

УДК 531.66

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ УДАРЕ

А. А. Коняев, В. Ф. Толкачев, Т. М. Платова

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия
E-mails: alexk@niipmm.tsu.ru, tolk@niipmm.tsu.ru, kolmakova@ftf.tsu.ru

Приведены результаты экспериментального исследования проникания цилиндрических ударников в бетон и железобетон при скоростях удара, достигающих 0,5 км/с. Предложен алгоритм расчета глубины проникания ударника, позволяющий на основе измерения удельной работы по вытеснению бетона с использованием ударников массой до 8 г рассчитать глубину проникания в бетон высокопрочных стальных ударников массой до 13,5 кг.

Ключевые слова: эксперимент, удар, ударник, бетон, железобетон, плита, проникание, разрушение.

DOI: 10.15372/PMTF20150613

Введение. Разрушение бетонных и железобетонных плит при ударе — сложный процесс, при котором проникание ударника сопровождается деформированием и разрушением плит в результате интерференции волн напряжений. Разрушение усиливается вследствие выброса бетона с лицевой поверхности плиты и выброса фрагментов материала с тыльной поверхности. В процессе пробития в бетонной плите возможно образование конических и радиальных трещин в области контакта с ударником как на лицевой, так и на тыльной поверхности плиты и формирование интенсивных откольных разрушений.

Результаты компьютерного моделирования и экспериментальные данные о глубине проникания в бетон прочных стальных ударников массой 13,5 кг при скорости удара 1,1 км/с различаются на 40 % [1]. Результат ударного взаимодействия зависит от прочности бетона, числа слоев в каркасе арматуры железобетона, степени армирования каждого из этих слоев [2], вследствие чего возникает необходимость уменьшать в экспериментах число параметров и диапазоны их значений.

Целью настоящей работы является нахождение определяющих параметров и построение эмпирического алгоритма расчета, связывающего кинетическую энергию ударника и ее расход на единицу объема деформируемой преграды с макропараметрами разрушения бетона (глубиной проникания, скоростью сквозного пробития, остаточной скоростью, моментом появления откола). В частности, на основе измерений глубины проникания на уменьшенных моделях ударников (массой до 8 г) вычислялась глубина проникания в крупногабаритные бетонные блоки ударников массой до 13,5 кг при скорости удара до 1,1 км/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-08-00509).

© Коняев А. А., Толкачев В. Ф., Платова Т. М., 2015

Параметры проникания ударников в бетон

Номер эксперимента	Контактирующие материалы	l_0 , мм	V_0 , м/с	L_k/l_0	a , МПа
1	Сталь 60С2А — бетон	22,8	106	0,16	276
2	Сталь 60С2А — бетон	22,8	202	0,58	276
3	Сталь 60С2А — бетон	22,8	243	0,73	317
4	Сталь 60С2А — бетон	22,8	349	1,40	341
5	Сталь 60С2А — бетон	22,8	363	1,23	420
6	Сталь 60С2А — бетон	22,8	403	1,51	422
7	Титан ВТ1-0 — бетон	30,4	331	0,76	326
8	Титан ВТ1-0 — бетон	30,4	372	0,66	326
9	Сплав Д16 — бетон	30,4	312	0,41	330

1. Методика эксперимента. Используемый в эксперименте мелкозернистый бетон имел следующий состав: одна часть цемента марки 400, две части мелкого песка, масса воды составляла 44 % массы песка. Время выдержки смеси — 30 сут. Статический предел прочности бетона на сжатие варьировался в диапазоне $20 \div 30$ МПа. Для железобетонных плит толщиной $b = 24$ мм проводилось армирование стальной сеткой при различном ее расположении и степени армирования $2 \div 3$ %.

В случае глубокого проникания толщина плит и бетонных блоков выбиралась таким образом, чтобы отсутствовало влияние тыльной поверхности на глубину проникания. Данные о работе по вытеснению единицы объема материала получены на баллистическом стенде в диапазоне скоростей метания $V_0 = 100 \div 400$ м/с. В качестве ударников использовались стержни с плоским торцом из стали марки 60С2А различной твердости, титана марки ВТ1-0 и алюминиевого сплава марки Д16. Контролировалось отсутствие вращения ударника при приближении к плите.

2. Обсуждение результатов. При глубоком проникании недеформируемого стержня в бетон диаметр кратера практически равен диаметру стержня. В соответствии с экспериментальными зависимостями глубина кратера определялась из условия пропорциональности объема кратера кинетической энергии ударника и условия, что глубина кратера обратно пропорциональна работе по вытеснению единицы объема:

$$\frac{L_k}{l_0} = \frac{\rho_0 V_0^2}{2a}. \quad (1)$$

Здесь L_k — глубина кратера, мм; l_0 — длина ударника, мм; V_0 — скорость соударения, км/с; ρ_0 — плотность материала ударника, г/см³; a — работа по вытеснению единицы объема материала преграды, ГПа.

В таблице приведены измеренные в экспериментах параметры кратеров и вычисленные по формуле (1) значения работы по вытеснению единицы объема. Диаметр ударников был одинаковым и равным $d_0 = 7,6$ мм. При скоростях удара стальных ударников по бетонным плитам $V_0 = 100 \div 400$ м/с работа по вытеснению единицы объема незначительно увеличивается, ее среднее значение составило $a = 340$ МПа. Стандартное отклонение по шести опытам составило 27 МПа, или 7,9 %. При использовании прочных ударников меньшей плотности из титана марки ВТ1-0 и сплава марки Д16 получаем близкие значения параметра a . При проникании в глубокие слои работа по вытеснению единицы объема полагается характеристикой материала и постоянной величиной [3].

Представляет интерес сравнение результатов расчетов глубины проникания ударника в бетон, полученных по формуле (1) и известным эмпирическим соотношениям. Глубина проникания L_k ударника описывается следующими соотношениями [4]:

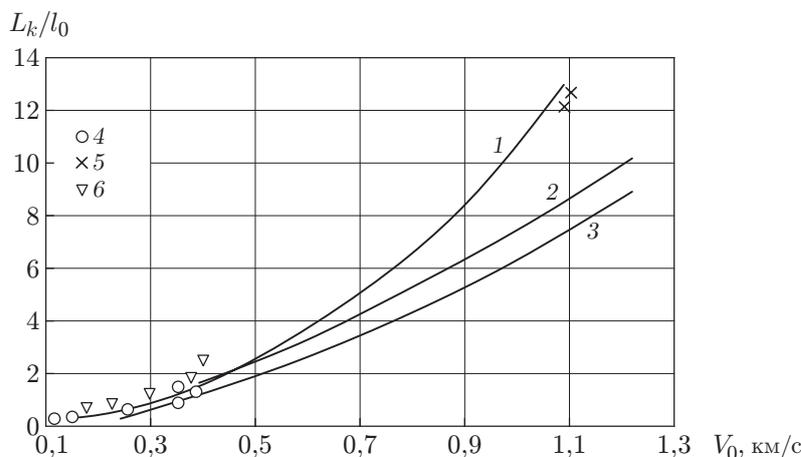


Рис. 1. Зависимость отношения глубины проникания в бетон к длине ударника от скорости удара при различных условиях взаимодействия: линии 1–3 — расчет по формулам (1)–(3) соответственно, точки — экспериментальные данные (4 — настоящая работа, 5 — работа [1], 6 — работа [6])

— при использовании метода BRL (Исследовательская лаборатория по баллистике, США)

$$\frac{L_k}{d_0} = \frac{1,33 \cdot 10^{-3}}{d_0^{2,8} \sqrt{f_{сж}}} m_0 V_0^{1,33} \quad (2)$$

(m_0 — масса ударника, кг; $f_{сж}$ — предел прочности бетона на сжатие, МПа);

— при использовании метода NDRC (Исследовательский комитет национальной обороны США)

$$\frac{L_k}{d_0} = \begin{cases} 2\sqrt{G}, & G \leq 1 \text{ или } L_k/d_0 \leq 2, \\ 1 + G, & G \geq 1 \text{ или } L_k/d_0 \geq 2, \end{cases} \quad G = \frac{3,8 \cdot 10^{-5} N m_0 V_0^{1,8}}{f_{сж}^{0,5} d_0^{2,8}} \quad (3)$$

(N — безразмерный коэффициент формы головной части ударника: $N = 0,72$ для плоской, $N = 1,00$ для сферической, $N = 1,14$ для заостренной головной части [5]).

Результаты экспериментов и расчетов глубины проникания ударника в бетон по формулам (1)–(3) представлены на рис. 1. Точками 4, 5 на рис. 1 показаны экспериментальные данные, полученные в настоящей работе для моделей ударников массой $m_0 = 8,1$ г и в работе [1], в которой исследовалось проникание недеформируемого стержня массой $m_0 = 13,5$ кг в бетон с низкой прочностью на сжатие $\sigma_{сж} = 20,7$ МПа при скоростях удара $V_0 = 1107; 1061$ м/с. При этом глубина проникания равна соответственно 6,90; 6,19 м, длина ударника — $l_0 = 53,1$ см, диаметр ударника $d_0 = 7,62$ см. Точки 6 соответствуют экспериментальным данным о проникании в бетон стержня из стали марки HRC45 массой $m_0 = 13$ кг [6] (скорость соударения $V_0 = 140 \div 400$ м/с, средняя прочность бетона на сжатие $\sigma_{сж} = 23$ МПа, плотность $\rho = 2,04$ г/см, длина снаряда $l_0 = 53,07$ см, диаметр $d_0 = 7,62$ см). Сравнение результатов экспериментов и расчетов, приведенных на рис. 1, показывает, что формула (1), в которую входит работа по вытеснению единицы объема бетона, определяемой в лабораторных условиях для скоростей удара $V_0 = 100 \div 400$ м/с, описывает взаимодействие с плитой модельных стальных стержней массой $m_0 = 8,1$ г и реальных ударников массой $m_0 = 13,5; 13,0$ кг [1, 6] в диапазоне скоростей удара $V_0 = 100 \div 1100$ м/с.

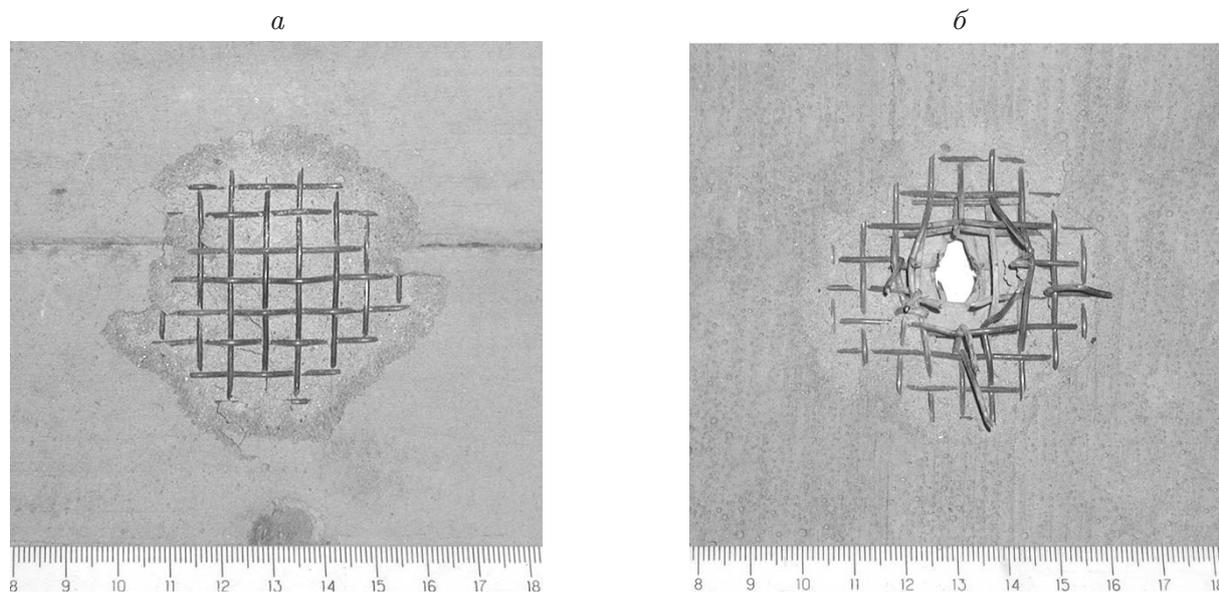


Рис. 2. Тыльная поверхность железобетонной плиты толщиной 24 мм при ударе по ней стальным стержнем:

a — несквозное проникание при $V_0 = 206$ м/с, *б* — сквозное проникание при $V_0 = 516$ м/с

Диаметр и глубина области тыльного откольного разрушения зависят от толщины плиты, массы, скорости и глубины проникания ударника. Эта закономерность была подтверждена в экспериментах с железобетонными плитами толщиной $b = 24; 200$ мм. На рис. 2 показаны области тыльного разрушения при ударе стальным стержнем ($m_0 = 8,1$ г, $l_0 = 22,8$ мм, $d_0 = 7,6$ мм) в случае несквозного проникания при скорости удара $V_0 = 206$ м/с (рис. 2, *a*) и в случае сквозного проникания при $V_0 = 516$ м/с (рис. 2, *б*). Диаметр ударника в экспериментах превышал размер ячейки армирования железобетона.

Железобетонные плиты толщиной 200 мм и размером 800×800 мм нагружались ударом цилиндров из алюминиевого сплава марки Д16 ($l_0 = 40$ мм, $d_0 = 50$ мм). При первом варианте нагружения на глубине 40 мм от тыльной поверхности плиты располагалась сетка из стальной проволоки толщиной 1,5 мм, со стороной ячейки, равной 6,5 мм (рис. 3). При втором варианте нагружения использовалась квадратная решетка из сварной стальной арматуры диаметром 10 мм. На рис. 3 видно, что от тыльной поверхности железобетонной плиты отделился слой с внешним диаметром $280 \div 290$ мм. В обоих вариантах реализуется смешанный механизм разрушения [7, 8], при котором проникание ударника сопровождается растрескиванием и отслаиванием лицевых и тыльных слоев материала преграды.

Возникновение откола в железобетонных плитах с фиксированной степенью армирования оценивается с помощью размерного энергетического параметра, представляющего собой отношение кинетической энергии ударника к кубу толщины плиты U/b^3 [2]. В экспериментах для железобетонных плит толщиной 24 мм (степень армирования $2 \div 3$ %) энергетический параметр при возникновении откола равен $10 \div 20$ МПа, для железобетонных плит толщиной 200 мм — варьируется в диапазоне $3 \div 4$ МПа, т. е. уменьшается с увеличением абсолютных размеров плиты.

Согласно полученным экспериментальным данным граница области откольного разрушения в бетонных плитах зависит от глубины проникания следующим образом:

$$\frac{h_p}{d_0} = 2,3 + 1,1 \frac{L_k}{d_0}. \quad (4)$$

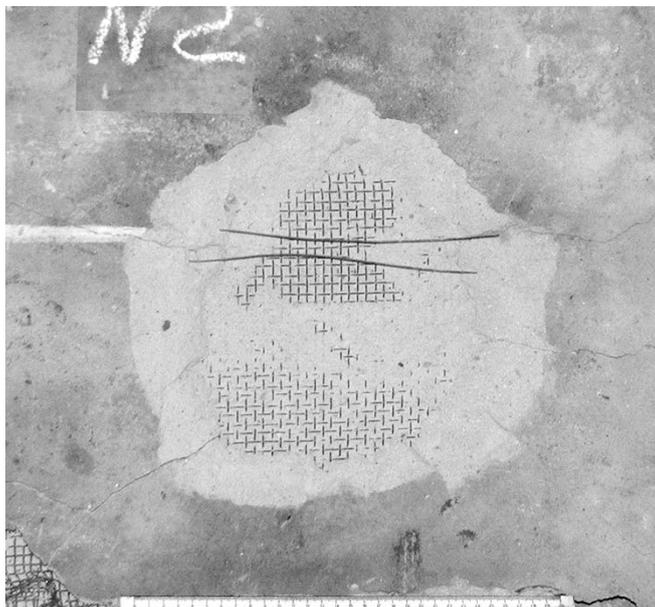


Рис. 3. Тыльная поверхность железобетонной плиты толщиной 200 мм размером 800×800 мм при ударе по ней цилиндром из алюминиевого сплава марки Д16

Здесь h_p — толщина бетонной плиты, при которой для заданной глубины кратера происходит тыльное разрушение; отношение L_k/d_0 определяется с использованием формулы (1).

Условие откола тыльной поверхности бетонной плиты с использованием метода NDRC описывается эмпирической формулой [4]

$$\frac{h_p}{d_0} = \begin{cases} 7,51L_k/d_0 - 5,06(L_k/d_0)^2, & L_k/d_0 = 0,65 \text{ или } h_p/d_0 \leq 3, \\ 2,12 + 1,36L_k/d_0, & 0,65 \leq L_k/d_0 \leq 11,75 \text{ или } 3 \leq h_p/d_0 \leq 18. \end{cases} \quad (5)$$

Предел сквозного пробития плиты при использовании метода BRL также зависит от глубины проникания [4]:

$$\frac{b}{d_0} = 1,3 \frac{L_k}{d_0}, \quad (6)$$

где b — предельная толщина плиты, для которой при данных скоростях удара наблюдается сквозное пробитие.

С использованием метода NDRC предел сквозного пробития описывается соотношением [4]

$$\frac{b}{d_0} = \begin{cases} 3,19L_k/d_0 - 0,718(L_k/d_0)^2, & L_k/d_0 \leq 1,35, \\ 1,32 + 1,24L_k/d_0, & 1,35 \leq L_k/d_0 \leq 13,50. \end{cases} \quad (7)$$

Экспериментальные и рассчитанные значения предельной толщины, при которой возникает откол, и предельной толщины пробития бетонных и железобетонных плит приведены на рис. 4. Линии 1, 2 соответствуют вычисленной по формулам (4), (5) предельной толщине, при которой возникает откол в бетоне, линии 3, 4 — рассчитанной по формулам (6), (7) предельной толщине, при которой наблюдается сквозное пробитие бетонных плит. Точками 5, 6 на рис. 4 показаны данные проведенного в настоящей работе эксперимента по определению предельной скорости, при которой возникает откол в бетонных и железобетонных плитах. (Цилиндрический ударник длиной $l_0 = 22,8$ мм, диаметром $d_0 = 7,6$ мм, массой $m_0 = 8,1$ г выполнен из стали, твердость которой не меньше, чем у

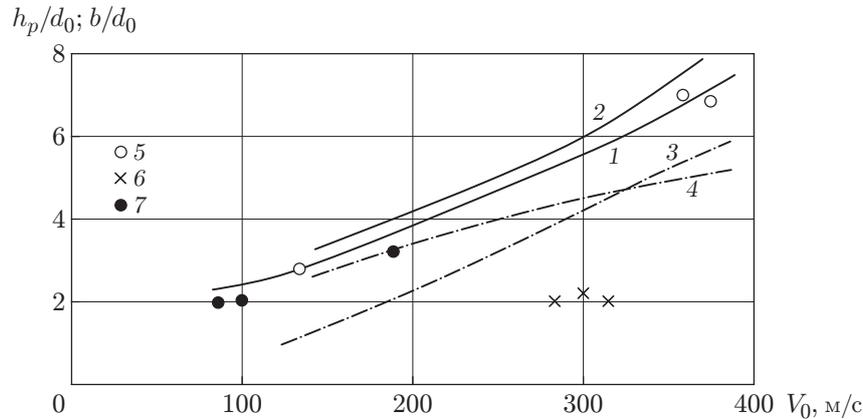


Рис. 4. Предельные толщины, при которых наблюдаются откол (1, 2, 5, 6) и сквозное пробитие (3, 4, 7) бетонных и железобетонных плит при ударном нагружении:

линии 1–4 — расчет по формулам (4)–(7) соответственно, точки — эксперимент (5, 6 — данные настоящей работы для бетонных и железобетонных плит, 7 — данные работы [5])

стали марки HRC40.) Точки 7 — данные эксперимента [5] по определению предела сквозного пробития ударником ($l_0 = 25,4$ мм, $d_0 = 12,7$ мм, $m_0 = 34$ г) бетонной плиты прочностью 30 МПа с тканевым покрытием, предотвращающим откол. На рис. 4 видно, что результаты расчета h_p/d_0 по предложенной в работе формуле (4) (кривая 1) с использованием экспериментально полученного значения L_k/d_0 согласуются с результатами расчета по формуле (5) с использованием метода NDRC (кривая 2).

Остаточную скорость $V_{ост}$ высокотвердого ударника за плитой при сквозном пробитии гомогенной плиты при $V_0 > 1300$ м/с можно рассчитать из уравнения баланса энергии [9]

$$\frac{V_{ост}}{V} = \beta \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

где V — предельная начальная скорость, при которой происходит сквозное пробитие плиты; β — безразмерный коэффициент, описываемый зависимостью [9]

$$\beta = \frac{1}{1 + M/m} = \frac{1}{1 + b\rho/(l_0\rho_0)}, \quad (9)$$

M , m — масса плиты и ударника на единицу площади соответственно; ρ — плотность материала плиты.

Соотношение (9) соответствует случаю адиабатического сдвига, когда площадь пробоины в плите равна площади поперечного сечения ударника. Плита из железобетона не является гомогенной средой, и механизм ее пробивания отличается от механизма адиабатического сдвига. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при комбинированном разрушении железобетона сдвигом и отрывом [7] параметра β недостаточно для расчета остаточной скорости. В этом случае предполагается в зависимость (9) дополнительно ввести экспериментально полученный коэффициент ψ , учитывающий отличие от схемы адиабатического сдвига:

$$\beta_0 = \frac{1}{1 + \psi M/m}, \quad \psi = 1 - 0,145 \frac{l_0\rho_0}{b\rho}. \quad (10)$$

В первом приближении, в рамках условия недеформируемости ударника, данный коэффициент является величиной, зависящей от отношения масс к единице площади ударника

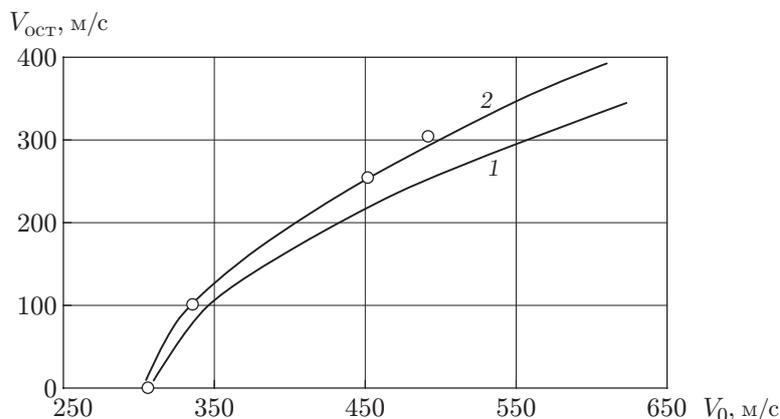


Рис. 5. Зависимость остаточной скорости ударника за железобетонной плитой от скорости удара:
 линии — расчет (1 — по формулам (8), (9), 2 — по формулам (8), (10)), точки — эксперимент

и плиты. В модельных экспериментах определение средней плотности плиты из железобетона проводилось путем взвешивания образцов. Средняя плотность плиты из железобетона толщиной 24 мм составила $4,15 \text{ г/см}^3$. Для стального ударника длиной 22,8 мм коэффициент ψ равен 0,74.

На рис 5. приведены зависимости остаточной скорости стального ударника ($d_0 = 7,6 \text{ мм}$, $l_0 = 22,8 \text{ мм}$) за железобетонной плитой толщиной $b = 24 \text{ мм}$ от скорости удара, рассчитанные по формулам (8), (9) (кривая 1) и (8), (10) (кривая 2) при $\psi = 0,74$. Видно, что предельная скорость сквозного пробития равна 305 м/с (точка на оси абсцисс). Отклонение расчетной кривой 1 при $V_0 = 490 \text{ м/с}$ от экспериментальных данных (точки) составляет 18 %. При введении коэффициента ψ в формулы (8), (10) отклонение уменьшается до 4,9 % (кривая 2 на рис. 5). Использование формул (8), (10) для расчета остаточной скорости ударника за железобетонной плитой позволяет получить удовлетворительные результаты и оценить возможность введения для таких плит эквивалентной по ударной стойкости среды с осредненной объемной плотностью.

Заключение. Предложен алгоритм расчета глубины проникания в бетон с низкой прочностью на сжатие ($20 \div 30 \text{ МПа}$) высокопрочных стальных ударников, основанный на экспериментально определяемой энергетической характеристике — работе по вытеснению единицы объема бетона. Данный алгоритм описывает полученные в настоящей работе и известные экспериментальные данные о глубоком проникании в бетон стальных ударников массой $0,008 \div 13,500 \text{ кг}$. Экспериментально показана возможность введения эквивалентной среды с осредненной величиной плотности и предложена формула для вычисления остаточной скорости ударника за железобетонной плитой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Luk V. K., Dykes J. A., Bishop J. E., et al. High speed penetration into low strength concrete targets // Proc. of the 24th Intern. symp. on ballistics, New Orleans (USA), 22–26 Sept. 2008. New Orleans: Sandia Nat. Lab. Albuquerque, 2008. P. 1–12.
2. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2 кн. Кн. 2 / Под ред. Я. Б. Зельдовича, Б. Е. Гельфанда. М.: Мир, 1986.
3. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н. А. Златина, Г. И. Мишина. М.: Наука, 1974.

4. **Li Q. M., Reid S. R., Wen H. M., Telford A. R.** Local impact effects of hard missiles on concrete targets // Intern. J. Impact Engng. 2005. V. 32. P. 224–284.
5. **Vossoughi F., Ostertag C. P., Monteiro P. J. M., et al.** Resistance of concrete protected by fabric to projectile impact // Cement Concrete Res. 2007. V. 37. P. 96–106.
6. **Frew D. J., Forrestal M. J., Cargile J. D.** The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth // Intern. J. Impact Engng. 2006. V. 32. P. 1584–1594.
7. **Белов Н. Н., Кабанцев О. В., Коняев А. А. и др.** Расчет прочности железобетона на ударные нагрузки // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 6. С. 165–173.
8. **Коняев А. А., Толкачев В. Ф., Платова Т. М.** Экспериментальные закономерности разрушения бетонных плит при ударе с учетом масштабных эффектов // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 7/2. С. 93–99.
9. **Сагомоян А. Я.** Проникание. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974.

Поступила в редакцию 19/XI 2014 г.
