ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ К ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭРОЗИИ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Танг Ван Лам, Б.И. Булгаков, О.В. Александрова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Аннотация. Бетонные конструкции, эксплуатируемые в тоннелях метро и других подземных сооружениях, как правило, находятся в непосредственном контакте с грунтовыми водами, содержащими твердые частицы горных пород (например: ил, песок, гравий и другие твердые вещества), что приводит к снижению их прочности и долговечности из-за процесса эрозии бетона. Рассмотрен метод исследования стойкости мелкозернистых бетонов к поверхностной эрозии. Исследования проводились в соответствии с требованиями стандарта ASTM C1138-97 (США), разработанного для моделирования реального процесса разрушения поверхностных слоев бетона под действием потока воды, содержащей твердые взвешенные частицы. Результаты проведенных этим методом исследований показали, что у бетонных образцов на основе модифицированного мелкозернистого бетона эрозия в среднем на 66 % мас. меньше, чем у контрольных образцов из непластифицированного песчаного бетона, поэтому такой бетон может быть использован для строительства тоннелей метро и других подземных сооружений, подвергаемых в процессе эксплуатации агрессивному воздействию грунтовых вод, обладающих высокой абразивностью.

Ключевые слова: эрозия бетона, твердые взвешенные частицы, грунтовые воды, модифицированный мелкозернистый бетон, тоннели метро

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.41-45

RESEARCH OF FINE-GRAINED CONCRETES RESISTANCE TO SURFACE EROSION IN WATER ENVIRONMENT

Tang Van Lam, B.I. Bulgakov, O.V. Aleksandrova

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

Abstract. This test method is intended to qualitatively simulate a behavior of swirling water containing suspended and transported solid objects (silt, sand, gravel, and other solids) that produce abrasion of concrete and cause potholes and related effects.

Concrete constructions in metro tunnels and other underground constructions normally are in direct contact with groundwater containing solid particles which reduce strength and durability of concrete due to the erosion process.

The scale of destruction of concrete structures is directly dependent on the characteristics of the original raw materials forming the concrete. Therefore, erosion resistance of concrete can be improved by reducing the ratio between water and cement, as well as by using modifiers of its structure: organo-mineral additives and fine fibers dispersed.

The main factors affecting the erosion resistance of concrete structures of underground facilities, are as follows:

- corrosion resistance of concrete and its resistance to abrasion;
- ratio between raw material components of concrete mix;
- properties of binders and fillers;
- presence of modifiers of concrete structures;
- nature of a surface finishing;
- availability of sites undergoing repair;
- state of the surface.

Results of research performed using this method illustrated that the erosion of the concrete samples based on modified fine concrete is in average by 66 % less than that of the control samples of unplasticized sand concrete. Therefore, such concrete can be used for construction of underground tunnels and other underground structures which are subjected during operation to aggressive action of groundwater containing suspended solid particles that have high abrasiveness.

Key words: erosion of concrete, solid suspended particles, ground water, modified fine-grained concrete, metro tunnels

Эрозия бетона представляет собой процесс разрушения его поверхностного слоя в результате абразивного воздействия потока воды, насыщенного

мелкими твердыми частицами. При этом с увеличением крупности таких частиц процесс эрозии бетона ускоряется [1–2].

Масштабы разрушения бетонных конструкций напрямую зависят от характеристик исходных сырьевых материалов, образующих бетон. Поэтому стойкость бетона к эрозии можно повысить за счет уменьшения соотношения между водой и цементом, а также путем использования модификаторов его структуры: органоминеральных добавок и диспергированных тонкодисперсных волокон [3–17].

На эрозионную стойкость бетонных конструкций подземных сооружений оказывают влияние следующие основные факторы:

- коррозионная стойкость бетона и его стойкость к истиранию;
- соотношение между сырьевыми компонентами бетонной смеси;
- свойства вяжущих веществ и заполнителей;
- наличие модификаторов структуры бетона;
- характер окончательной отделки поверхности;

Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения стойкости бетона к поверхностной эрозии в водной среде по стандарту ASTM C 1138-97

- наличие участков, подвергшихся ремонту;
- состояние поверхности.

Сравнительные испытания стойкости к поверхностной эрозии мелкозернистых бетонов, составы которых приведены в табл. 1, проводились в соответствии с требованиями стандарта ASTM C1138-97, разработанного для моделирования реального процесса разрушения поверхностных слоев бетона под действием потока воды, содержащей твердые взвешенные частицы [18].

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1 [18], ее внешний вид изображен на рис. 2.

Экспериментальная установка состояла из стального цилиндрического резервуара с внутренним диаметром 310 мм и высотой 460 мм, внутри которого на двух опорах размещался предварительно взвешенный образец испытуемого бетона (рис. 3), пропеллерной мешалки со скоростью вра-

Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки

Табл. 1. Составы мелкозернистых бетонов [19, 20]

Расход сырьевых материалов	Непластифицированный мелкозернистый бетон (НМЗБ) с прочностью на сжатие 40 МПа	Модифицированный мелкозернистый бетон (ММЗБ) с прочностью на сжатие 60 МПа
Портландцемент класса ЦЕМ II 42,5 Н, кг/м ³	611	641
Зола уноса ТЭЦ «Фалай», кг/м ³	306	321
Зола рисовой шелухи, кг/м ³	61	64
Песок реки Ло с модулем крупности 3,0, кг/м ³	836	876
Полипропиленовые тонкодисперсные волокна, кг/м ³	0	9,62
Суперпластификатор Асе 388, л/м ³	0	6,4
Вода, л/м ³	258	208

Рис. 3. Схема и фотография бетонного образца для испытаний на стойкость к поверхностной эрозии в водной среде

щения 1200 об./мин. и стальных хромированных шаров, количественное распределение которых по диаметрам приведено в табл. 2.

Бетонные образцы имели цилиндрическую форму диаметром 300 мм и высотой 100 мм. Перед испытанием бетонные образцы должны замачиваться в воде в течение, по крайней мере, 48 ч.

После завершения каждого 12-часового испытательного цикла образцы извлекали из резервуара, очищали от отслоившихся частиц и взвешивали. Общая продолжительность шести циклов испытаний одного бетонного образца составляла 72 ч.

Эрозию испытываемых мелкозернистых бетонов в процентах по массе рассчитывали по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100 \%,$$

где $\mathcal{E}$ — процент эрозии бетонного образца, % мас.; m_1 и m_2 — масса бетонного образца, соответственно, до и после испытаний, кг.

Табл. 2. Количество и диаметры стальных шаров

Количество шаров, шт.	Диаметр, мм
10	25,3
35	19,0
25	12,6

Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Из приведенных в табл. 3 экспериментальных результатов следует, что у бетонных образцов на основе ММЗБ эрозия в среднем на 66 % мас. меньше, чем у бетонных образцов из непластифицированного песчаного бетона.

В результате испытаний, проведенных в соответствии со стандартом ASTM C1138-97, было установлено, что мелкозернистый бетон, микроармированный полипропиленовыми волокнами, структура которого уплотнена за счет использования водоредуцирующего суперпластификатора Асе 388 и тонкодисперсных зол, обладает большей стойкостью к поверхностной эрозии в водной среде, чем НМЗБ. Поэтому такой бетон может быть использован для строительства туннелей метро и других подземных сооружений, подвергаемых в процессе эксплуатации агрессивному воздействию грунтовых вод, содержащих взвешенные частицы, обладающие высокой абразивностью.

Табл. 3. Эрозия мелкозернистых бетонных образцов в процентах по массе

Экспериментальные образцы	Эрозия бетонных образцов, % мас.			
	m_1	m_2	m_3	среднее
Образцы из ММЗБ	1,9	1,82	1,85	1,86
Образцы из НМЗБ	5,53	5,4	5,62	5,52

ЛИТЕРАТУРА

1. *Портик А.А.* Все о пенобетоне. СПб., 2003. 224 с.
2. *Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гусев Е.А.* Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / под ред. В.М. Москвина. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
3. *Маринин А.Н., Гарибов Р.Б., Овчинников И.Г.* Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации. Саратов: ПАТА, 2008. 261 с.
4. *Гусев Б.В., Файвусович А.С.* Построение математической теории процессов коррозии бетона // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 38–41.

5. *Гусев Б.В., Файвусович А.С.* Основы математической теории процессов коррозии бетона. М.: Научный мир, 2006. 40 с.
6. *Межнякова А.В., Овчинников И.Г.* Методы оценки долговечности армированных конструкций при действии нагрузок и агрессивных сред // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 8. С. 44–45.
7. *Кочетков А.В., Кокодеева Н.Е., Рапопорт П.Б., Рапопорт Н.В., Шашков И.Г.* Состояние современного методического обеспечения расчета и конструирования дорожных одежд // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2011. № 1. С. 65–74.

8. Рапопорт П.Б., Рапопорт Н.В., Кочетков А.В., Васильев Ю.Э., Каменев В.В. Проблемы долговечности цементных бетонов // Строительные материалы. 2011. № 5. С. 38–41.

9. Янковский Л.В. Метод прогнозирования состояния цементобетонных строительных конструкций в условиях воздействия климата // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 5. С. 315–319.

10. Янковский Л.В. К вопросу оценки и прогноза состояния цементных бетонов, эксплуатирующихся в условиях воздействия климата Урала и Сибири // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2012. № 2. С. 86–95.

11. Янковский Л.В. К вопросу оценки стойкости бетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия климата // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1 (38). С. 125–138.

12. Янковский Л.В. Применение пленкообразующего препарата для увеличения стойкости бетонных изделий в условиях резкого континентального климата // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8. С. 79–85.

13. ACI 210R-03. Erosion of concrete in hydraulic structure. ACI Manual Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 2003. 24 p.

14. ASTM C779/C779M-12. Standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces. 2012. 6 p.

15. Liu Y.W., Yen T., Hsu T.H. Abrasion erosion of concrete by water-borne sand // Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36. Pp. 1814–1820.

16. Đánh giá khả năng chống ăn mòn và bảo vệ cốt thép trong bê tông của phụ gia Sika ferrogard. Viện Khoa học Xây dựng Hà Nội, 2004. Tr. 15. (Оценка защитной способности железобетона к коррозии с помощью добавки «Sika ferrogard». Институт науки и технологии строительства. Ханой, 2004. 15 с.).

17. Phạm Hữu Hanh, Lê Trung Thành. Bê tông cho công trình biển. NXB Xây dựng. Hà Nội. 2012. Tr. 216. (Фам Хью Хань, Ле Чунг Тхань. Бетон для морских сооружений. Ханой, 2015. 216 с.).

18. ASTM C1138-97. Standard test method for abrasion resistance of concrete (underwater method). 1997. 5 p.

19. Tăng Văn Lâm. Nghiên cứu chế tạo bê tông hạt mịn chất lượng cao dùng cho mặt đường sân bay // Luận văn Thạc sỹ — Trường Đại học Xây dựng. 2010. Tr. 98. (Танг Ван Лам. Изучение производства высококачественного мелкозернистого бетона, используемого в аэродромных покрытиях // Степень магистра технологии. Строительный университет. 2010. 98 с.).

20. Tăng Văn Lâm, Đào Viết Đoàn. Bê tông công trình Ngầm và Mỏ, NXB Xây Dựng, Hà Nội. 2015. Tr. 378. (Танг Ван Лам, Дао Виет Доан. Бетоны, предназначенные для строительства метро и шахт. Ханой. 2015, 378 с.).

Поступила в редакцию в сентябре 2016 г.

Об авторах: Танг Ван Лам — аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, lamvantang@gmail.com;

Булгаков Борис Игоревич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (495) 287-49-14, доб. 31-01, fakultetst@mail.ru;

Александрова Ольга Владимировна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (495) 287-49-14, доб. 31-01, aleks_olvl@mail.ru.

Для цитирования: Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В. Исследование стойкости мелкозернистых бетонов к поверхностной эрозии в водной среде // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 1 (100). С. 41–45. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.41-45

REFERENCES

1. Portik A.A. Vse o penobetonе [All of Aerated Concrete]. Saint-Petersburg. 2003, 224 p. (In Russian)

2. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseyev S.N. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity [Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods for Their Protection]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 535 p. (In Russian)

3. Garibov R.B., Marinin A.N., Ovchinnikov I.G. Soprotivleniye zhelezobetonnykh konstruksiy vozdeystviyu khlordnoy korrozii i karbonizatsii [Resistance of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chloride Corrosion and Carbonation]. Saratov, RATA Publ., 2008, 260 p. (In Russian)

4. Gusev B.V., Fayvusovich A.C. Postroyeniye matematicheskoy teorii protsessov korrozii betona [Construction of the Mathematical Theory of Concrete Corrosion Processes]. Stroitel'nyye materialy [Building materials]. 2008, no. 3. pp. 38–41. (In Russian)

5. Gusev B.V., Fayvusovich A.C. Osnovy matematicheskoy teorii protsessov korrozii betona [Fundamentals of the Mathematical Theory of Concrete Corrosion Processes]. Nauchnyy mir [Scientific World], 2006, 40 p. (In Russian)

6. Mezhyakova A.V., Ovchinnikov I.G. Metody otsenki dolgovечnosti armirovannykh konstruksiy pri deystvii nagru-

zok i agressivnykh sred [Methods for Assessing the Durability of Reinforced Structures under the Action of Loads and Corrosive Environments]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Construction]. 2008, no. 8, pp. 44–45. (In Russian)

7. Kochetkov A.V., Kokodeyeva N.Ye., Rapoport P.B. Sostoyaniye sovremennogo metodicheskogo obespecheniya rascheta i konstruirovaniya dorozhnykh odezhd [The State of Modern Methodical Maintenance of Calculation and Design of Pavements]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchey sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Herald of Perm National Research Polytechnic University. Protection of the Environment, Transport, Safety of Life]. 2011, no. 1, pp. 65–74. (In Russian)

8. Rapoport P.B., Rapoport N.V., Kochetkov A.V., Vasil'yev Yu.E., Kamenev V.V. Problemy dolgovechnosti tsementnykh betonov [Problems of Durability of Cement Concrete]. *Stroitel'nyye materialy* [Building materials]. 2011, no. 5, pp. 38–41. (In Russian)

9. Yankovskiy L.V. Metod prognozirovaniya sostoyaniya tsementobetonnykh stroitel'nykh konstruktov v usloviyakh vozdeystviya klimata [Method of Forecasting the State of Cement-Concrete Building Structures under Conditions of Climate Impacts]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. Arkhitektura. Stroitel'stvo. Transport* [Proceedings of Civil Engineers. Architecture. Building. Transport]. 2012, no. 5, pp. 315–319. (In Russian)

10. Yankovskiy L.V. K voprosu otsenki i prognoza sostoyaniya tsementnykh betonov, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh vozdeystviya klimata Urala i Sibiri [On Assessment and Forecast of Cement Concrete Operating under Conditions of Climate Impacts of the Urals and Siberia]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchey sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Herald of Perm National Research Polytechnic University. Protection

of the Environment, Transport, Safety of Life]. 2012, no. 2, pp. 86–95. (In Russian)

11. Yankovskiy L.V. K voprosu otsenki stoykosti betonnykh konstruktov, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh vozdeystviya klimata [On Assessment of Durability of Concrete Structures Operating under Conditions of Climate Impacts]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Vestnik Tomsk State University of Architecture and Building]. 2013, no. 1, pp. 125–138. (In Russian)

12. Yankovskiy L.V. Primeneniye plenkoobrazuyushchego preparata dlya uvelicheniya stoykosti betonnykh izdeliy v usloviyakh rezkogo kontinental'nogo klimata [Application of the Film-Forming Specimen for Increase of Durability of Concrete Products under Conditions of Sharp Continental Climate]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil Engineering Journal]. 2012, no. 8, pp. 79–109. (In Russian)

13. ACI 210R-03. Erosion of Concrete in Hydraulic structure. ACI Manual Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 2003, 24 p.

14. ASTM C779-12. Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces, 2012, 6 p.

15. Liu Y. W., Yen T., Hsu T.H. Abrasion Erosion of Concrete by Waterborne Sand. *Cement and Concrete Research*. 2006, vol.36, pp. 1814–1820.

16. Evaluation of corrosion resistance and protection of reinforcement in concrete additives ferrogard Sika. Institute of Science and Technology Building. Hanoi, 2004. p. 15.

17. Pham Huu Hanh, Le Trung Thanh. Concrete for marine structures, published Construction. Hanoi. 2012. 216 p.

18. ASTM C1138-97. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method), 1997, 5 p.

19. Tang Van Lam. Research grained concrete manufacturing high quality for airport pavement. Master - National University of Civil Engineering. 2010, 98 p.

20. Tang Van Lam, Dao Viet Doan. Concrete buildings and Underground Mining. Construction Publisher. Hanoi. 2015, 378 p.

About the authors: **Tang Van Lam** — postgraduate student, Department of Technology of Binders and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lamvantang@gmail.com;

Bulgakov Boris Igorevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Binders and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7 (495) 287-49-14, ext. 31-01; fakultetst@mail.ru;

Alexandrova Olga Vladimirovna — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Binders and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7(495) 287-49-14, ext. 31-01, aleks_olvi@mail.ru.

For citation: Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Issledovanie stoykosti melkozernistykh betonov k poverkhnostnoy erozii v vodnoy srede [Research of Fine-Grained Concretes Resistance to Surface Erosion in Water Environment]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 1 (100), pp. 41–45. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.41-45