

# Совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона

**Игорь Михайлович БЕЗГОДОВ**, научный сотрудник, e-mail: bezgodovim@mgsu.ru

**Елена Николаевна ДМИТРЕНКО**, кандидат технических наук, доцент, зам. директора по учебной работе филиала НИУ МГСУ в г. Мытищи, зав. кафедрой прикладной механики и математики, e-mail: dmitrenkoen@mgsu.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы при расчете железобетонных конструкций на основе диаграммы деформирования бетона при сжатии, которая представлена как в российских, так и в зарубежных нормативных документах по проектированию бетонных и железобетонных конструкций. Корректность их соответствия для всех классов бетона остается весьма приближенной, особенно существенное отличие возникает при использовании еuronorm в связи с различной формой и размерами образцов. В настоящее время отсутствуют методические рекомендации по определению предельных относительных деформаций бетона при осевом сжатии и построению криволинейных диаграмм деформирования, что приводит к ограниченности получения экспериментальных данных и, как следствие, не позволяет вводить в отечественные нормы более детальные значения предельных деформаций. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению предельных относительных деформаций бетона при сжатии для различных классов бетона, позволившие составить аналитические зависимости для оценки предельных относительных деформаций и описания криволинейных диаграмм деформирования. Рассмотрены различные варианты использования деформационной модели для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции, сделан вывод о необходимости использования не только конечных значений предельных деформаций, но и их промежуточных значений. Для этого необходимы достоверные диаграммы « $\sigma$ – $\epsilon$ » для всех классов бетона. Освещены трудности измерения деформаций в бетоне, подвергшемся пиковой нагрузке, которая соответствует призменной прочности, а также магистральных трещин, появившихся в условиях длительного ступенчатого нагружения. Предложены варианты более точных измерений. Необходимы разработка и внедрение для оценки предельной деформативности бетона при сжатии нового ГОСТ «Бетоны. Методы определения полных диаграмм» на основе разработанной методики получения полных диаграмм деформирования бетона при сжатии.

**Ключевые слова:** призменная прочность, модуль упругости, класс бетона, диаграмма деформирования бетона, предельная относительная деформация.

## IMPROVEMENT OF CURVILINEAR DIAGRAMS OF CONCRETE DEFORMATION

**Igor M. BEZGODOV**, e-mail: bezgodovim@mgsu.ru

**Elena N. DMITRENKO**, e-mail: dmitrenkoen@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavlshosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

**Abstract.** Problems when calculating reinforced concrete structures based on the concrete deformation under compression diagram, which is presented both in Russian and foreign regulatory documents on the design of concrete and reinforced concrete structures are considered. The correctness of their compliance for all classes of concrete remains very approximate, especially a significant difference occurs when using Euronorm due to the different shape and sizes of the samples. At present, there are no methodical recommendations for determining the ultimate relative deformations of concrete under axial compression and the construction of curvilinear deformation diagrams, which leads to limited experimental data and, as a result, does not make it possible to enter more detailed ultimate strain values into domestic standards. The results of experimental studies to determine the ultimate relative deformations of concrete under compression for different classes of concrete, which allowed to make analytical dependences for the evaluation of the ultimate relative deformations and description of curvilinear deformation diagrams, are presented. The article discusses various options for using the deformation model to assess the stress-strain state of the structure, it is concluded that it is necessary to use not only the finite values of the ultimate deformations, but also their intermediate values. This requires reliable diagrams “ $\sigma$ – $\epsilon$ ” for all classes of concrete. The difficulties of measuring deformations in concrete subjected to peak load, corresponding to the prismatic strength, as well as main cracks that appeared under conditions of long-term step loading are highlighted. Variants of more accurate measurements are proposed. Development and implementation of the new standard GOST “Concretes. Methods for determination of complete diagrams” on the basis of the developed method for obtaining complete diagrams of concrete deformation under compression for the evaluation of ultimate deformability of concrete under compression are necessary.

**Key words:** prismatic strength, modulus of elasticity, class of concrete, concrete deformation diagram, ultimate relative deformation.

**Р**асчет железобетонных элементов во многом зависит от вводимых в него параметров, соответствующих реальному поведению бетона под нагрузкой. Одна из основных зависимостей — диаграмма деформирования бетона, которая входит в нормативные документы многих стран мира [1]. В СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения» также включены диаграммы деформирования, но корректность их соответствия для всех классов бетона весьма приближенная.

Европейские нормы (EN 1992-1-1:2004) нормируют величину предельной деформативности, соответствующую пиковой нагрузке и деформации с учетом нисходящей ветви. Однако использовать эти значения нельзя из-за различной формы и размеров образцов [2]. В связи с чем возникает вопрос соответствия физико-механических характеристик бетона, полученных на разных образцах. Вызывает сомнение идентичность диаграмм « $\sigma$ — $\varepsilon$ » и соответствия предельных деформаций пиковой нагрузке и ниспадающей ветви.

Отсутствие ГОСТ по оценке предельной деформативности бетона при сжатии, а также методики получения полных диаграмм « $\sigma$ — $\varepsilon$ » не позволяет вводить в отечественные нормы более детальные значения предельных относительных деформаций, что снижает достоверность расчетов. Вероятно, поэтому было рекомендовано принимать предельные относительные деформации бетона при сжатии для непродолжительного действия нагрузки  $\varepsilon_{b0} = 200 \cdot 10^{-5}$  вне зависимости от класса бетона. По результатам наших экспериментов [3–5] данное значение относительной деформации соответствует бетону с призмочной прочностью 20–30 МПа, а при

более высоких значениях прочности предельная деформативность повышается.

В настоящее время разработана методика получения полных диаграмм деформирования бетона при сжатии [4], которая может стать основой для внедрения нового ГОСТ «Бетоны. Методы определения полных диаграмм деформирования бетона при сжатии».

Авторы статьи провели испытания различных классов бетона [3–6] с оценкой предельной деформативности при достижении призмочной прочности и полных деформаций с учетом нисходящей ветви, отработали методики получения диаграмм в условиях длительного ступенчатого нагружения. Разработанные устройства позволяют изучать деструктивные процессы, которые протекают в близкой к разрушению стадии в условиях кратковременного и длительного нагружения, решать задачи времени релаксации напряжений в бетоне в условиях длительного нагружения в зависимости от уровня начального напряжения.

Хотелось бы отметить, что экспериментальное подтверждение диаграммы « $\sigma$ — $\varepsilon$ » восходящей ветви не составляет особого труда. Однако при получении корректных сведений по нисходящей ветви имеются технические трудности, которые заключаются в том, что после достижения пиковой нагрузки, соответствующей призмочной прочности, в материале образуются магистральные трещины с выходом на поверхность образца, поэтому здесь трудно измерить деформации. Если относительные деформации измеряются тензорезисторами, то трещины, проходящие через датчик, его разрывают, в то же время трещины, которые находятся рядом или параллельно поверхности тензорезистора, снимают напряжения, меняя знак

напряжения, или перестают реагировать на процессы деформирования. Измерение деформаций всего образца также не будет корректным, поскольку в средней части образца-призмы разрушение будет более значительным, чем в торцевых частях, где трещинообразование сдерживается плитами прессы. Наиболее точно измерить относительные деформации можно с помощью индикаторов часового типа, установленных в средней части образца-призмы.

Для описания нисходящей ветви в первом приближении участок от 1 до  $0,85R_b$  можно принимать симметричным восходящей ветви. При изготовлении строительных конструкций все реже применяют бетоны с призмочной прочностью 20–30 МПа, поэтому актуальность использования нисходящей ветви будет снижаться.

Характер изменения диаграммы деформирования бетона может зависеть от множества факторов. К основным относятся призмочная прочность, модуль упругости и предельная относительная деформация. Как показали эксперименты [3, 7], с ростом призмочной прочности возрастает линейность деформирования и для оценки напряженно-деформированного состояния на всех этапах нагружения необходимо иметь криволинейную диаграмму, которая наиболее точно соответствует реальному поведению материала.

Рассмотрим некоторые особенности изменения диаграммы « $\sigma$ — $\varepsilon$ » в зависимости от призмочной прочности и уровня нагружения бетона. В таблице приведены значения доли предельной относительной деформации в зависимости от уровня напряжений. Согласно таблице начальный участок до  $0,3$ – $0,4R_b$  для всех классов бетона практически линейный. При дальней-

## Зависимость предельной относительной деформации от уровня напряжений

$R_b$ , МПа	Относительный уровень напряжений $\sigma/R_b$											
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1
23,3	$\frac{8}{3,8}$	$\frac{16}{7,5}$	$\frac{27}{12,7}$	$\frac{39}{18,4}$	$\frac{50}{23,6}$	$\frac{62}{29,2}$	$\frac{79}{37,3}$	$\frac{98}{46,2}$	$\frac{110}{51,9}$	$\frac{124}{58,5}$	$\frac{157}{74,1}$	$\frac{212}{100}$
	53,8	$\frac{13}{5,3}$	$\frac{26,3}{10,8}$	$\frac{39,7}{16,3}$	$\frac{54,3}{22,3}$	$\frac{70,3}{28,9}$	$\frac{86,7}{35,6}$	$\frac{105,3}{43,2}$	$\frac{128}{52,3}$	$\frac{141}{57,8}$	$\frac{159}{65,2}$	$\frac{186,3}{76,4}$
96,5	$\frac{21,3}{7,4}$	$\frac{45}{15,6}$	$\frac{68}{23,5}$	$\frac{91}{31,3}$	$\frac{114,3}{39,6}$	$\frac{138}{47,8}$	$\frac{165,3}{57,2}$	$\frac{194}{67,1}$	$\frac{210}{72,7}$	$\frac{227}{78,7}$	$\frac{250,3}{86,6}$	$\frac{289}{100}$

Примечание. В числителе даны относительные деформации  $\times 10^{-5}$ , а в знаменателе — доля, %, данной деформации от предельной.

шем деформировании начинают проявляться микротрещины и быстроснатекающая деформация ползучести, которые сказываются на нелинейности процесса деформирования. С ростом уровня напряжений нелинейность возрастает и при относительном уровне, близком к 1, рост напряжений прекращается, а деформации продолжают увеличиваться. Далее напряжения начинают падать при возрастании деформаций. При относительном уровне  $0,9R_b$  у бетона с призменной прочностью 23,3 МПа проявляется 58,5 % предельной относительной деформации, а у бетона с  $R_b = 96,5$  МПа доля предельной деформации составляет 78,7 % (см. таблицу).

В ходе экспериментов установлено [5], что если снять нагрузку в момент максимального напряжения у бетона с низкой прочностью, то видимых трещин на поверхности образца не обнаруживается. Трещины соединяются в магистральные на нисходящем участке диаграммы, а деформации нисходящей ветви и степень падения напряжений будут зависеть от прочности бетона. Чем ниже прочность бетона, тем больше деформативность нисходящей ветви и ниже степень падения напряжений. Нисходящая ветвь хорошо проявляется для бетонов с призменной прочностью до 35–40 МПа. При более

высокой прочности она носит неустойчивый характер, а при призменной прочности более 50 МПа практически отсутствует.

В обзорной статье [8] были проанализированы различные эмпирические зависимости между напряжениями и деформациями, степень аппроксимации которых и пределы применения ограничены. Основные параметры определяющих зависимостей « $\sigma$ – $\varepsilon$ » — предельная относительная деформация  $\varepsilon_{b0}$ , соответствующая призменной прочности, и начальный модуль упругости  $E_b$ .

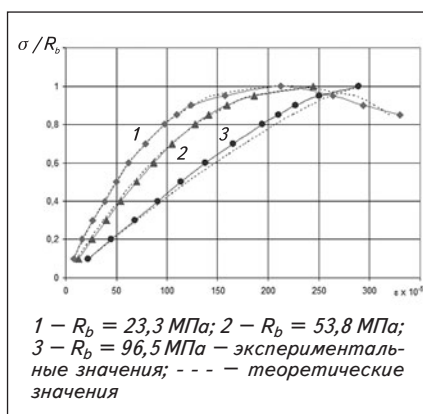
Предельные относительные деформации, соответствующие призменной прочности, с ростом класса бетона возрастают [3, 5] и для оценки предельной деформативности можно воспользоваться зависимостью (1), которая неплохо согласуется с результатами эксперимента

$$\varepsilon_{b0} = 0,0225\sqrt[3]{R_b/E_b}. \quad (1)$$

Отличительная особенность деформационной модели — возможность оценивать напряженно-деформированное состояние конструкции на всех этапах ее работы по мере возрастания нагрузки от нуля до разрушения. И здесь необходимы не только конечные значения предельных деформаций, но и промежуточные, а для этого требуются корректные диаграммы деформирования « $\sigma$ – $\varepsilon$ » для всех классов бе-

тона. Имеется множество моделей деформирования бетона [1, 9–16], приведенных в отечественных и зарубежных нормативных документах на проектирование железобетонных конструкций. При этом в формулах зависимостей для описания диаграмм часто входит прочность цилиндрическая или кубиковая. Во многих нормативах предельная деформативность фиксированная, причем в довольно широких пределах. Все эти моменты, конечно, не могут способствовать корректной зависимости « $\sigma$ – $\varepsilon$ » для бетонов всех классов.

Известен целый ряд предложений [1, 3, 7, 15] по аппроксимации опытных данных диаграмм деформирования бетона аналитическими зависимостями, которые нередко приводят к различной достоверности отдельных частей диаграммы. Так, в статье [17] сделана попытка интерполяции диаграммы сжатия бетона на основе параметрических точек. В результате использования довольно громоздких выражений составлены таблица и графики полных диаграмм деформирования бетона при сжатии для бетонов с прочностью 200–1000 МПа, как для восходящей ветви, так и нисходящей. Хотелось бы отметить, что параметрические точки не являются стабильными и зависят от множества факторов. Значения де-



**Диаграммы деформирования бетона при сжатии**

формаций пиковой нагрузки, как показывают опыты авторов данной статьи, значительно занижены, а нисходящие ветви, которые получены для бетонов выше В60, практически не существуют.

В статьях [13–15] предлагается описывать криволинейные диаграммы бетона с помощью коэффициентов упругости, при этом за эталонную диаграмму следует принимать формулу, используемую в нормах (EN 1992-1-1:2004), но указанные формулы довольно громоздки. Кроме того, сравнивать диаграммы, полученные на образцах-цилиндрах и образцах-призмах некорректно, поскольку они отличаются своей устойчивостью и, как следствие, предельной деформативностью. Не приводится экспериментальных данных, которые подтверждали бы их зависимости. Учитывать в уравнениях по оценке предельной относительной деформации бетона класс бетона не очень корректно, поскольку эта величина косвенная и при переходе к призмной прочности согласно [16] имеет переменный коэффициент призмной прочности.

На основе полученных экспериментальных данных А. В. Яшин [18] предложил для построения диаграмм зависимость (2), которая удовлетворительно определяет деформации до уровня  $0,85-0,9R_b$ . Хотя при

приближении к области, близкой к разрушению, значения относительных деформаций занижаются, что связано, вероятно, с отсутствием возможности регистрации деформаций при традиционных испытаниях. Эти отличия проявляются для низких и средних классов бетона, у которых нелинейность деформаций в зоне разрушения весьма высока. При переходе к высокопрочным бетонам нелинейность зоны разрушения снижается и зависимость (2) более точно отвечает экспериментальным данным

$$\varepsilon_{\eta} = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{E} \eta^3 \left( 0,1 + \frac{24}{2 + R_b} \right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – относительный уровень нагружений

В работе [6] было предложено оценивать промежуточные значения деформаций в зависимости от относительного уровня напряжений как на восходящем, так и на нисходящем участке диаграммы

$$\varepsilon_{\eta} = \varepsilon_{b0} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma}{R_b}} \right). \quad (3)$$

Результаты экспериментов, проведенных на бетоне с призмной прочностью 23,3 МПа и модулем упругости  $27,9 \cdot 10^3$  МПа, показали удовлетворительную сходимость данного уравнения с результатами опытов. Однако при использовании этого уравнения для других классов бетона отмечалось существенное отклонение от результатов эксперимента.

Как было отмечено выше, с ростом призмной прочности нелинейность диаграммы уменьшается и ее необходимо регулировать степенью корня в зависимости от прочности бетона. Кроме того, для бетонов со средней и высокой призмной прочностью граница уплотнения и разуплотнения мало отличается, поэтому конечный участок деформирования у них идентичен.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что если степень корня представить как параметр, в который войдут значения призмной прочности и модуль упругости, то степень корня можно записать следующим образом:

$$n = 3,5 - \frac{R_b 10^3}{E_b}. \quad (4)$$

Уравнение для оценки относительных деформаций при соответствующих уровнях напряжений будет иметь вид:

$$\varepsilon_{\eta} = 0,0225^n \sqrt[n]{\frac{R_b}{E_b}} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma}{R_b}} \right). \quad (5)$$

Здесь необходимо отметить, что при определении относительных деформаций на нисходящем участке диаграммы знак перед корнем следует заменить на плюс.

Экспериментальные диаграммы деформирования для бетона с различной призмной прочностью представлены на рисунке сплошными линиями, а пунктирными линиями – диаграммы деформирования, рассчитанные по уравнению (5). Как видно из рисунка, теоретические кривые имеют удовлетворительное совпадение с результатами эксперимента. Хотелось бы отметить, что данная зависимость не согласуется с экспериментами для мелкозернистого бетона в связи с иным процессом деформирования и разрушения.

### Вывод

Необходимо разработать ГОСТ по оценке полных диаграмм деформирования бетона. Статистический набор экспериментальных данных для различных классов бетона позволит более достоверно оценивать напряженно-деформированное состояние конструкций и их элементов. Что же касается оценки предельных относительных деформаций бетона при продолжительном

действии нагрузки и нормирования этих величин, то здесь не все однозначно, как относитель-

но прочности, так и величины от-носительной деформации. Дан-ные вопросы еще предстоит ис-

следовать и экспериментально подтвердить в ближайшем буду-щем.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Панфилов Д. А., Пищулев А. А., Гимадетдинов К. И. Обзор существующих диаграмм деформирования бетона при сжатии в отечественных и зарубежных нормативных документах // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 3. С. 80–84.
2. Безгодков И. М. К вопросу о соответствии методик определения физико-механических характеристик бетона в российских и европейских нормах // Бетон и железобетон. 2013. № 4. С. 5–8.
3. Безгодков И. М. К вопросу оценки предельной относительной деформации бетона при сжатии для различных классов бетона // Бетон и железобетон. 2015. № 5. С. 9–11.
4. Безгодков И. М., Левченко П. Ю. К вопросу о методике получения полных диаграмм деформирования бетона // Технологии бетонов. 2013. № 10. С. 34–36.
5. Безгодков И. М., Дмитренко Е. Н., Митрохина А. О., Баженова А. В. Влияние кратковременной перегрузки на физико-механические характеристики бетона при повторном нагружении // Бетон и железобетон. 2015. № 2. С. 2–4.
6. Безгодков И. М., Пахратдинов А. А., Ткач Е. В. Физико-механические характеристики бетона на щебне из дробленого бетона // Вестник МГСУ. 2016. № 10. С. 24–34.
7. Мкртчян А. М., Аксенов В. Н. Аналитическое описание диаграммы деформирования высокопрочных бетонов // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818> (дата обращения: 20.03.2019).
8. Кроль И. С. Эмпирические представления диаграмм сжатия бетона // Исследования в области механических измерений: сб. научн. тр. М. : ВНИИФТРИ, 1971. Вып. 8(38). С. 306–326.
9. Радайкин О. В. К построению диаграмм деформирования бетона при одноосном кратковременном растяжении/сжатии с применением деформационного критерия повреждаемости // Строительные конструкции. 2017. № 6. С. 71–73.
10. Рахманов В. А., Сафонов А. А. Разработка экспериментальных методов оценки диаграмм деформирования бетона при сжатии // Строительные науки. 2017. № 3. С. 120–121.
11. Никулин А. И. К определению предельной относительной деформации бетона в растянутой зоне изгибаемого железобетонного элемента // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 65–69.
12. Cusson D., Paultre P. Stress-strain model for confined high-strength concrete [Модель напряженно-деформированного состояния сжатого высокопрочного бетона] // Journal of Structural Engineering. 1995. Vol. 121. Pp. 468–477.
13. Римшин В. И., Кришан А. Л., Мухаметзянов А. И. Построение диаграмм деформирования одноосно сжатого бетона // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 23–31.
14. Карпенко Н. И., Ерышев В. А., Латышева Е. В. Методика расчета параметров деформирования бетона при разгрузке с напряжений сжатия // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 168–172.
15. Карпенко Н. И., Соколов Б. С., Радайкин О. В. Анализ и совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона по деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 28–30.
16. Гуца Ю. Л., Ларичева И. Ю. Коэффициенты призмочной прочности обычного тяжелого и мелкозернистого бетонов // Бетон и железобетон. 1984. № 8. С. 37–38.
17. Михайлов В. В., Емельянов М. П., Дудолов Л. С., Митасов В. М. Некоторые предложения по описанию диаграмм деформаций бетона при загрузении // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1984. № 2. С. 23–27.
18. Яшин А. В. Некоторые данные о деформациях и структурных изменениях бетона при осевом сжатии // Новое о прочности железобетона. М. : Стройиздат, 1977. С. 17–30.

#### R E F E R E N C E S

1. Panfilov D. A., Pishchulev A. A., Gimadetdinov K. I. Review of diagrams of concrete deformation under compression in national and foreign concrete codes. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2014, no. 3, pp. 80–84. (In Russian).
2. Bezgodov I. M. On the question of the conformity of the methods for determining the physicommechanical characteristics of concrete in the Russian and European standards. *Beton i zhelezobeton*, 2013, no. 4, pp. 5–8. (In Russian).
3. Bezgodov I. M. To the question of estimating the ultimate relative deformation of concrete under compression for various classes of concrete. *Beton i zhelezobeton*, 2015, no. 5, pp. 9–11. (In Russian).
4. Bezgodov I. M., Levchenko P. Yu. On the issue of the method of obtaining complete diagrams of concrete deformation. *Tekhnologii betonov*, 2013, no. 10, pp. 34–36. (In Russian).
5. Bezgodov I. M., Dmitrenko E. N., Mitrohina A. O., Bazhenova A. V. The effect of short-term overload on

- the physico-mechanical characteristics of concrete under repeated loading. *Beton i zhelezobeton*, 2015, no. 2, pp. 2–4. (In Russian).
6. Bezgodov I. M., Pahratdinov A. A., Tkach E. V. Physico-mechanical characteristics of concrete on crushed stone from crushed concrete. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 10, pp. 24–34. (In Russian).
  7. Mkrtchyan A. M., Aksenov V. N. Analytical description of the deformation diagram of high-strength concrete. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2013, no. 3. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818> (accessed 20.03.2019). (In Russian).
  8. Krol' I. S. Empirical representation of concrete compression diagram. *Issledovaniya v oblasti mekhanicheskikh izmerenij: sb. nauchn. tr.* [Research in the field of mechanical measurements]. Moscow, VNIIFTRI Publ., 1971, vol. 8(38), pp. 306–326. (In Russian).
  9. Radaykin O. V. To the construction of concrete deformation diagrams under uniaxial short-term tension / compression using the deformation criterion of damage. *Stroitel'nye konstrukzii*, 2017, no. 6, pp. 71–73. (In Russian).
  10. Rahmanov V. A., Safonov A. A. Development of experimental methods for evaluating concrete deformation diagrams in compression. *Stroitel'nye nauki*, 2017, no. 3, pp. 120–121. (In Russian).
  11. Nikulin A. I. On the determination of the ultimate relative deformation of concrete in the stretched zone of a bent reinforced concrete element. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 6, pp. 65–69. (In Russian).
  12. Cusson D., Paultre P. Stress-strain model for confined high-strength concrete. *Journal of Structural Engineering*, 1995, vol. 121, pp. 468–477.
  13. Rimshin V. I., Krishan A. L., Muhametzyanov A. I. Construction of deformation diagrams of uniaxially compressed concrete. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 6, pp. 23–31. (In Russian).
  14. Karpenko N. I., Eryshev V. A., Latysheva E. V. Method of calculating the parameters of concrete deformation during unloading from compression stresses. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 3, pp. 168–172. (In Russian).
  15. Karpenko N. I., Sokolov B. S., Radaykin O. V. Analysis and enhancement of curvilinear diagrams of concrete deformations for calculation of reinforced concrete structures on the basis of a deformation model. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, no. 1, pp. 28–30. (In Russian).
  16. Gushcha Yu. L., Laricheva I. Yu. Coefficients of prism strength of ordinary heavy and fine-grained concrete. *Beton i zhelezobeton*, 1984, no. 8, pp. 37–38. (In Russian).
  17. Mihajlov V. V., Emel'yanov M. P., Dudoladov L. S., Mitasov V. M. Some proposals on the description of concrete deformation diagrams when loaded. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura*, 1984, no. 2, pp. 23–27. (In Russian).
  18. Yashin A. V. Some data on deformations and structural changes of concrete under axial compression. *Novoe o prochnosti zhelezobetona* [New about the strength of reinforced concrete]. Moscow, Strojizdat Publ., 1977, pp. 17–30. (In Russian).

Для цитирования: Безгодов И. М., Дмитренко Е. Н. Совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 8. С. 99–104. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.99-104.

For citation: Bezgodov I. M., Dmitrenko E. N. Improvement of Curvilinear Diagrams of Concrete Deformation. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2019, no. 8, pp. 99–104. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.99-104. ■