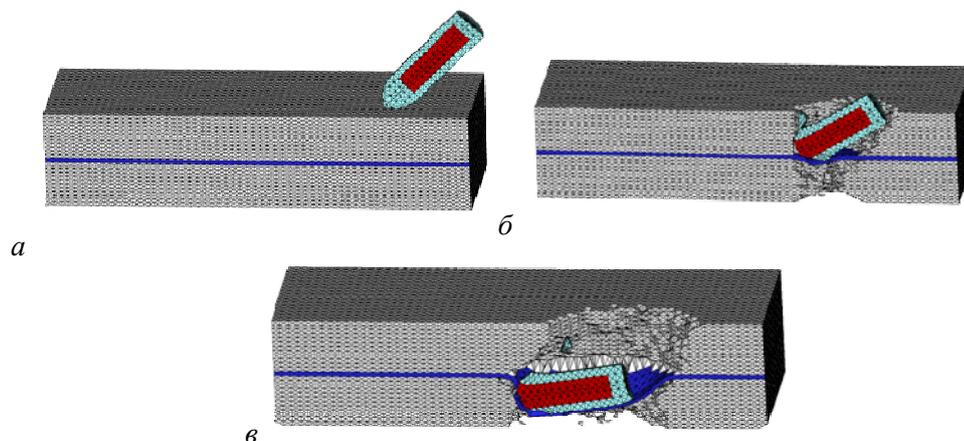


Рис. 6. Конфигурации ударника и первой мишени при соударении со скоростью 700 м/с под углом $\alpha_0 = 45^\circ$ в момент времени 0, 150, 450 мкс

Расчёт проведён до момента времени 450 мкс. В процессе ударного взаимодействия происходит пробитие первого бетонного слоя. Максимальный размер пробоины с лицевой стороны первого бетонного слоя составляет $3,86d_0$, с тыльной – $4,3d_0$. С тыльной стороны второго бетонного слоя произошло откольное разрушение. Максимальный размер откола составляет $3,86d_0$. Стальной лист не пробит. Деформированный снаряд ($L/d_0 = 2,46$, $m = 107,1$ г) застревает во втором бетонном слое. Глубина его проникания в преграду с учётом прогиба стального листа h_{Σ}^1 составила 55,9 мм.

При скорости удара 1500 м/с и углах подхода 45 и 60° к нормали поверхности первой преграды модельный снаряд ее пробивает, а его деформированный остаток застревает во второй. Конфигурация снаряда и первой преграды при соударении под углом 45° на момент ударного взаимодействия ($t = 0$ мкс) и пробития снарядом преграды (400 мкс) приведены на рис. 7, а.

За первой преградой остаток сильно деформированного снаряда ($L/d_0 = 1,57$, $m = 65,6$ г) обладает скоростью 530 м/с. При ударе по второй преграде (рис. 7, б) он пробивает бетонный слой и останавливается при взаимодействии со стальным листом.

Со стороны тыльной поверхности преграды наблюдается откольное разрушение. Стальной лист сильно деформирован. Мишень находится на пределе пробития. В момент остановки снаряда его масса составляет 61,1 г ($L/d_0 = 1,47$), а глубина проникания во вторую мишень – 52 мм. Суммарная глубина проникания модельного снаряда в разнесённые преграды с учётом прогиба стального листа непробитой преграды $h_{\Sigma}^1 = 114$ мм.

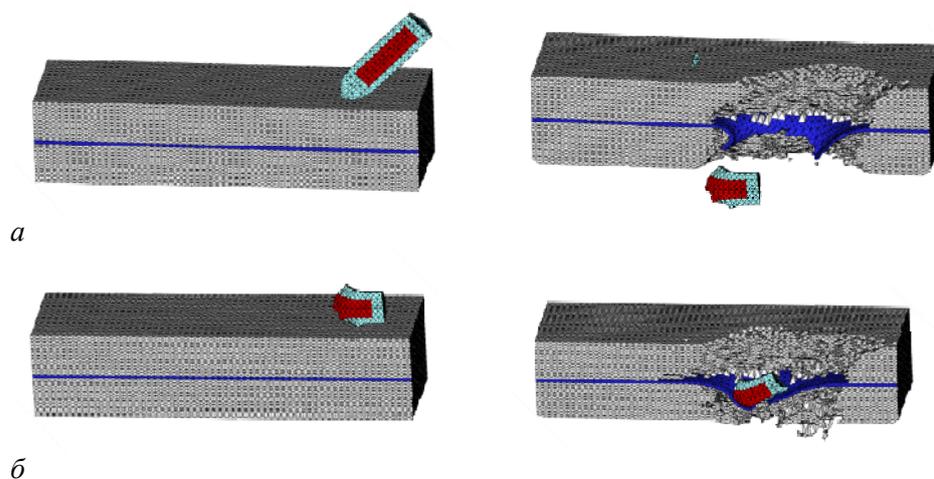


Рис. 7. Конфигурация снаряда и преград при ударном взаимодействии со скоростью 1500 м/с под углом 45° :
a – пробитие первой преграды: $t = 0$ мкс, $t = 195$ мкс; *б* – взаимодействие остатка снаряда со второй мишенью: $t = 0$ мкс, $t = 400$ мкс

При пробитии первой преграды модельным снарядом со скоростью 1500 м/с под углом 60° сильно деформированный остаток снаряда (рис. 8, *a*) ($L/d_0 = 2,0$, $m = 69,7$ г) взаимодействует со второй со скоростью 231 м/с (рис. 8, *б*) и останавливается в первом бетонном слое. В момент остановки его масса составляет 65,7 г ($L/d_0 = 1,5$), глубина проникания во второй мишени – 23 мм ($h_\Sigma = 85$ мм).

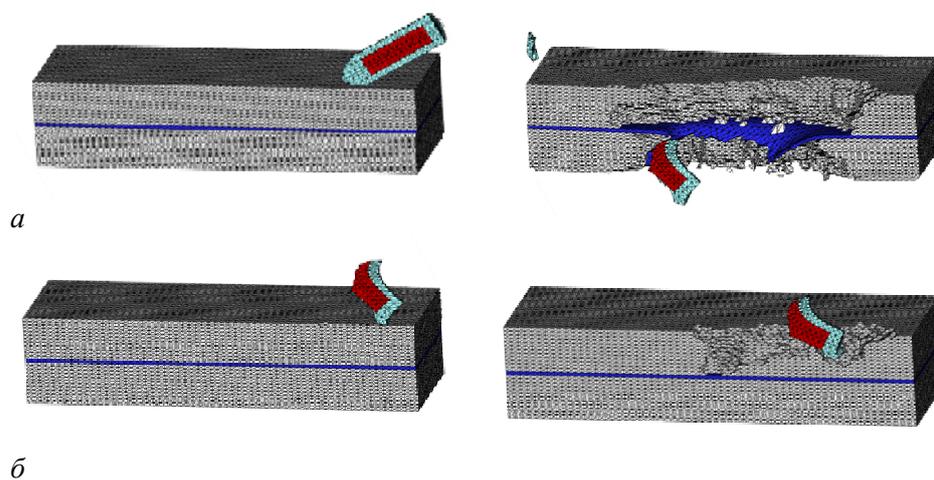


Рис. 8. Конфигурация снаряда и преград при ударном взаимодействии со скоростью 1500 м/с под углом 60° :
a – пробитие первой преграды: $t = 0$ мкс, $t = 315$ мкс; *б* – взаимодействие остатка снаряда со второй преградой: $t = 0$ мкс, $t = 260$ мкс

Для сравнения на рис. 9 представлены результаты математического моделирования ударного взаимодействия модельного снаряда со скоростью 700 и 1500 м/с ($\alpha_0 = 0^\circ$) в бетонное полупространство. При скорости удара 700 м/с снаряд внедрился в бетон на глубину $5,09d_0$ (117 мм). При внедрении срабатывает оболочка из алюминиевого сплава в головной части снаряда, сам же стальной стержень не деформирован. Максимальная глубина проникания в бетонное полупространство модельного снаряда со скоростью 1500 м/с составляет $8d_0$ (184 мм).

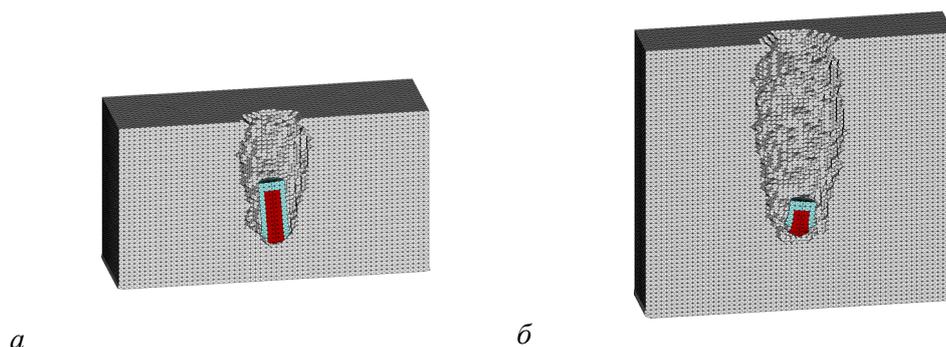


Рис. 9. Конфигурация снаряда и бетонной преграды при нормальном ударе со скоростью 700 и 1500 м/с

Сравнение данных математического моделирования и экспериментальных исследований показывает, что даже при принятых допущениях (неучёт заострения в головной части стального стержня, условие жёсткого сцепления на границе раздела материалов ударника, замена бетона песочно-цементной смесью) результаты моделирования удовлетворительно коррелируют с экспериментом по глубине проникания снаряда в разнесённые преграды.

Математическое моделирование позволяет исследовать физику протекающих процессов в условиях ударно-волнового нагружения, что особенно актуально при проектировании объектов из железобетонных конструкций и создании устойчиво функционирующих высокоскоростных снарядов, несущих заряд ВВ и предназначенных для преодоления прочных преград, заметно превышающих по толщине длину снаряда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Расчёт железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки* / Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, О.Г. Кумпяк [и др.]. – Northampton; STT; Томск : STT, 2004. – 466 с.
2. *Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.]. – Northampton; STT; Томск : STT, 2005. – 356 с.
3. *Белов, Н.Н.* Численный анализ разрушения в плитах при действии импульсных нагрузок / Н.Н. Белов, А.Н. Корнеев, А.П. Николаев // ПМТФ. – 1985. – № 3. – С. 132–136.
4. *Исследование процессов деформирования и разрушения хрупких материалов* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, С.А. Афанасьева [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2001. – Т. 7. – № 2. – С. 131–142.

5. *Расчётно-экспериментальный метод* анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций / Н.Н. Белов, О.В. Кабанцев, Д.Г. Копаница [и др.]. – Томск : СТТ, 2008. – 292 с.
6. *Белов, Н.Н.* Расчёт адиабатических нестационарных течений в трёхмерной постановке (РАНЕТ-3) / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, А.А. Югов / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201 061 104 2. Москва, 2010.
7. *Афанасьева, С.А.* Проникание цилиндрических ударников в преграды из бетона и песчаного грунта / С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, Н.Т. Югов // ДАН РФ. – 2002. – Т. 387. – № 5. – С. 1–4.
8. *Математическое моделирование* процессов проникания ударников в преграды из песка и бетона / Н.Н. Белов, О.Г. Кумпяк, Н.Т. Югов [и др.] // Вестник ТГАСУ. – 2003. – № 2. – С. 169–178.
9. *Анализ динамической прочности* бронеплит при ударном нагружении расчётно-экспериментальным методом / А.Н. Ищенко, Н.Н. Белов, Н.Т. Югов [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2010. – № 2 (10). – С. 71–78.
10. *Исследование проникающей способности* составных ударников из стали и текстолита в бронеплиты расчётно-экспериментальным методом / А.Н. Ищенко, Н.Н. Белов, Н.Т. Югов [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – № 3 (15). – С. 89–98.
11. *Исследование прочности* моделей стальных трубобетонных и железобетонных колонн на неоднократный торцевой удар падающего груза расчётно-экспериментальным методом / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т. 16. – № 2. – С. 181–190.
12. *Расчёт прочности* сталебетонных колонн на взрывные и ударные нагрузки / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.] // Вестник ТГАСУ. – 2007. – № 2. – С. 132–138.