

УДК 531.391

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-1-14-23

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКАНИЯ СТАЛЬНОГО УДАРНИКА В МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН РАЗЛИЧНЫХ СОСТАВОВ*

© 2025 г.

Баландин В.В., Баландин Вл.Вл.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

balandin@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 03.09.2024

Проведено экспериментальное исследование проникания стальных цилиндрических ударников с оживальным оголовком в мелкозернистый бетон различного состава. В ходе исследования определялись зависимости силы сопротивления прониканию от времени для оживального ударника при различных скоростях удара в обращенном эксперименте. Эксперименты проводились на установке ПГ-57 с использованием мерного стержня с наклеенными на него тензорезисторами. Для разгона контейнеров с мелкозернистым бетоном использовалась пневматическая пушка калибра 57 мм. Скорости удара варьировались от 40 до 260 м/с. Исследовались бетонные смеси с различным отношением цемент/песок. Для этих смесей определялись зависимости силы сопротивления от времени и максимальные силы сопротивления прониканию. При проведении экспериментов получено, что максимальная сила сопротивления прониканию растет с увеличением концентрации цемента в бетонной смеси. Самые низкие значения максимальной силы сопротивления получены для бетонной смеси 1 к 10. С ростом концентрации цемента в бетонной смеси максимальная сила сопротивления прониканию оживального ударника возрастает примерно в 2-3 раза.

Для трех составов бетонной смеси 1 к 10, 1 к 5, 1 к 2 проведено исследование влияния скорости удара на величину максимальной силы сопротивления прониканию для цилиндрического ударника с оживальным оголовком. Сила сопротивления внедрению растет с увеличением скорости удара до скоростей 180–200 м/с. При увеличении скорости удара выше 200 м/с сила сопротивления прониканию остается практически постоянной.

Ключевые слова: сила сопротивления прониканию, ударник, обращенный эксперимент.

Введение

В настоящее время бетон и его производные являются основными конструктивными материалами, используемыми при строительстве зданий и защитных сооружений. При конструировании и возведении зданий и сооружений должна учитываться

* Выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-79-10076).

стойкость бетона к динамическому воздействию от взрывов и ударов различных тел, которое может возникнуть в результате техногенных катастроф, сильных землетрясений. К возможным объектам, способным нанести повреждения бетонным конструкциям в результате соударения, относятся, например, терпящие аварию самолеты.

Для определения характеристик ударного взаимодействия твердых и деформируемых тел с преградами из бетонов применяются различные теоретические, расчетные и экспериментальные методы. Для этих целей широко используются численные методы, позволяющие определить основные параметры взаимодействия твердых тел и конструкций в широком диапазоне скоростей удара, размеров и форм ударяющего тела [1–4]. Также часто применяются аналитические методы, основанные на некоторых допущениях, подобных методу расширения сферической полости, предложенному М. Форрестолом [5–7]. Такие методы успешно используются в задачах проникания в грунтовые среды [8, 9]. Однако при проведении численных расчетов ударного взаимодействия твердого тела с бетонами различных составов необходимо точное задание динамических свойств соударяющихся тел. Это требует проведения большого количества экспериментальных исследований поведения бетонов под действием динамических нагрузок при различных скоростях деформации, уровнях нагрузок и видах напряженно-деформированного состояния [10–16]. Результаты экспериментальных исследований динамических свойств бетонов применяются для определения параметров математических моделей бетона [17–20], используемых в расчетах динамического взаимодействия деформируемых твердых тел с бетонными конструкциями. Расчетные и аналитические методы могут приводить к ошибкам, поэтому необходимо проводить верификацию путем сравнения численных результатов с результатами натурных или лабораторных экспериментов [6, 21–23].

Целью настоящей статьи является изучение сил сопротивления внедрению цилиндрического ударника в мелкозернистый бетон с различным соотношением песок/цемент и постоянным водо-цементным отношением для верификации некоторых моделей поведения бетонов.

Методика проведения обращенного эксперимента

Экспериментальные исследования проникания ударника в бетон различного состава проводились на установке ПГ-57 с использованием мерного стержня [24, 25]. Была проведена серия экспериментов для измерения силы сопротивления на начальном нестационарном участке проникания. Методика измерения силы сопротивления прониканию ударника в бетоны различных составов сводится к следующему. Исследуемую смесь заливают в цилиндрический полипропиленовый контейнер с вклеенным дюралевым дном и выдерживают не менее 28 дней до набора марочной прочности. Разгон контейнера с бетонной смесью осуществляется с помощью сжатого воздуха баллистической установки калибра 57 мм. Наличие в ПГ-57 двухдиафрагменного затвора позволяет получать стабильные и легко контролируемые скорости соударения в диапазоне от 50 до 500 м/с. Измерение скорости соударения осуществляется с помощью пары электроконтактных датчиков, расположенных в специальных отверстиях в стволе баллистической установки вблизи дульного среза. Для срабатывания электроконтактных датчиков на полипропиленовый торец контейнера наклеивается выточенное кольцо из алюминиевого сплава Д16Т. Скорость пролета контейнера с бетонной смесью определяется по известному расстоянию между электроконтактными датчиками и измеренному времени пролета контейнера.

Разогнанный до требуемых скоростей контейнер с бетонной смесью соударяется с мерным стержнем, на конце которого закреплен с помощью резьбы ударник цилиндрической формы.

При соударении оголовка и контейнера с исследуемой средой в оголовке и мерном стержне не должно возникать пластических деформаций. После соударения в оголовке и стержне формируется упругая волна сжатия, распространяющаяся вдоль оси стержня. Регистрация зависимости продольной деформации от времени в этой волне позволяет определить силу F , действующую на оголовок при проникании в контейнер с исследуемой средой. Сила сопротивления прямо пропорциональна упругой деформации ε : $F(t) = E\varepsilon(t) \cdot S$, где E – модуль упругости стержня (185 ГПа), S – площадь его поперечного сечения (320 мм²). Регистрация упругих деформаций в стержне производится с использованием тензодатчиков, наклеенных на боковой поверхности стержня в сечении на расстоянии 0,5 м от его переднего торца.

Для определения сил сопротивления при проникании оживального ударника в различные бетонные смеси использовался стальной цилиндрический мерный стержень длиной 1,5 м и диаметром 20,4 мм с пределом текучести более 2000 МПа. На ударяемом конце мерного стержня с помощью резьбы закреплялся оголовок в форме оживала (рис. 1). Оголовок выполнен из стали 30ХГСА с пределом текучести 650 МПа. Диаметр основания оживала равен 12 мм. В процессе проведения экспериментов оголовки не испытывали видимых остаточных деформаций.



Рис. 1. Оголовок

Стержень располагается на некотором расстоянии от дульного среза ствола так, чтобы соударение происходило сразу после полного вылета контейнера из ствола. Подставка, на которой располагается стержень, имеет юстировочные опоры, что позволяет обеспечить осесимметричный характер взаимодействия. Стержень своим задним торцом упирается в специальный упор, предотвращающий его смещение и гасящий энергию удара. Соударение происходит в вакуумной камере.

Относительная погрешность определения сил сопротивления внедрению методом мерного стержня в обратном эксперименте не превышает 10% [26].

Экспериментальные результаты

В экспериментах определялись силы сопротивления при проникании оживального оголовка в образцы из бетонных смесей с различным отношением цемент/песок (1 к 10, 1 к 5 и 1 к 2). Исследования проводились в диапазоне скоростей удара от 40 до 260 м/с. Приготовленная цементно-песчаная смесь с добавлением необходимого количества воды укладывалась в полипропиленовые контейнеры высотой 70 мм и внутренним диаметром 51 мм (рис. 2) и уплотнялась на вибростоле. Состав мелкозернистого бетона приведен в таблице 1. Наружный диаметр полипропиленового

цилиндра составлял 56,6 мм. К заднему торцу контейнера было приклеено дно из сплава Д16Т толщиной 3 мм. Контейнер, залитый мелкозернистым бетоном, до и после эксперимента №702 приведен на рис. 2, состав 1 к 5, скорость удара 100 м/с.



Рис. 2. Контейнер с мелкозернистым бетоном до и после эксперимента

Таблица 1

Состав мелкозернистого бетона

Соотношение цемент/песок	Соотношение вода/цемент
1 к 2	0,65
1 к 5	0,75
1 к 10	1,00

Один эксперимент №706 был проведен с образцом мелкозернистого бетона, залитым в контейнер, выточенный из алюминиевого сплава Д16Т. Высота заливки бетона составляла 70 мм. Внешний диаметр контейнера составлял 56,8 мм, толщина стенки 1,4 мм. Толщина дна контейнера составляла 2 мм. Перед заливкой бетона и после его затвердевания контейнеры взвешивались. Плотность мелкозернистого бетона определялась по известной массе образца и размерам контейнера. Условия проведения экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Условия проведения экспериментов

№	Соотношение цемент/песок	Скорость удара, м/с	Плотность, г/см ³	F_{max} , кН
1	2	3	4	5
678	1 к 5	168	2,26	17,4
679	1 к 5	167	2,31	17,6
682	1 к 10	182	2,17	9,8
683	1 к 10	195	2,21	11,6
688	1 к 2	163	2,45	18,4
689	1 к 2	152	2,46	19,4
697	1 к 2	238	2,27	23
698	1 к 2	244	2,28	25
699	1 к 2	42	2,31	11
700	1 к 2	106	2,30	13,7
702	1 к 5	100	2,22	10,4
703	1 к 5	251	2,30	18,6

Таблица 2 (продолжение)

1	2	3	4	5
704	1 к 5	116,5	2,28	10
705	1 к 5	258	2,26	21
706	1 к 10	236	1,81	13
707	1 к 10	91,6	2,21	4
708	1 к 10	112	2,17	5,5
709	1 к 10	232	2,22	11,7
715	1 к 2	47	2,33	8
716	1 к 2	244	2,52	25,5
717	1 к 2	84	2,4	11,2
718	1 к 2	133	2,41	18,1

В экспериментах определялись зависимости силы сопротивления прониканию оголовка в бетон различного состава от времени. На рис. 3 приведены характерные зависимости силы сопротивления прониканию от времени для бетонных смесей различного состава при скоростях в диапазоне 230–260 м/с.

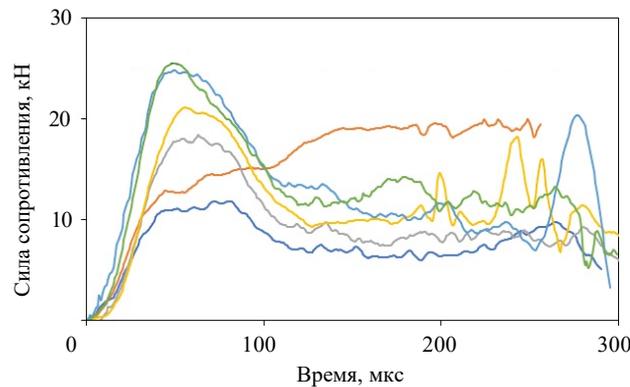


Рис. 3. Характерные зависимости сил сопротивления прониканию в бетон различных составов

На рисунке: — соотношение цемент/песок 1 к 10, эксперимент №709, скорость удара 232 м/с; — соотношение цемент/песок 1 к 10, эксперимент №706, скорость удара 236 м/с; — соотношение цемент/песок 1 к 5, эксперимент №703, скорость удара 251 м/с; — соотношение цемент/песок 1 к 5, эксперимент №705, скорость удара 258 м/с; — соотношение цемент/песок 1 к 2, эксперимент №698, скорость удара 244 м/с; — соотношение цемент/песок 1 к 2, эксперимент №716, скорость удара 244 м/с.

Для всех типов бетонных смесей характерно плавное нарастание силы сопротивления. Максимум силы сопротивления достигается при проникании на величину, примерно равную диаметру цилиндрической части оголовка (12 мм). После достижения максимума сила сопротивления начинает плавно убывать. По всей видимости, это связано с влиянием стенок контейнера, выполненного из полипропилена. Для эксперимента №706 при скорости удара 236 м/с для бетона с соотношением цемент/песок 1 к 10 был использован контейнер из сплава Д16Т, что, естественно, повлияло на ход зависимости силы сопротивления от времени. После достижения величины 13 кН за 45 мкс сила сопротивления продолжала рост и еще через 100 мкс

достигла величины 19 кН. Сравнение результатов этого эксперимента с результатами эксперимента №709 с тем же мелкозернистым бетоном при близкой скорости удара (232 м/с) показало, что более жесткие стенки контейнера из Д16Т препятствуют разрушению образца и приводят к дальнейшему увеличению силы сопротивления. На начальном этапе внедрения, где происходит быстрый рост силы сопротивления от 0 до 50 мкс, зависимости силы сопротивления близки и отличаются не более, чем на 1,5 кН. Более податливые стенки полипропиленового контейнера позволяют образцу расширяться и разрушаться, что приводит к уменьшению силы сопротивления после достижения максимума.

По результатам проведенных экспериментов определены максимальные силы сопротивления при проникании оживального оголовка в бетонные смеси с отношением цемент/песок 1 к 2, 1 к 5 и 1 к 10 со скоростями от 40 до 260 м/с. На рис. 4 представлены зависимости максимальной силы сопротивления от скорости удара в диапазоне скоростей 40–260 м/с. С ростом скорости удара максимальная сила сопротивления возрастает для всех исследованных смесей.

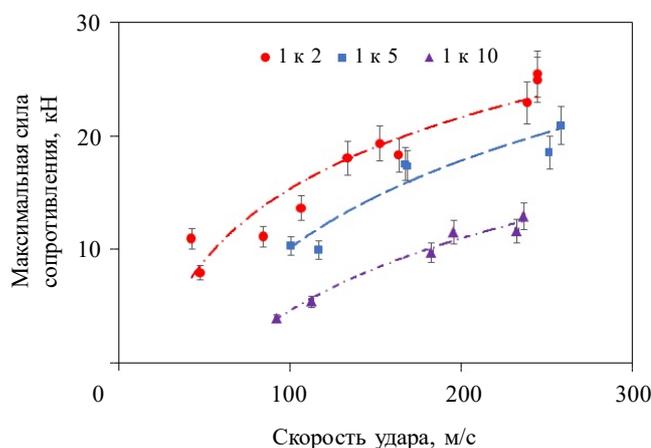


Рис. 4. Зависимость максимальной силы сопротивления прониканию от скорости удара для бетона разных составов

При внедрении оголовка в мелкозернистый бетон с составом 1 к 2 максимум силы растет с увеличением скорости удара от 11 кН при 40 м/с до 25 кН при 240 м/с. Для мелкозернистой смеси 1 к 5 максимальная сила сопротивления увеличивалась от 10 кН до 18,6 кН при возрастании скорости удара от 100 до 250 м/с. Для состава 1 к 5 максимальная сила практически не зависит от скорости при скоростях более 170 м/с. Для мелкозернистых бетонов составов 1 к 2 и 1 к 5 максимумы силы сопротивления достаточно близки. Для мелкозернистого бетона состава 1 к 10 значения силы сопротивления лежат значительно ниже, чем для составов 1 к 2 и 1 к 5. Максимум силы сопротивления для смеси 1 к 10 увеличивается с 4 до 13 кН с ростом скорости от 100 до 240 м/с.

Из рассмотрения зависимостей максимальных значений силы сопротивления внедрению от скорости удара можно сделать вывод, что для всех типов мелкозернистого бетона характерно возрастание силы сопротивления с ростом скорости удара до 160–170 м/с. При дальнейшем увеличении скорости сила сопротивления практически не растет.

Заклучение

Проведены экспериментальные исследования проникания цилиндрического стального ударника в бетоны различных составов при различных скоростях удара. Получены зависимости сил сопротивления прониканию в бетоны с составом цемент/песок 1 к 10, 1 к 5, 1 к 2. Диапазон изменения скоростей удара составил от 40 до 260 м/с. Определено, что с ростом концентрации цемента в бетонной смеси максимальная сила сопротивления прониканию оживального ударника возрастает до 2,5 раз. Исследование зависимости максимальной силы от скорости удара показало, что при росте скорости удара свыше 200 м/с максимальная сила сопротивления прониканию практически не увеличивается.

Результаты проведенных исследований можно использовать для верификации моделей поведения бетонов различных составов.

Список литературы

1. Wang Z.-L., Li Y.-C., Shen R.F., Wang J.G. Numerical study on craters and penetration of concrete slab by ogive-nose steel projectile. *Computers and Geotechnics*. 2007. Vol. 34. Iss. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.09.001>.
2. Feng J., Song M., He Q., Sun W., Wang L., Luo K. Numerical study on the hard projectile perforation on RC panels with LDPM. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 183. P. 58–74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.020>.
3. Liu J., Wu C., Yu Su, Li J., Shao R., Chen G., Liu Z. Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. P. 166–179. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.098>.
4. Chen X., Lu F., Zhang D. Penetration trajectory of concrete targets by ogived steel projectiles – Experiments and simulations. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 120. P. 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.06.004>.
5. Wang J., Wu H., Feng X. et al. Dynamic spherical cavity expansion analysis of concrete using the Bingham liquid constitutive model. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 120. P. 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.05.012>.
6. Liu C., Zhang X., Chen H., Wang J., Wei J., Xiong W. Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities. *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 138. Article No 103482. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019>.
7. Forrestal M.J., Tzou D.Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets. *International Journal of Solids and Structures*. 1997. Vol. 34. Iss. 31-32. P. 4127–4146. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(97\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(97)00017-6).
8. Forrestal M.J., Luk V.K. Dynamic spherical cavity-expansion in a compressible elastic-plastic solid. *Journal of Applied Mechanics*. 1988. Vol. 55. Iss. 2. P. 275–279. <https://doi.org/10.1115/1.3173672>.
9. Kotov V.L., Bragov A.M., Balandin V.V., Igumnov L.A., Lomunov A.K., Eremeyev V.A., Cazzani A. Cavity-expansion approximation for projectile impact and penetration into sand. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2022. Vol. 34. P. 395–421. <https://doi.org/10.1007/s00161-021-01062-8>.
10. Forquin P., Gary G., Gatuingt F. A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35. Iss. 6. P. 425–446. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.04.007>.
11. Pachman J., Chapman D.J., Foglar M., Künzel M., Proud W.G. Shock response of concrete, fibre concrete and ultrahigh performance concrete. *International Journal of Impact Engineering*. 2024. Vol. 183. Article No 104787. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104787>.
12. Shi Y., Lu Y., Cui J. Experimental study on dynamic mechanical properties of concrete under direct shear loading. *Cement and Concrete Composites*. 2023. Vol. 142. Article No 105150. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105150>.

13. Abbas M.A., Williams B.A., Heard W.F., Nei X. Residual mechanical properties of high strength concrete BBR9 subjected to dynamic uniaxial compressive loading. *Cement and Concrete Research*. 2024. Vol. 180. Article No 107488. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107488>.
14. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Ломунов А.К., Филиппов А.Р. Динамическое деформирование и разрушение хрупких структурно-неоднородных сред. *Проблемы прочности и пластичности*. 2012. Вып. 74. С. 59–67. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2012-74-1-59-67>.
15. Ламзин Д.А., Брагов А.М., Константинов А.Ю., Басалин А.В. Определение динамических модуля Юнга и коэффициента Пуассона хрупких материалов. *Проблемы прочности и пластичности*. 2023. Т. 85. №2. С. 243–252. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2022-85-2-243-252>.
16. Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Ломунов А.К., Филиппов А.Р. Высокоскоростное деформирование и разрушение хрупких и структурно-неоднородных сред. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. №4 (4). С. 1533–1535.
17. Holmquist T.J., Johnson G.R., Cook W.H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics*. Quebec, Canada. 26–29 Sept. 1993. P. 591–600.
18. Kamran, Iqbal M.A. A new material model for concrete subjected to high rate of loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2023. Vol. 180. Article No 104673. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104673>.
19. Садырин А.И. Модель динамического деформирования и разрушения бетона. *Проблемы прочности и пластичности*. 2003. Вып. 71. С. 122–128.
20. Feldgun V.R., Yankelevsky D.Z. Constitutive equations for reliable projectile penetration analysis into a concrete medium. *International Journal of Protective Structures*. 2019. Vol. 11. Iss. 2. P. 159–184. <https://doi.org/10.1177/2041419619860532>.
21. Forrestal M.J., Frew D.J., Hanchak S.J., Brar N.S. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles. *International Journal of Impact Engineering*. 1996. Vol. 18. Iss. 5. P. 465–476. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)00048-F](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)00048-F).
22. Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements. *International Journal of Impact Engineering*. 2003. Vol. 28. Iss. 5. P. 479–497. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00108-2](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00108-2).
23. Dawson A., Bless S., Levinson S. et al. Hypervelocity penetration of concrete. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35. Iss. 12. P. 1484–1489. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.069>.
24. Balandin V.V., Balandin V.I., Bragov A.M., Kotov V.L. Experimental study of the dynamics of penetration of a solid body into a soil medium. *Technical Physics*. 2016. Vol. 61. Iss. 6. P. 860–868. <https://doi.org/10.1134/S1063784216060037>.
25. Bragov A.M., Balandin V.V., Igumnov L.A., Kotov V.L., Kruszka L., Lomunov A.K. Impact and penetration of cylindrical bodies into dry and water-saturated sand. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 122. P. 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.012>.
26. Баландин В.В. Экспериментальное изучение процессов проникания осесимметричных тел в мягкие грунтовые среды. *Дисс... канд. физ.-мат. наук*. Н. Новгород. 2001. 141 с.

References

1. Wang Z.-L., Li Y.-C., Shen R.F., Wang J.G. Numerical study on craters and penetration of concrete slab by ogive-nose steel projectile. *Comput. Geotech.* 2007. Vol. 34. Iss. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.09.001>.
2. Feng J., Song M., He Q., Sun W., Wang L., Luo K. Numerical study on the hard projectile perforation on RC panels with LDPM. *Constr. Build. Mater.* 2018. Vol. 183. P. 58–74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.020>.
3. Liu J., Wu C., Yu Su, Li J., Shao R., Chen G., Liu Z. Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts. *Eng. Struct.* 2018. Vol. 173. P. 166–179. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.098>.

4. Chen X., Lu F., Zhang D. Penetration trajectory of concrete targets by ogived steel projectiles – Experiments and simulations. *Int. J. Impact Eng.* 2018. Vol. 120. P. 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.06.004>.
5. Wang J., Wu H., Feng X. et al. Dynamic spherical cavity expansion analysis of concrete using the Bingham liquid constitutive model. *Int. J. Impact Eng.* 2018. Vol. 120. P. 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.05.012>.
6. Liu C., Zhang X., Chen H., Wang J., Wei J., Xiong W. Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities. *Int. J. Impact Eng.* 2020. Vol. 138. Article No 103482. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019>.
7. Forrestal M.J., Tzou D.Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets. *Int. J. Solids Struct.* 1997. Vol. 34. Iss. 31-32. P. 4127–4146. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(97\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(97)00017-6).
8. Forrestal M.J., Luk V.K. Dynamic spherical cavity-expansion in a compressible elastic-plastic solid. *J. Appl. Mech.* 1988. Vol. 55. Iss. 2. P. 275–279. <https://doi.org/10.1115/1.3173672>.
9. Kotov V.L., Bragov A.M., Balandin V.V., Igumnov L.A., Lomunov A.K., Eremeyev V.A., Cazzani A. Cavity-expansion approximation for projectile impact and penetration into sand. *Contin. Mech. Thermodyn.* 2022. Vol. 34. P. 395–421. <https://doi.org/10.1007/s00161-021-01062-8>.
10. Forquin P., Gary G., Gatuingt F. A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain. *Int. J. Impact Eng.* 2008. Vol. 35. Iss. 6. P. 425–446. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.04.007>.
11. Pachman J., Chapman D.J., Foglar M., Künzel M., Proud W.G. Shock response of concrete, fibre concrete and ultrahigh performance concrete. *Int. J. Impact Eng.* 2024. Vol. 183. Article No 104787. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104787>.
12. Shi Y., Lu Y., Cui J. Experimental study on dynamic mechanical properties of concrete under direct shear loading. *Cem. Concr. Compos.* 2023. Vol. 142. Article No 105150. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105150>.
13. Abbas M.A., Williams B.A., Heard W.F., Nei X. Residual mechanical properties of high strength concrete BBR9 subjected to dynamic uniaxial compressive loading. *Cem. Concr. Res.* 2024. Vol. 180. Article No 107488. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107488>.
14. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Fillipov A.R. Dinamicheskoe deformirovanie i razrushenie khрупkikh strukturno-neodnorodnykh sred [Dynamic deformation and fracture of heterogeneous brittle media]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2012. Iss. 74. P. 59–67 (In Russian).
15. Lamzin D.A., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Basalin A.V. Opredelenie dinamicheskikh modulya Yunga i koeffitsienta Puassona khрупkikh materialov [Determination of the dynamic Young's modulus and Poisson's ratio of brittle materials]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2023. Vol. 85. No 2. P. 243–252.
16. Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Filippov A.R. Vysokoskorostnoe deformirovanie i razrushenie khрупkikh i strukturno-neodnorodnykh sred [High-speed deformation and fracture of brittle and structurally heterogeneous media]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Bulletin of the Nizhny Novgorod Lobachevsky University]*. 2011. No 4 (4). P. 1533–1535 (In Russian).
17. Holmquist T.J., Johnson G.R., Cook W.H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics*. Quebec, Canada. 26–29 Sept. 1993. P. 591–600.
18. Kamran, Iqbal M.A. A new material model for concrete subjected to high rate of loading. *Int. J. Impact Eng.* 2023. Vol. 180. Article No 104673. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104673>.
19. Sadyrin A.I. Model dinamicheskogo deformirovaniya i razrusheniya betona [Model of dynamic deformation and destruction of concrete]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2003. Iss. 71. P. 122–128 (In Russian).
20. Feldgun V.R., Yankelevsky D.Z. Constitutive equations for reliable projectile penetration analysis into a concrete medium. *Int. J. Prot. Struct.* 2019. Vol. 11. Iss. 2. P. 159–184. <https://doi.org/10.1177/2041419619860532>.
21. Forrestal M.J., Frew D.J., Hanchak S.J., Brar N.S. Penetration of grout and concrete

targets with ogive-nose steel projectiles. *Int. J. Impact Eng.* 1996. Vol. 18. Iss. 5. P. 465–476. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)00048-F](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)00048-F).

22. Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements. *Int. J. Impact Eng.* 2003. Vol. 28. Iss. 5. P. 479–497. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00108-2](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00108-2)

23. Dawson A., Bless S., Levinson S. et al. Hypervelocity penetration of concrete. *Int. J. Impact Eng.* 2008. Vol. 35. Iss. 12. P. 1484–1489. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.069>.

24. Balandin V.V., Balandin V.I., Bragov A.M., Kotov V.L. Experimental study of the dynamics of penetration of a solid body into a soil medium. *Tech. Phys.* 2016. Vol. 61. Iss. 6. P. 860–868. <https://doi.org/10.1134/S1063784216060037>.

25. Bragov A.M., Balandin V.V., Igumnov L.A., Kotov V.L., Kruszka L., Lomunov A.K. Impact and penetration of cylindrical bodies into dry and water-saturated sand. *Int. J. Impact Eng.* 2018. Vol. 122. P. 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.012>.

26. Balandin V.V. Eksperimentalnoe izuchenie protsessov pronikaniya osesimmetrichnykh tel v myagkie gruntovye sredy [Experimental study of the processes of penetration of axisymmetric bodies into soft ground environments]. *Dissertatsiya kandidata fiziko-matematicheskikh nauk [Cand. Sci. (Phys.&Math.). Dissertation]*. Nizhny Novgorod. 2001. 141 p. (In Russian).

EXPERIMENTAL STUDY OF PENETRATION OF STEEL PROJECTILE INTO FINE-GRAINED CONCRETE OF VARIOUS COMPOSITIONS*

Balandin V.V., Balandin V.I.

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

balandin@mech.unn.ru

Received by the Editor 2024/09/03

An experimental study of penetration of steel cylindrical impactors with an ogive head into fine-grained concrete of various compositions was conducted. In the course of the study, the dependences of the penetration resistance force on time for an ogive impactor at various impact velocities in an inverted experiment were determined. The experiments were carried out on the PG-57 installation using a measuring rod with strain gauges glued to it. A 57 mm pneumatic gun was used to accelerate containers with fine-grained concrete. Impact velocities varied from 40 m/s to 260 m/s. Concrete mixtures with different cement/sand ratios were studied. For these mixtures, the dependences of the resistance force on time and the maximum penetration resistance forces were determined. During the experiments, it was found that the maximum penetration resistance force increases with increasing cement concentration in the concrete mixture. The lowest values of the maximum resistance force were obtained for the concrete mixture 1 to 10. With increasing cement concentration in the concrete mixture, the maximum resistance force to penetration of the ogive striker increases approximately two to three times. For three compositions 1 to 10, 1 to 5, 1 to 2, a study was conducted on the effect of the impact speed on the value of the maximum resistance force to penetration for a cylindrical striker with an ogive head. The resistance force to penetration increases with increasing impact speed to speeds of 180–200 m/s. With a further increase in impact speed above 200 m/s, the resistance force to penetration remains almost constant.

Keywords: penetration resistance force, striker, reversed experiment.

*This study was supported by the Russian Science Foundation (grant No 22-79-10076).