



А. Ю. ДАВИДЕНКО
В. П. ПОПОВ
Д. В. ПОПОВ

КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ КАК КРИТЕРИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА

KINETIC CHARACTERISTICS OF FRACTURE PROCESSES AS CRITERIA OF CONCRETE DURABILITY

Рассматриваются результаты исследования процессов разрушения бетона различными видами внешнего воздействия, полученные самарской школой по разрушению материалов. Анализируется процесс разрушения бетона с выделением основных этапов, формируемых по объему выделяемой энергии трещинообразования. Согласно исследованиям одна из групп параметров разрушения бетона – кинетические характеристики – предлагается в качестве критерия долговечности этого материала. В предложенную группу входят такие показатели, как интенсивность трещинообразования и склонность бетона к трещинообразованию. При этом обосновывается возможность применения предлагаемых характеристик.

Ключевые слова: механика разрушения, кинетические характеристики, интенсивность трещинообразования, склонность бетона к трещинообразованию, долговечность бетона

The results of the study of the processes of destruction of concrete by different types of external influences obtained by the Samara school of architecture and construction Academy are considered. The process of destruction of concrete with the release of the main stages formed by the volume of the released energy of cracking is analyzed. According to researches one of groups of parameters of concrete destruction – kinetic characteristics-is offered as criteria of durability of this material. The proposed group includes such indicators as the intensity of cracking and the tendency of concrete to crack. In this case, the possibility of using the proposed characteristics is justified.

Keywords: fracture mechanics, kinetic characteristics, the intensity of cracking, the tendency of concrete to crack formation, durability of concrete

Долговечность конструкционных материалов, в том числе и строительных, в значительной мере определяется скоростью их разрушения в условиях эксплуатации и зависит как от вида внешнего воздействия, так и от его интенсивности [1–4]. При этом, в отличие от других материалов, конструкционный бетон имеет ту особенность, что его долговечность не только обеспечивает надёжность эксплуатации зданий и сооружений, но в значительной степени повышает эффективность капитальных вложений. Как показывает опыт, затраты на эксплуатацию зданий и сооружений, как правило,

превышают первоначальные капитальные вложения в течение срока службы строительных конструкций. Поэтому чем точнее определены сроки безотказной эксплуатации бетонной или железобетонной конструкции, тем эффективнее капитальные вложения, тем длительнее межремонтные сроки эксплуатации здания или сооружения и тем меньше затраты на их эксплуатацию.

В настоящее время практически отсутствуют количественные методы прогнозирования долговечности конструкционного бетона, как, впрочем, и в целом зданий и сооружений. Для

этого существует набор качественных показателей в виде капитальности зданий и требований нормативных документов, где ряд параметров бетона регламентируются на уровне «не хуже». При этом, учитывая особенности строительства, а также низкий уровень технологической дисциплины и контроля качества в российском строительстве, трудно надеяться на то, что любое возведённое здание или сооружение «продержится» до планового капитального ремонта без дополнительных работ по поддержанию его работоспособности.

Бетонные и железобетонные конструкции, используемые в настоящее время практически повсеместно и для различного назначения в больших объемах, отличаются от конструкций, выполненных из других материалов, тем, что их структура, прочностные и эксплуатационные свойства возможно прогнозировать только с определенной вероятностью. На строительной площадке, да и в заводских условиях, свойства материала формируются непосредственно в конструкции. Их нельзя, как, например, стальные или пластмассовые конструкции, собрать из проката или деталей, изготовленных в заводских условиях при строго регламентированных технологических параметрах. При изготовлении бетонных и железобетонных конструкций и изделий вариация технологических параметров зачастую в несколько раз выше по сравнению с требованиями технологии. Поэтому большое значение имеет не только повышение культуры производства, но и контроль качества полученной строительной продукции, который позволяет гарантировать долговечность конструкций.

Как показывают исследования, в том числе и выполненные авторами данной статьи [5, 6], долговечность бетона является следствием процессов трещинообразования, проявляющихся в его структуре под внешним воздействием (силовым, низкотемпературным, влажностным и др.). Именно кинетика их протекания и в конечном итоге их последствия в виде процессов разрушения материала определяют сроки службы любой бетонной или железобетонной конструкции.

В данной работе предлагаются количественные критерии оценки долговечности бетона как конструкционного материала, в качестве которых предложены кинетические характеристики процессов разрушения бетона при определенном виде воздействия: склонность бетона к трещинообразованию и интенсивность трещинообразования.

Исследования процессов разрушения бетона, выполненные авторами данной работы, показали, что, как и другие конструкционные

хрупко разрушающиеся материалы, последний имеет три стадии разрушения, независимо от вида и интенсивности внешних воздействий. Они квалифицируются тремя уровнями энергетического состояния в соответствии с основными положениями энергетической теории разрушения [6–8].

На первом уровне, при малой интенсивности внешнего воздействия, энергия разрушения бетона мала, что объясняется малым числом и небольшими параметрами образованных в материале трещин. На следующем уровне, по мере повышения интенсивности внешнего воздействия, энергия разрушения возрастает и достигает такой величины, что может фиксироваться приборами. При этом количество трещин и их параметры возрастают, они начинают объединяться и намечаются пути развития магистральных трещин. Этот этап в физике разрушения называется этапом «подготовки разрушения». И на последнем этапе, называемом собственно «разрушение», увеличение интенсивности внешнего воздействия приводит к образованию магистральных трещин и разделению материала на отдельные части, не способные противостоять внешним воздействиям. На этом этапе энергия разрушения достигает максимального значения, характеризующего энергетические способности разрушенного материала.

Для исследований были использованы образцы из шестнадцати составов бетона с различными составами, приведенными в табл. 1.

Авторам данной работы удалось математически описать последовательность разрушения бетона на всех трех этапах его деструкции при циклическом низкотемпературном, силовом воздействии сжатием, растяжением и изгибом, а также при гидростатическом давлении [10]. При этом был использован математический аппарат энергетической теории механики разрушения, основанный на работах А.А. Гриффитса [11] и кинетической концепции С.Н. Журкова [12]. Исследования показали, что скорость разрушения бетона зависит от двух видов характеристик: начальных параметров структуры материала и кинетических характеристик, количественно связывающих скорость приложения внешнего воздействия к материалу со скоростью его разрушения. К начальным параметрам структуры бетона были отнесены: поверхностная энергия, модуль упругости, коэффициент Пуассона и прочность бетона на сжатие; к кинетическим – склонность бетона к трещинообразованию и интенсивность трещинообразования. Количественные значения начальных физико-механических параметров представлены в табл. 2.

Таблица 1

Составы исследуемых бетонов

№ п/п	Вид цемента	Расход цемента, кг/м ³	Водоцементное отношение В/Ц	Состав бетонной смеси по массе Ц:П:Щ	Расход химической добавки ПАЩ-1, %
1	Быстротвердеющий портландцемент	375	0,4	1:1,59:3,18	-
2		375	0,6	1:1,52:3,03	-
3		625	0,4	1:0,78:1,57	-
4		625	0,6	1:0,72:1,44	-
5	Алюминатный портландцемент	375	0,4	1:1,59:3,18	-
6		375	0,6	1:1,52:3,03	-
7		625	0,4	1:0,78:1,57	-
8		625	0,6	1:0,72:1,44	-
9	Шлакопортланд-цемент	500	0,7	1:0,83:1,67	-
10		300	0,7	1:1,81:3,62	-
11		500	0,5	1:1,90:1,80	-
12		300	0,5	1:1,94:3,88	-
13		500	0,7	1:0,83:1,67	0,4
14		300	0,7	1:1,81:3,62	0,2
15		500	0,5	1:1,90:1,80	0,4
16		300	0,5	1:1,94:3,88	0,2

Таблица 2

Значения физико-химических характеристик в воздушносухом и водонасыщенном состоянии

№ п/п	Модуль упругости E, МПа		Коэффициент Пуассона μ		Удельная поверхностная энергия ν , Дж/м ²		Прочность на сжатие R _{сж} , МПа	
	Воздушно-сухие	Водонасыщенные	Воздушно-сухие	Водонасыщенные	Воздушно-сухие	Водонасыщенные	Воздушно-сухие	Водонасыщенные
1	30561,3	37167,6	0,220	0,219	4,87	3,79	39,1	38,8
2	21818,2	26113,3	0,221	0,210	7,24	1,28	25,9	21,2
3	22862,3	32295,7	0,218	0,155	8,54	2,68	35,2	28,5
4	25382,4	27897,5	0,187	0,206	6,11	2,82	26,0	23,1
5	20374,2	26337,7	0,248	0,235	2,15	1,37	27,0	21,5
6	17118,0	22790,6	0,254	0,243	3,41	0,55	17,7	14,9
7	22522,6	29504,6	0,196	0,212	3,35	0,46	19,4	14,1
8	22007,1	24651,6	0,237	0,233	2,48	0,51	18,2	14,2
9	21138,3	25160,6	0,229	0,221	4,06	1,11	23,7	17,0
10	15481,9	18469,9	0,237	0,243	3,27	1,07	22,1	15,5
11	26189,5	29894,3	0,218	0,204	6,34	2,56	30,6	25,9
12	22894,6	25990,4	0,234	0,221	5,85	2,92	37,8	32,8
13	22815,6	24457,1	0,217	0,174	4,23	3,50	28,6	26,5
14	22561,9	24064,0	0,198	0,212	3,30	2,60	28,6	26,6
15	25174,0	26801,1	0,201	0,163	6,50	5,04	33,9	31,3
16	24367,3	25266,9	0,220	0,219	6,57	5,34	35,2	32,6

Анализ кинетических характеристик показал, что они достаточно информативны, доступны для физического понимания и могут быть определены экспериментальным путем. В частности, склонность бетона к трещинообразованию имеет размерности, включающие в себя опосредованный временной параметр: м/цикл при низкотемпературном циклическом воздействии или м/Па при силовом или гидростатическом давлении. Интенсивность трещинообразования – величина безразмерная, характеризующая относительный уровень разрушения материала при определенном уровне его нагружения внешним воздействием. Принятая авторами методика определения значений совокупности кинетических характеристик [3] через выполнение экспериментальных исследований и проведение лабораторных испытаний материала по стандартным методикам и вычисление последних позволили получить их количественные значения, представленные в табл. 3.

Было отмечено, что эти характеристики достаточно чувствительны к интенсивности при-

ложения внешнего воздействия и в какой-то мере могут служить критерием долговечности бетона. В частности, была установлена количественная связь между интенсивностью нагружения материала и значениями совокупности кинетических характеристик. А также отмечено влияние влажности и пористости на значения кинетических характеристик. Зависимость совокупности кинетических характеристик от пористости представлена графически на рис. 1 и 2.

В настоящее время ведутся исследования по разработке относительно простой и достаточно достоверной методики определения кинетических характеристик процессов разрушения бетона, которые позволили бы квалифицировать долговечность бетона в зависимости от интенсивности внешнего воздействия определенного вида.

При этом особое внимание уделяется неразрушающему способу, позволяющему определить реальный уровень разрушения материала в конструкции. Перспективным в этом направлении является акустический метод определения затухания ультразвука при различных уровнях нагружения материала.

Таблица 3

Значения совокупности кинетических характеристик в воздушносухом и водонасыщенном состоянии

№ п/п	Совокупность кинетических характеристик	
	Воздушносухие	Водонасыщенные
1	16,06	16,33
2	4,46	10,01
3	8,91	3,79
4	2,51	5,14
5	25,68	13,34
6	5,74	14,89
7	11,62	7,36
8	5,6	10,93
9	7,09	7,15
10	19,36	10,03
11	6,71	7,17
12	10,7	18,87
13	9,54	4,24
14	9,41	10,86
15	7,42	3,69
16	11,03	10,06

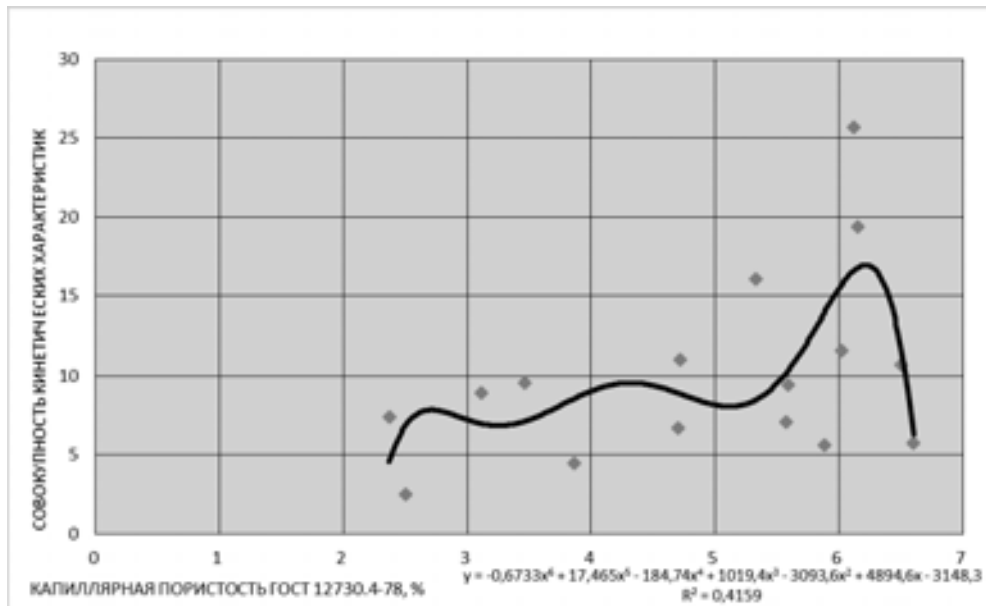


Рис. 1. Зависимость совокупности кинетических характеристик от капиллярной пористости для образцов в воздушносухом состоянии

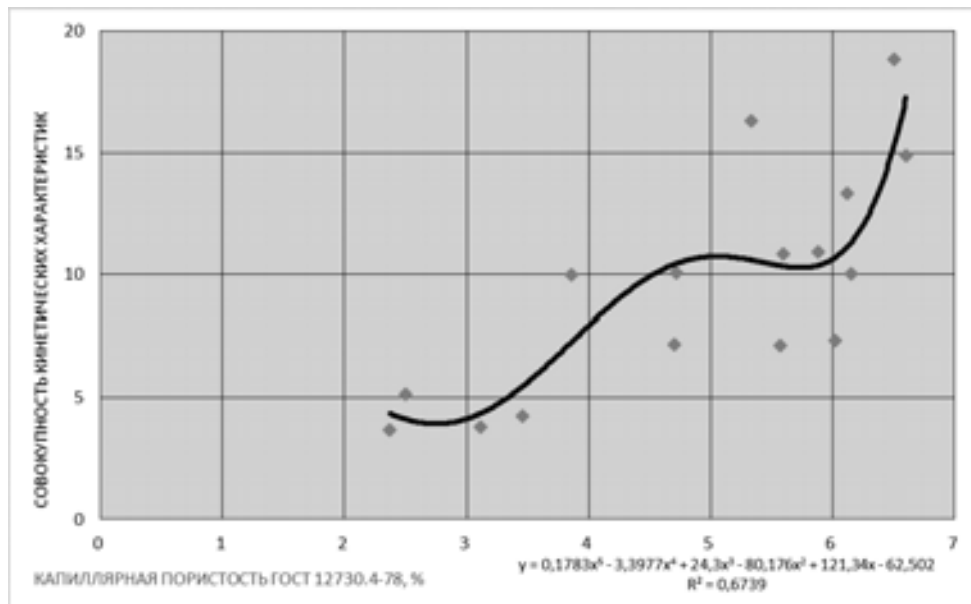


Рис. 2. Зависимость совокупности кинетических характеристик от капиллярной пористости для образцов в водонасыщенном состоянии

Выводы. Выполненные авторами исследования позволяют развить и в дальнейшем применить на практике количественный метод прогнозирования долговечности конструкционного бетона на базе измерения значений кинетических характеристик процессов его разрушения, таких как склонность бетона к трещинообразованию и интенсивность трещинообразования [13,14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко В.М., Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л. Основы механики разрушения бетона // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию В.П. Селяева. М., 2014. С. 9–20.

2. Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л. Основы фрактальной механики разрушения бетона // Механика разрушения строительных материалов и конструкций: материалы VIII Академических чтений РААСН. М., 2014. С. 289–298.

3. Комохов П.Г., Попов В.П. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения М.: Изд-во РИА, 1999. 111 с.

4. Штарк И., Вишт Б. Долговечность бетона. Киев: Оранта, 2004. 295 с.

5. Попов В.А., Давиденко А.Ю. Анализ действия «эффекта Ребиндера» при разрушении бетона и оценка эффективности применения химических добавок // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 2006. № 11–12. С. 11–17.

6. Попов В.П., Коренькова С.Ф., Попов Д.В. Моделирование процесса разрушения бетона гидростатическим давлением на базе механики разрушения // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 2010. № 10. С. 5–7.

7. Истомин А.Д., Беликов Н.А. Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и вида напряженного состояния // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 159–16.

8. Фурса Т.В., Петров М.В., Данн Д.Д., Лыков А.Е. Разработка комплексного метода оценки процессов трещинообразования при одноосном сжатии армированного бетона // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 63–69.

9. Василевская Н.Г., Енджиевская И.Г., Дружинкин С.В., Зубенко В.А., Зырянов Е.В. Структурные факторы управления прочностью высокопрочного монолитного бетона // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 151.

10. Попов В.П., Давиденко А.Ю., Попов Д.В. Особенности описания процессов разрушения бетона при различных видах внешнего воздействия // Научное обозрение. 2015. № 7. С. 123–127.

11. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc. 1921. Series A-221. Pp. 163–198.

12. Журков С.Н. Проблемы прочности твердых тел // Вестник АН СССР. 1957. № 11. С. 78–82.

13. Мосесов М.Д. Акустические методы определения долговечности материалов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сборник статей. Самара: СамГТУ (АСА). 2017. С. 61–65.

14. Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д. Разработка нового неразрушающего метода контроля процесса трещинообразования в бетоне под воздействием климатических факторов // Технологии бетонов. 2013. № 2 (79). С. 36–38.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Seljaev V.P., Seljaev P.V., Kechutkina E.L. Fundamentals of concrete fracture mechanics. *Dolgovlechnost' stroitel'nykh materialov, izdelij i*

konstrukcij Materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvjashhennoj 70-letiju zaslužennogo dejatel'ja nauki Rossijskoj Federacii, akademika RAASN, doktora tehniceskikh nauk, professora Seljaeva Vladimira Pavlovicha [In the collection Durability of building materials, components and structures Materials of all-Russian scientific-technical conference dedicated to the 70th anniversary of the honored worker of science of the Russian Federation, academician of RAACS, doctor of technical Sciences, Professor Selyaev Vladimir Pavlovich]. Moscow, 2014, pp. 9–20. (In Russian)

2. Seljaev V.P., Seljaev P.V., Kechutkina E.L. Basic fractal mechanics of concrete fracture. *Mehanika razrusheniya stroitel'nykh materialov i konstrukcij Materialy VIII Akademicheskikh chtenij RAASN* [Mechanics of destruction of building materials and structures Materials VIII Academic readings RAASN]. Moscow, 2014, pp. 289–298. (In Russian)

3. Shtark I., B. Viht B. *Dolgovlechnost' betona* [Durability of concrete]. Kiev, Oranta Publ., 2004. 295p.

4. Popov V.A., Davidenko A.Ju. Analysis of the “Rebinder effect” in the destruction of concrete and evaluation of the effectiveness of chemical additives. *Izvesti VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura* [News of Universities. Construction and Architecture], 2006, no. 11–12, pp. 11–17. (in Russian)

5. Popov V.P., Koren'kova S.F., Popov D.V. Modeling of concrete destruction process by hydrostatic pressure on the basis of fracture mechanics. *Izvesti VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura* [News of Universities. Construction and Architecture], 2010, no. 10, pp. 5–7. (in Russian)

6. Istomin A.D., Belikov H.A. The dependence of the boundaries of micro-cracking of concrete on its strength and type of stress state. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2011, no. 1–2, pp. 159–162. (in Russian)

7. Fursa T.V., Petrov M.V., Dann D.D., Lykov A.E. Development of a comprehensive method for assessing the processes of cracking in uniaxial compression of reinforced concrete. *Defektoskopija* [Defectoscopy], 2017, no. 6, pp. 63–69. (in Russian)

8. Vasilovskaja N.G., Endzhievskaja I.G., Druzhinkin S.V., Zubenko V.A., Zyrjanov E.V. Structural factors control the strength of high strength reinforced concrete. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2012, no. 4, 151 p. (in Russian)

9. Popov V.P., Davidenko A.Ju., Popov D.V. Description features of fracture processes of concrete under various types of external influences. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2015, no. 7, pp. 123–127. (in Russian)

10. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. 1921. Series A-221. pp. 163–198.

11. Zhurkov S.N. The problem of strength of solids. *Vestnik AN SSSR* [Bulletin of the USSR Academy of Sciences], 1957, no. 11, pp. 78–82. (in Russian)

12. Komohov P.G., Popov V.P. *Jenergeticheskie i kineticheskie aspekty mehaniki razrusheniya* [Energy and ki-

netic aspects of fracture mechanics]. Moscow, RIA Publ., 1999. 111 p.

13. Mosesov M.D. Acoustic methods for determining the durability of materials. Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. *Stroitel'stvo sbornik statej. Samarskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet* [Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction collection of Articles. Samara State Technical University], Samara, 2017, pp. 61-65. (In Russian)

14. Fursa T.V., Osipov K.Ju., Dann D.D. Development of a new non-destructive method for monitoring the process of cracking in concrete under the influence of climatic factors. *Tehnologii betonov* [Concrete technology], 2013, no. 2(79), pp. 36-38. (in Russian)

Об авторах:

ДАВИДЕНКО Анна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации строительного производства

Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: aezg@mail.ru

DAVIDENKO Anna Yu.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Technology and Organization of Construction Production Chair

Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: aezg@mail.ru

ПОПОВ Валерий Петрович

доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: npc-ria@yandex.ru

POPOV Valery P.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Engineering Geology, Bases and Foundations Chair Samara State Technical University

Academy of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: npc-ria@yandex.ru

ПОПОВ Дмитрий Валерьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: popov38@yandex.ru

POPOV Dmitry V.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Engineering Geology, Bases and Foundations Chair Samara State Technical University

Academy of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: popov38@yandex.ru

Для цитирования: Давиденко А.Ю., Попов В.П., Попов Д.В. Кинетические характеристики процессов разрушения как критерии долговечности бетона // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, № 3. С. 99–105. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.13.

For citation: Davidenko A.Yu., Popov V.P., Popov D.V. Kinetic Characteristics of Fracture Processes as Criteria of Concrete Durability // Urban Construction and Architecture. 2019. V.9, 3. Pp. 99–105. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.13.