



УДК 693:539.3

М. Л. ПОЗДЕЕВ, аспирант каф. теории сооружений и технической механики;
И. В. СМАГИН, аспирант каф. теории сооружений и технической механики;
Д. М. ЛОБОВ, канд. техн. наук, ст. преп. каф. железобетонных, каменных и
деревянных конструкций; **С. Ю. ЛИХАЧЕВА**, канд. физ.-мат. наук, проф.
каф. теории сооружений и технической механики

СТАДИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет». Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-96, эл. почта: maksim.leon.pz@yandex.ru

Ключевые слова: каменная кладка, стадии разрушения, трещинообразование, аппроксимация диаграммы деформирования, корреляция цифровых изображений.

Каменная кладка является анизотропным материалом, для описания ее диаграмм деформирования, зависящих от ориентации главных напряжений относительно осей анизотропии, требуется использовать методiku, которая позволит аналитически установить стадии напряженно-деформированного состояния. В работе описана методика определения стадий разрушения каменной кладки при одноосном сжатии графоаналитическим методом по результатам анализа дискретных производных экспериментальной зависимости объемных деформаций от главного сжимающего напряжения. Средствами корреляции цифровых изображений визуализированы картины трещинообразования, подтверждающие качественный переход между стадиями напряженно-деформированного состояния.

Функциональная зависимость между напряжениями и относительными деформациями, также известная как диаграмма деформирования или диаграмма состояния, описывает механическое поведение материала конструкции при нагрузке. В общем случае эти зависимости могут быть представлены в виде нелинейных функций, полученных путём аппроксимации экспериментальных данных при различных видах нагрузки. При проектировании строительных конструкций, включая каменные кладки, диаграммы деформирования определяют механическое поведение большинства математических физически нелинейных моделей материалов.

В физически нелинейных моделях пластичности типа течения [1] диаграммы деформирования определяют изменение поверхности нагружения материала в пластической зоне. В деформационных теориях пластичности для анизотропных моделей каменной кладки [2] или бетона с трещинами [3] диаграммы определяют редуцирование секущих модулей деформации в осях ортотропии, для изотропных моделей [4, 5] – редуцирование секущих объемных и сдвиговых модулей деформации.

При расчетах стержневых элементов по нелинейной деформационной модели, изложенной, в частности, в нормах проектирования железобетонных конструкций [6], диаграммы деформирования определяют распределение напряжений в поперечном сечении элемента конструкции. В [6] для расчетов по нелинейной деформационной модели в качестве диаграмм состояния бетона,



используют криволинейные или кусочно-линейные (двухлинейные и трехлинейные) зависимости.

Первые работы по определению стадий разрушения каменных столбов были основаны на визуальной оценке схем трещинообразования. В работе [7] выделяется три стадии работы каменных столбов: первая стадия характеризуется появлением трещин в отдельных кирпичках; во второй – единичные трещины соединяются вместе и образуют сквозные трещины через несколько рядов кладки; в третьей стадии кладка расслаивается на отдельные участки-столбики, которые раздавливаются и теряют свою устойчивость.

В нормах по проектированию каменных и армокаменных конструкций [8] на основе теории сопротивления анизотропных материалов сжатию [9] описана методика получения кусочно-линейных диаграмм деформирования кладки, используемых для расчета кирпичных столбов на вертикальную сжимающую нагрузку. Выделение трех механизмов разрушения (сжатие, отрыв, сдвиг) позволяет авторам работы [9] построить трехлинейную диаграмму деформирования, выделив три характерные области работы каменных столбов: область совместной работы материала в зонах отрыва, сдвига, раздавливания, область выключения зоны отрыва из работы, область выключения зоны сдвига из работы.

При напряженных состояниях, отличных от одноосных, положение параметрических точек диаграммы деформирования будет зависеть от вида напряженного состояния, что, в частности, отражено в нормах проектирования железобетонных конструкций [6]. В работе [10] было показано, что при использовании одноосной диаграммы деформирования в расчетах по деформационной теории пластичности каменной стены на сдвиг с обжатием, минимальное отклонение от экспериментальных данных наблюдается только при высоких уровнях сжимающей нагрузки. Это свидетельствует о необходимости корректировки исходных диаграмм для напряженных состояний, отличных от одноосного сжатия. В связи с этим требуется применить методику, которая позволит аналитически определить этапы работы кладки в зависимости от напряженного состояния на основе функциональной зависимости напряжений от деформаций.

В работе [11] предложен общий графоаналитический метод определения границ микротрещинообразования бетона, который может быть использован и при сложных видах напряженного состояния каменных кладок. Метод позволяет установить стадии работы материала при нагружении, исходя из анализа производных дискретных функций – экспериментальных диаграмм деформирования. Для бетона получено до пяти стадий, включая стадию разупрочнения, характеризуемую ниспадающим участком диаграммы деформирования. Этот метод использован в данной работе для определения стадий разрушения каменной кладки при сжатии.

Материалы и методы. Экспериментальные диаграммы деформирования получены для образца каменной кладки размером 510x510x120 мм, изготовленного по ГОСТ 32047-2012. Использован утолщенный силикатный кирпич пустотностью 9% марки М150 по ГОСТ 379-2015 и цементный раствор со средним пределом прочности при сжатии 12,3 МПа. Характеристики материалов каменной кладки представлены в таблице.



Прочностные характеристики кирпича и раствора

Материал	Методика испытаний	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа
Кирпич	ГОСТ Р 58527-2019	15,5 (11%)	3,1 (17%)
Раствор	ГОСТ 5802-86 ГОСТ 310.4-81	12,3 (10%)	4,3 (11%)

Примечание – В скобках указано значение коэффициента вариации.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине ЦД100. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Сжимающая нагрузка от плиты прессы 1 передается на образец через шариковый шарнир 3 на стальную балку 4, а затем на образец 6 через прокладки из фторопласта (тефлона) 5, позволяющие уменьшить стеснение поперечных деформаций в приопорных зонах, как это показано в работе [12] на бетонных образцах. Измерение деформаций производится шестью индикаторами часового типа 7, расположенными по обеим сторонам образца согласно ГОСТ 32047-2012.

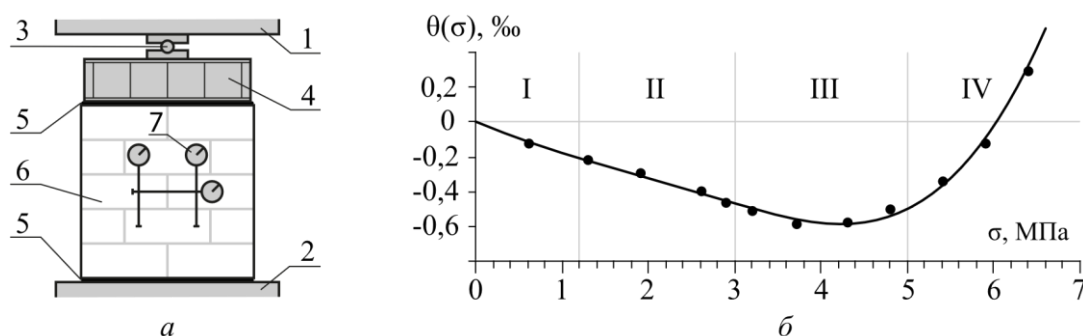


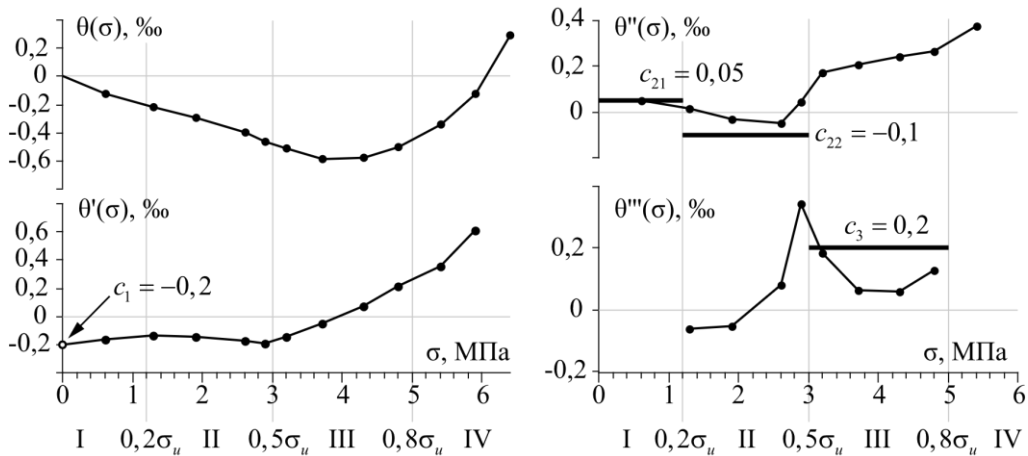
Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а): 1 – подвижная траверса, 2 – неподвижная траверса, 3 – шариковый шарнир, 4 – нагружающая балка, 5 – прокладки из фторопласта, 6 – образец каменной кладки, 7 – индикаторы часового типа; и экспериментальные данные (б) зависимости объемных деформаций θ от напряжений σ и их аппроксимация

Результаты и обсуждение. По результатам экспериментального исследования построены графики зависимости продольной ε_1 и поперечной ε_2 деформации от напряжений σ и определена зависимость объемной деформации $\theta = (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)/3$ от действующих напряжений в образце (экспериментальные точки на рис. 1, б и зависимость $\theta(\sigma)$ на рис. 2).

Производные дискретной функции $\theta(\sigma)$ на рис. 2 получены из выражения:

$$\theta'(\sigma) = \frac{\theta(\sigma + \Delta\sigma) - \theta(\sigma - \Delta\sigma)}{2\Delta\sigma}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ – дискретный шаг между экспериментальными данными.


 Рис. 2. Экспериментальная зависимость $\theta(\sigma)$ и ее дискретные производные

Согласно [11] экспериментальные данные в виде некоторой функции могут быть аппроксимированы полиномом, который в развернутом виде можно представить в виде кусочно-гладкой функции $y = f(x)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1(0 \leq x < X_1) = c_0 + c_1(x - X_0) + \frac{c_{21}(x - X_0)^2}{2}, \\ y_2(X_1 \leq x < X_2) = y_1(X_1) + y'_1(x) \cdot (x - X_1) + \frac{c_{22}(x - X_1)^2}{2}, \\ y_3(X_2 \leq x < X_3) = y_2(X_2) + y'_2(x) \cdot (x - X_2) - \frac{c_{22}(x - X_2)^2}{2} + \frac{c_3(x - X_2)^3}{6}, \\ y_4(X_3 \leq x \leq X_4) = y_3(X_3) + y'_3(x) \cdot (x - X_3) + \frac{y''_3(x)(x - X_3)^2}{2} - \frac{2c_3(x - X_3)^3}{6} + \frac{c_4(x - X_3)^4}{24}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где y_i – функция на интервале $i = 1 \dots 4$ (см. рис. 1, б), c_i – коэффициенты, определяемые графическим путем из анализа графиков производных дискретных функций, представленных экспериментальными данными (диаграммы состояния на рис. 2); X_i – искомые границы стадий напряженно-деформированного состояния образца.

В результате построена кривая на рис. 1, б, наилучшим образом аппроксимирующая экспериментальные данные одноосного сжатия. Полученные картины трещинообразования в конце каждой стадии представлены на рис. 3. Концу первой стадии работы соответствует величина нагрузки 20% от разрушающей, концу второй – 50%; концу третьей – 80%. Напряжение, при котором график зависимости $\theta(\sigma)$ пересекает ось $\sigma = 0$, характеризует переход от контракции к дилатации – объемному расширению вследствие раскрытия трещин. Стоит отметить сложность в определении старших коэффициентов c_i , при описанном графоаналитическом способе, поскольку взятие дискретных производных высоких порядков требует сгущения экспериментальных данных, а наличие вероятностного разброса значений увеличивает погрешность для каждого следующего шага взятия дискретных производных. В качестве альтернативы может быть использован более строгий математический метод градиентного спуска, который был использован в работе [10] путем поиска минимума функции



суммы квадратов отклонений по двум исследуемым параметрам. В таком случае описанный графоаналитический способ позволит определить начальные параметры для численного приближения, а алгоритм градиентного спуска обеспечит математически точное решение в рамках метода.

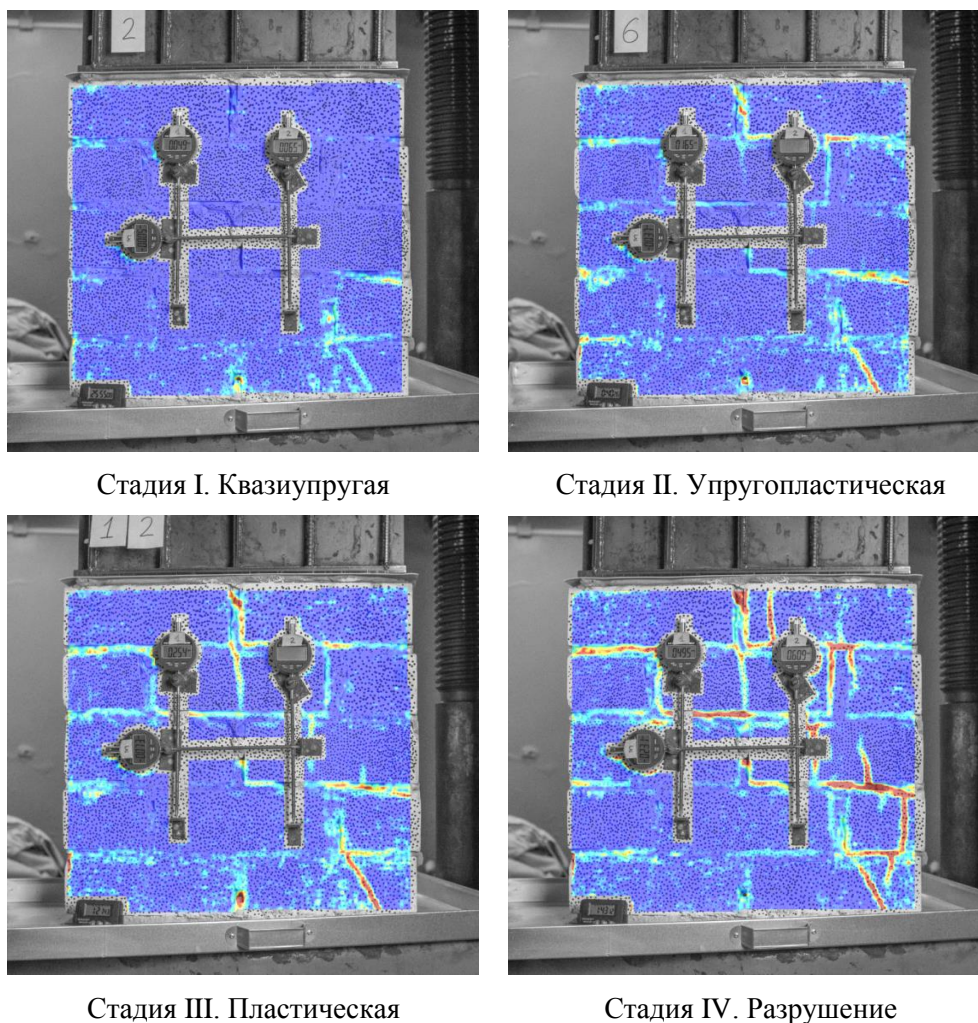


Рис. 3. Картины трещинообразования в конце каждой стадии, полученные методом корреляции цифровых изображений (DIC)

Таким образом, анализ диаграмм деформирования по методике [11] с использованием диаграмм состояния позволяет установить границы стадий напряженно-деформированного состояния каменной кладки, что подтверждается картинками трещинообразования, полученными методом корреляции цифровых изображений. В дальнейшем метод может быть применен для определения границ стадий работы для других напряженных состояний и других ориентаций главных напряжений относительно осей ортотропии каменной кладки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lourenco, P. Anisotropic Softening Model for Masonry Plates and Shells / P. Lourenco // Journal of structural engineering. – 2000. – Vol. 126, № 9. – P. 1008–1016.



2. Тюпин, Г. А. Деформационная теория пластичности каменной кладки / Г. А. Тюпин. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 1980. – № 6. – С. 28–30.
3. Darwin, D. Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete / D. Darwin, D. Pecknold // Journal of Engineering Mechanics. – 1977. – Vol. 103. – P. 229.
4. Гениев, Г. А. Вариант деформационной теории пластичности бетона / Г. А. Гениев. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1969. – № 2. – С. 18.
5. Вариант деформационной теории пластичности бетона в плоском напряжённом состоянии / В. М. Круглов, В. Т. Ерофеев, Н. И. Ватин, Аль Дулайми Салман Давуд Салман. – Текст : электронный // Транспортные сооружения : интернет-журнал. – 2019. – Том 6, № 4. – URL: <http://dx.doi.org/10.15862/11SATS419>.
6. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр : актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 : дата введения 20 июня 2019 г. – Москва : Минстрой России, 2019. – 150 с. – Текст : непосредственный.
7. Онищик, Л. И. Каменные конструкции промышленных и гражданских зданий / Л. И. Онищик. – Москва-Ленинград : Государственное издательство строительной литературы, 1939. – 209 с. – Текст : непосредственный.
8. СП 15.13330.2020 Каменные и армокаменные конструкции : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2020 г. N 902/пр : актуализированная редакция СНиП II-22-81*: дата введения 1 июля 2021 г. – Москва : Минстрой России, 2021. – 130 с. – Текст : непосредственный.
9. Соколов, Б. С. Аналитическая оценка напряженно-деформированного состояния каменных кладок при сжатии на основе авторской теории / Б. С. Соколов, А. Б. Антаков // Строительные материалы. – 2019. – № 9. – С. 51–55. – Текст : непосредственный.
10. Расчет каменных стен с использованием деформационной теории пластичности / М. Л. Поздеев, С. Ю. Лихачева, И. В. Смагин, О. В. Радайкин. – Текст : непосредственный // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Том 15, № 3 (59). – С. 163–174.
11. Зиновьев, В. Н. Определение границ микротрещинообразования бетона при сжатии тензометрическим методом по изменению объемной деформации / В. Н. Зиновьев. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 2011. – № 2. – С. 11-16.
12. Strain-softening of concrete in uniaxial compression / J. G. M. van Mier, S. P. Shah, M. Arnaud [et al.] // Materials and Structures. – 1997. – Vol. 30, № 4. – P. 195–209.

POZDEEV Maksim Leonidovich, postgraduate student of the chair of structural theory and technical mechanics; SMAGIN Ilya Vasilyevich, postgraduate student of the chair of structural theory and technical mechanics; LOBOV Dmitry Mikhailovich, candidate of technical sciences, senior teacher of the chair of reinforced concrete, stone and wooden structures; LIKHACHYOVA Svetlana Yurevna, candidate of physical and mathematical sciences, professor of the chair of structural theory and technical mechanics

STAGES OF STRESS-STRAIN STATE OF MASONRY UNDER UNIAXIAL COMPRESSION



Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-96, e-mail: maksim.leon.pz@yandex.ru

Key words: masonry, failure stages, cracking, approximation of stress-strain curve, digital image correlation.

Masonry is an anisotropic material, and to describe its deformation diagrams, which depend on the orientation of the principal stresses relative to the anisotropy axes, it is necessary to use a technique that will allow us to analytically establish the stages of the stress-strain state. The paper describes a technique for determining the stages of masonry failure under uniaxial compression using graph-analytical method based on the results of analyzing discrete derivatives of the experimental dependence of volume strains on the principal compressive stress. Digital image correlation tools are used to visualize cracking patterns confirming the qualitative transition between the stages of stress-strain state.

REFERENCES

1. Lourenco P. Anisotropic Softening Model for Masonry Plates and Shells / Journal of structural engineering. 2000, Vol. 126, № 9, P. 1008-1016.
2. Tyupin, G. A. Deformatsionnaya teoriya plastichnosti kamennoi kladki [Deformation theory of plasticity of masonry] Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Structural mechanics and structural design]. 1980, № 6, P. 28-30.
3. Darwin D. Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete / Journal of Engineering Mechanics. 1977, Vol. 103, P. 229.
4. Geniev G. A. Variant deformatsionnoi teorii plastichnosti betona [A variant of the deformation theory of plasticity of concrete]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1969, № 2, P. 18.
5. Kruglov V. M., Erofeev V. T., Vatin N. I., Al-Dulaimi Salman Dawood Salman Variant deformatsionnoy teorii plastichnosti betona v ploskom napryazhyonnom sostoyanii [Version of the deformation theory of plastic ductility of concrete in a plane stress state]. Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» [Russian journal of transport engineering]. 2019, № 4, Vol. 6. URL: <http://dx.doi.org/10.15862/11SATS419>.
6. SP 63.13330.2018 Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii [Concrete and reinforced concrete structures]: svod pravil : izdanie ofitsialnoe : utv. prikazom Ministerstva stroitelstva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaistva RF ot 19 dekabrya 2018 g. № 832/pr : aktualizirovannaya redaktsiya SNIP 52-01-2003: data vved. 20 iyunya 2019 g. – Moscow : Minstroy Rossii, 2019, 150 p.
7. Onishchik L. I. Kamennye konstruksii promyshlennykh i grazhdanskikh zdaniy [Stone structures of industrial and civil buildings]. Moscow-Leningrad, Gosudarstvennoe izdatelstvo stroitel'noy literatury, 1939, 209 p.
8. SP 15.13330.2020 Kamennye i armokamennye konstruksii [Masonry and reinforced masonry structures]: svod pravil : izdanie ofitsialnoe : utv. prikazom Ministerstva stroitelstva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaistva RF ot 30 dekabrya 2020 g. N 902/pr : aktualizirovannaya redaktsiya SNIP II-22-81*: data vved. 1 iyulya 2021 g. Moscow, Minstroy Rossii, 2021, 130 p.
9. Sokolov B. S., Antakov A. B. Analiticheskaya otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kamennykh kladok pri szhatii na osnove avtorskoj teorii [Analytical assessment of the stress-strain state of stone masonry under compression on the basis of the author's theory]. Stroitelnye Materialy [Construction Materials]. 2019, № 9, P. 51-55.
10. Pozdeev M. L., Likhachyova S. Yu., Smagin I. V., Radaikin, O. V. Raschet kamennykh sten s ispolzovaniem deformatsionnoy teorii plastichnosti [Simulation of masonry



wall using the deformation theory of plasticity]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Kazan State Power Engineering University Bulletin]. 2023, Vol. 15, № 3(59), P. 163-174.

11. Zinovev V. N. Opredelenie granits mikrotreshchinoobrazovaniya betona pri szhatii tenzometricheskim metodom po izmeneniyu obemnoy deformatsii [Determination of concrete microcracking boundaries in compression by strain gauge method based on the change in volume strain] Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2011, №2, P. 11-16.

12. Strain-softening of concrete in uniaxial compression / J. G. M. van Mier, S. P. Shah, M. Arnaud [et al.] // Materials and Structures. – 1997. – Vol. 30. – № 4. – P. 195-209.

© М. Л. Поздеев, И. В. Смагин, Д. М. Лобов, С. Ю. Лихачева, 2025

Получено: 16.12.2024 г.