

УДК 624.012.4–183.2; 624.044:539.384

[https://doi.org/10.37538/0005–9889–2025–3\(628\)–69–79](https://doi.org/10.37538/0005–9889–2025–3(628)–69–79)**О.В. РАДАЙКИН**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», ул. Красносельская, д. 51,
г. Казань, 420066, Российская Федерация

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ул. Кремлевская, д. 18, к. 1,
г. Казань, 420008, Российская Федерация

УТОЧНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ МЕТОДА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЧАСТИ НОРМИРОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ « $\sigma - \varepsilon$ » БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ И РАСТЯЖЕНИИ. ЧАСТЬ 1

Аннотация

Введение. В двух частях статьи исследованы вопросы понятийного и методического характера, возникающие при расчетах железобетонных конструкций по методу предельных состояний с применением нелинейной деформационной модели (НДМ) согласно СП 63.13330.2018. Первая часть посвящена постановке проблемы и разработке понятийного аппарата. *Цель.* Усовершенствовать понятия и термины о законах и диаграммах деформирования бетона при сжатии и растяжении в аспекте их нормирования в расчетах по методу предельных состояний.

Методы: формальная логика (анализ, синтез, индукция, дедукция), методы теории вероятностей и математической статистики, метод предельных состояний. *Результаты.* Показано, что нормативная база расчетов по методу предельных состояний на основе НДМ содержит противоречивые и неоднозначно понимаемые термины, отсутствуют некоторые весьма важные понятия о нормировании механических свойств бетона. В данной части статьи предложено заполнить эти пробелы новыми понятиями, введенными автором, и устранить имеющиеся противоречия и неточности.

Выводы. Предложено исключить из нормативного и научного оборота в расчетах конструкций по НДМ неоднозначные термины: «диаграмма состояния», «рабочая диаграмма» и «диаграммный метод». В СП 63.13330.2018 следует дополнить раздел «Термины и определения» ныне полностью отсутствующими

терминами и определениями, касающимися расчетов по НДМ, что возможно в том числе на основе введенных автором новых 12 понятий о законах и диаграммах деформирования бетона при сжатии и растяжении со строгим математическим содержанием, которые обеспечивают всю полноту, целостность и взаимоувязанность нормирования характеристик физико-механических свойств бетона. Отличия в понятиях связаны с назначением своей фиксированной вероятности $p \in [0,004; 0,5]$ левостороннего перцентиля нормального распределения при постоянном уровне доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ левой границы доверительного интервала оценки этого перцентиля на основе t -распределения.

Ключевые слова: бетон, сжатие, растяжение, закон деформирования, диаграмма деформирования, нелинейная деформационная модель, метод предельных состояний, неоднородность, коэффициент вариации, перцентиль, доверительная вероятность

Для цитирования: Радайкин О.В. Уточнение положений метода предельных состояний в части нормирования зависимостей « $\sigma - \varepsilon$ » бетона при сжатии и растяжении. Часть 1 // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 69–79. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-69-79](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-69-79). EDN: XMUZPX

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.02.2025

Поступила после рецензирования 21.03.2025

Принята к публикации 27.03.2025

O.V. RADAYKIN

Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya str., 51, Kazan, 420066, Russian Federation

Kazan Federal University, Kremlevskaya str., 18, bld. 1, Kazan, 420008, Russian Federation

CLARIFICATION OF THE PROVISIONS OF THE LIMIT STATE METHOD REGARDING THE NORMALIZATION OF THE " $\sigma - \varepsilon$ " DEPENDENCES OF CONCRETE UNDER COMPRESSION AND TENSION. PART 1

Abstract

Introduction. In two parts of the article, the conceptual and methodological issues arising in the calculations of reinforced concrete structures using the limit state method with a nonlinear deformation model (NDM) according to SP 63.13330.2018 are investigated. The first part is devoted to the formulation of the problem and the development of the conceptual framework.

Aim. To improve the concepts and terms about the laws and diagrams of concrete deformation under compression and tension in terms of their normalization in calculations using the limit state method.

Methods: formal logic (analysis, synthesis, induction, deduction), methods of probability theory and mathematical statistics, the method of limit states.

Results. It is shown that the regulatory framework for calculations using the limit state method based on NDM contains contradictory and ambiguously understood terms, and some very important concepts about the normalization of the mechanical properties of concrete are missing. In this part of the article, it is proposed to fill in these gaps with new concepts introduced by the author and eliminate existing contradictions and inaccuracies.

Conclusions. It is proposed to exclude the ambiguous terms "state diagram", "working diagram" and "diagrammatic method" from the normative and scientific circulation in calculations of structures according to NDM.

In SP 63.13330.2018, the section "Terms and definitions" should be supplemented with currently completely missing terms and definitions related to NDM calculations, which is possible, among other things, on the basis of the 12 new concepts introduced by the author on the laws and diagrams of concrete deformation under compression and tension with strict mathematical content, which ensure the completeness, integrity and interconnectedness of the normalization of characteristics, physical and mechanical properties of concrete. The differences in concepts are related to the assignment of its fixed probability $p \in [0.004; 0.5]$ to the left-hand percentile of the normal distribution at a constant confidence level $\alpha = 0.95$ to the left boundary of the confidence interval for estimating this percentile based on the t-distribution.

Keywords: concrete, compression, stretching, law of deformation, deformation diagram, nonlinear deformation model, limit state method, heterogeneity, coefficient of variation, percentile, confidence probability

For citation: Radaykin O.V. Clarification of the provisions of the limit state method regarding the normalization of the " $\sigma - \varepsilon$ " dependences of concrete under compression and tension. Part 1. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 69–79. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-69-79](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-69-79). EDN: XMUZPX

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 14.02.2025

Revised 21.03.2025

Accepted 27.03.2025

В СП 63.13330.2018 [1], а также в других нормативных документах РФ, в которые включена нелинейная деформационная модель (НДМ) для механического расчета нормальных сечений стержневых элементов из армированного бетона, физический закон деформирования бетона имеет несколько вариантов записи в форме математических функций, устанавливающих связь между нормальными напряжениями σ и относительными продольными деформациями стержня ϵ . Так, в указанном своде правил (СП) имеется два варианта кусочно-линейной функции (п. 6.1.20 [1]), один вариант нелинейной функции (см. Приложение Г [1]), кроме того, согласно п. 6.1.19 [1] допускается применение множества иных вариантов нелинейных функций из сторонних источников, но при условии совпадения значений напряжений и деформаций в так называемых параметрических точках, занормированных сводом правил. Графику рассматриваемых функциональных зависимостей « $\sigma - \epsilon$ » разработчики СП дали название «диаграмма деформирования», имеется также второе малоупотребимое в широкой научно-инженерной среде название «диаграмма состояния». После внимательного изучения физических законов деформирования бетона при действии кратковременной нагрузки, представленных в СП, у автора данной публикации возникли следующие замечания и предложения:

1. Нарушая лексические нормы и правила корректного словоупотребления и элементарную логику, авторы СП записали, что «диаграммы деформирования» «определяют связь между напряжениями и относительными деформациями» (например, см. п. 6.1.19 [1] и др.), в то время как, на самом деле, за это отвечает сам материал – бетон (это справедливо и для арматурной стали, как и для всех прочих материалов), свойства которого сопротивляться действию нагрузки ученые и практики *описывают* математическими функциями типа $\sigma = f(\epsilon)$, а диаграммы деформирования являются только лишь *графическим образом* этих функций. Поэтому так и следует писать: «диаграммы деформирования графически отображают связь между напряжениями и относительными деформациями».

В связи с таким уточнением в расчетах железобетонных конструкций использовать непосредственно диаграммы деформирования материалов, к чему «призывает» тот же п. 6.1.19 [1] и другие положения данного нормативного документа, нельзя, поскольку представленный в СП метод расчета железобетонных конструкций по НДМ по своей сути является *вычислительным*, а не *графическим*, он предполагает математические преобразования неких выражений по определенному алгоритму – преобразования с использованием тех же математических функций типа $\sigma = f(\epsilon)$.

Именно поэтому называть метод расчета нормальных сечений железобетонных стержней по НДМ диаграммным (т. е. иначе – графическим) методом, как это предлагается в некоторых научных статьях, мо-

нографиях и учебных изданиях разными авторами, некорректно.

В целом по тексту СП, там, где это уместно для точной передачи смыслов о расчете по НДМ, термин «диаграмма деформирования бетона» целесообразно заменить на «закон деформирования бетона».

Избыточными являются такие термины СП, как: а) «рабочие диаграммы» по пп. 6.1.19–6.1.20, под которыми непонятно, что имеется в виду; в умолчаниях остается, что все прочие диаграммы деформирования являются «нерабочими»? б) «диаграммы состояния» – термин, перекликающийся с материаловедческой темой о фазовых состояниях вещества (так, в материаловедении известна диаграмма состояния сплавов железо-углерод [2]) и в научно-технической литературе о механической прочности материалов при одноосном нагружении до издания СНиП 52-01-2003 [3], который предшествовал СП 63.13330.2018, такой термин никогда не применялся. И то и другое следует исключить из СП. Единственное, что встречается в литературе по механике: «диаграмма механического состояния Я.Б. Фридмана», например в [4], но это все же авторская терминология – есть исключение, чем правило, функциональность этих диаграмм намного шире, чем у диаграмм деформирования материалов по СП – в ней учитывается обобщенная кривая течения, сопротивления отрыву и срезу, а также имеется возможность оценки влияния вида напряженного состояния на тип разрушения материала (хрупкий или пластичный) при воздействии однократных кратковременных статических нагрузок.

Интересный факт, связанный с терминологией: в третьем разделе СП «Термины и определения» нет ни одного термина или определения, касающегося расчетов по НДМ. Этот пробел следовало бы заполнить.

2. В п. 6.1.20 [1] описаны так называемые «рабочие» двух- и трехлинейные диаграммы деформирования сжатого бетона. В СП прямо не оговаривается, но из совместного анализа положений этого пункта с пп. 6.1.13 и 8.1.30 (формулы 8.53 и 8.54) [1] вытекает, что «рабочие» диаграммы строятся для следующих двух видов напряженно-деформированного состояния железобетонного стержня: прямого чистого изгиба и прямого внецентренного сжатия с большим эксцентриситетом. Уместным было бы отметить это в п. 6.1.20 [1], поскольку это не только поможет инженеру правильно выбрать подходящий закон деформирования бетона для соответствующего расчетного случая, но и внесет ясность в вопрос о нормировании законов деформирования бетона в целом, начиная с определения эталонных зависимостей « $\sigma - \epsilon$ », о которых речь пойдет в п. 4.1 данной публикации.

3. В п. 6.1.19 [1] написано, что альтернативой «рабочим» диаграммам являются криволинейные диаграммы деформирования Приложения Г [1], что были предложены еще в середине 1980-х гг. проф. Н.И. Кар-

пенко. Но дело в том, что они строятся для случая осевого центрального нагружения. Автор данной статьи под руководством проф. Н.И. Карпенко в 2011–2012 гг. занимался вопросом их трансформации для случая прямого чистого изгиба и прямого внецентренного сжатия/растяжения с большим эксцентриситетом в рамках научной работы над диссертацией на соискание ученой степени кандидата технических наук. Эти материалы в дальнейшем были использованы при подготовке под эгидой Минрегион развития РФ альтернативной редакции СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции», которая, к сожалению, не прошла конкурсного отбора и не вышла в свет. Получается, что ни о какой прямой альтернативе «рабочих» и криволинейных диаграмм речи быть не может, п. 6.1.19 [1] содержит ошибку. Кроме того, следует указать еще на такую опечатку: название Приложения Г записано как «Диаграммы деформирования **бетона**», а по тексту далее выходит, что при замене нижнего индекса m на s в параметрах получаемые аналитические формулы становятся пригодными для построения диаграмм деформирования **арматурной стали**.

Вариантов выхода из ситуации два:

а) Дополнить формулы Приложения Г [1] расчетными коэффициентами из публикаций [5, 6], позволяющими проводить трансформацию закона деформирования бетона от случая осевого центрального нагружения к случаям прямого чистого изгиба и прямого внецентренного сжатия/растяжения с большим эксцентриситетом.

б) Оставить формулы как есть, но дать пояснение, что они пригодны только для расчета сжатых/растянутых железобетонных стержней с малым эксцентриситетом (в том числе с нулевым), а опечатки исправить.

4. С точки зрения общей логики метода предельных состояний в СП 63.13330.2018 [1] необходимо ввести новые весьма важные понятия:

4.1. Эталонный закон деформирования бетона при осевом центральном сжатии (растяжении) – это непрерывная функция вида $\sigma = f_{b,st}(\epsilon_b)$ ($\sigma = f_{b,st}(\epsilon_{bt})$), связывающая нормальные напряжения σ и относительные продольные деформации ϵ , аппроксимирующая экспериментальную дискретную зависимость « $\sigma - \epsilon$ », построенную по результатам равновесных испытаний стандартных бетонных призм на осевое центральное сжатие (стандартных бетонных «восьмерок» на осевое центральное растяжение) кратковременной нагрузкой с учетом следующих условий и допущений:

а) количество образцов в эксперименте n принимается не менее 30 шт. (это условие минимизирует ошибку репрезентативности выборки до приемлемых значений, см. п. 4.5 ГОСТ 18105-2018 (схема контроля А) [7], и более общее требование в технике – п. 5.8 ГОСТ Р 8.694-2010 [8]);

б) в качестве теоретического закона распределения случайной величины опытных значений напряжений σ (в том числе вершинных, соответствующих пре-

делу прочности бетона на сжатие (растяжение)) при заданном значении деформаций ϵ принимается: **для генеральной совокупности – нормальное распределение, а для выборки – распределение Стьюдента (t-распределение)**. Примечания:

1) при большом количестве образцов ($n \geq 1000$) распределение Стьюдента становится близким к нормальному и может быть заменено им;

2) более адекватно неоднородность физико-механических свойств материалов описывают двухпараметрические распределения с нулевой левой границей типа логнормального, распределения Вейбулла и др. (например, в ГОСТ Р 57845-2017 «Композиты полимерные. Расчет нормативных значений характеристик конструкционных материалов» [9] используется распределение Вейбулла), однако на данном этапе развития науки о бетоне и железобетоне распределения Стьюдента и нормальное являются наиболее изученными и проработанными на нормативном уровне, а для внедрения других распределений требуются дополнительные исследования.

в) Каждому значению аргумента ϵ экспериментальной дискретной зависимости « $\sigma - \epsilon$ » сопоставляется только одно значение случайной величины σ , равное **среднему значению** $\bar{\sigma}$, вычисленному по всем n образцам при заданном ϵ :

$$\sigma_j = \bar{\sigma}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{ij}(\epsilon_j), \quad (1)$$

где i – номер образца, $i = 1 \dots n$; j – номер этапа нагружения экспериментального образца, $j = 1 \dots m-1$; m – количество этапов нагружения при соблюдении условия, что приращение деформаций на j -м этапе нагружения $\Delta \epsilon_j = \epsilon_j - \epsilon_{j-1} - const$, т. е. величина постоянная для всех $i = 1 \dots n-1$ образцов (прим.: все m этапы нагружения будут реализованы только для какого-то одного образца из n , у которого получится наибольшая из всех образцов предельная деформация, а для всех остальных образцов фактическое количество этапов нагружения m_i будет меньше m).

Соблюдение данного условия позволяет при текущем значении продольной деформации ϵ_j фиксировать статистический разброс соответствующих напряжений σ_{ij} по всем n образцам. Обеспечить его выполнение в эксперименте возможно при реализации так называемого «жесткого» режима нагружения, то есть при контроле скорости деформирования образца с помощью датчика деформаций и наличия отрицательной обратной связи в схеме управления испытательной установки [10–12].

г) Область определения эталонного закона деформирования ограничивается слева нулем, а справа – **средним значением предельных деформаций** (они соответствуют концу ниспадающей ветви на диаграмме деформирования бетона):

$$\bar{\varepsilon}_{b,ult} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{b,max,i}, \quad \bar{\varepsilon}_{bt,ult} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{bt,max,i}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{b,max,i}$, $\varepsilon_{bt,max,i}$ – максимальные деформации в i -м эксперименте соответственно при сжатии и растяжении.

Исходя из определения, в общем виде функции $f_{b,st}$, $f_{bt,st}$ могут быть записаны так:

$$f_{b,st}(\varepsilon_b) = F_b[\sigma_j(\varepsilon_j)], \quad \varepsilon_b \in [0; \bar{\varepsilon}_{b,ult}], \quad (3)$$

$$f_{bt,st}(\varepsilon_{bt}) = F_{bt}[\sigma_j(\varepsilon_j)], \quad \varepsilon_{bt} \in [0; \bar{\varepsilon}_{bt,ult}],$$

где $F_b[\sigma_j(\varepsilon_j)]$, $F_{bt}[\sigma_j(\varepsilon_j)]$ – аппроксимирующие функции, например, могут быть приняты в виде гиперболической функции по Н.И. Карпенко [13], степенной функции, учитывающей повреждаемость [14] и др.

График функции $f_{b,st}$ ($f_{bt,st}$) в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **эталонной диаграммой деформирования бетона при осевом центральном сжатии (растяжении)**.

Термин «эталонные диаграммы деформирования» не является новым и присутствует в научной литературе, например, в [15–18], а в [19] они названы «исходными», но во всех этих работах в качестве признаков отнесения к эталону принят лишь один – вид нагружения, а вероятностные характеристики неоднородности свойств бетона не рассматриваются. В данной статье, чтобы восполнить этот пробел, проведены необходимые изыскания.

Непосредственно в инженерных расчетах использовать выражения (3) нельзя. По аналогии с классом бетона по прочности на сжатие (растяжение) B (B_t), они нужны только для нормирования и контроля физико-механических свойств бетона как строительного материала. Так, в нормах класс бетона ни в каких критериях того или иного предельного состояния не участвует. И точно так же, как через класс бетона, в нормах определяются все необходимые в расчетах параметры, например призмная прочность бетона $R_{b,n}$, $R_{b,ser}$, R_b , начальный модуль деформации бетона E_b и т. д., так же и через эталонный закон деформирования должны определяться производные из него законы деформирования, пригодные для инженерного расчета по двум группам предельных состояний. Достигается это путем трансформации (математического преобразования) «эталонных» формул (3) по специальным алгоритмам.

В связи с этим добиваться максимального соответствия эталонного закона деформирования действительной работе бетона в каких-то реальных условиях эксплуатации железобетонных конструкций нет никакой необходимости. Это обеспечивается на последующих этапах трансформации (преобразования) эталонного закона расчетным способом.

Для получения зависимостей (3) важно лишь определиться с эталонными параметрами образцов (и их количеством), испытательной установки и режи-

ма нагружения. К сожалению, на сегодняшний день этап стандартизации законов деформирования бетона на основе испытаний в нормах Российской Федерации до сих пор не пройден – отсутствует соответствующий ГОСТ. И это несмотря на то, что НДМ с 2003 года является основной для инженерного расчета нормальных сечений железобетонных стержневых элементов. Из этого вытекает логичный вывод, что **законы и диаграммы деформирования бетона, представленные в СП 63.13330.2018 [1], не обладают всей полнотой легитимности**, так как до сих пор не существует стандартных (законных) методик контроля их параметров.

Важно отметить, что аналогия между эталонным законом деформирования и классом бетона по прочности является все же приближенной, так как между ними есть существенные методические отличия:

а) класс бетона определяется по минимальной границе одностороннего доверительного интервала с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ для оценки 5-го перцентиля (при фиксированной вероятности $p = 0,05$, или 5 %) в заданной выборке, а эталонный закон определяется также **по минимальной границе одностороннего доверительного интервала с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$, но для оценки 50-го перцентиля (для фиксированной вероятности $p = 0,50$, или 50 %), который соответствует среднему значению случайной величины** (прим.: сами перцентили служат точечной оценкой рассматриваемых характеристик, для которых затем в объеме заданной выборки устанавливается нижняя граница доверительного интервала, то есть дается оценка уже самих перцентилей);

б) класс бетона по прочности на сжатие определяется по результатам испытаний стандартных кубов с размером ребра 150 мм, а эталонный закон – по результатам испытаний бетонных призм 150 × 150 × 600 мм: измерить продольные деформации, например методом тензометрии, проще и точнее на призмах, чем на кубах.

Что касается точечных оценок, то близкая аналогия будет иметь место между нормативным (базовым) законом деформирования (см. ниже п. 4.2.2) и классом бетона по прочности, который в п. 6.1.3 [1] носит второе название – «нормативная прочность».

4.2. Трансформированный закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) – это непрерывная функция типа $\sigma = f_{bt,tr}(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{b,tr}(\varepsilon_{bt})$), полученная путем математического преобразования (трансформации) эталонного закона деформирования (3), для соблюдения расчетных положений метода предельных состояний, а также для учета влияния различных систематических факторов, таких как: вид бетона, характер напряженно-деформированного состояния (градиент деформаций), форма и размеры конструктивного элемента (масштабный фактор), скорость нагружения, условия работы и т. п.

График функции $f_{b,ir}(f_{bt,ir})$ в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **трансформированной диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении)**.

Трансформацию диаграмм деформирования так же, как и в случае с эталонными диаграммами, в литературе до этого момента понимали в узком смысле: связывали эту процедуру лишь с переходом от НДС одного вида нагружения к другому [15–19].

Трансформированные закон и диаграмма деформирования являются обобщающими, в большей степени абстрактными, но тем не менее необходимыми понятиями для целостного представления о нормировании прочностных и деформационных свойств бетона. Производными к ним будут являться более конкретные понятия, непосредственно применяемые в инженерном расчете, а именно:

4.2.1. Осредненный закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) – это непрерывная функция типа $\sigma = f_{b,m}(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{bt,m}(\varepsilon_{bt})$), полученная путем математического преобразования (трансформации) эталонного закона деформирования (3) при сохранении в нем в качестве точечной оценки **50-го перцентиля** (с фиксированной вероятностью $p = 0,5$ (50 %)) и уровня доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для определения нижней границы одностороннего доверительного интервала оценки данного перцентиля, но с корректировкой по необходимости значений σ и ε с целью учета вида бетона, характера напряженно-деформированного состояния (градиента деформаций), формы и размеров конструктивного элемента (масштабного фактора), скорости нагружения, условий работы и т. п.

График функции $f_{b,m}(f_{bt,m})$ в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **осредненной диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении)**.

Функции типа $f_{b,m}(\varepsilon_b)$, $f_{bt,m}(\varepsilon_{bt})$ должны применяться в расчетах (в том числе при компьютерном моделировании), результаты которых затем предполагается сравнивать с данными эксперимента, а именно: с выборочными оценками средних значений опытных величин прочности, жесткости и трещиностойкости. Такая необходимость возникает, например, в случае **валидации** методов и методик теоретического расчета. Следует отдать должное авторам Еврокода 2 [20], в котором занормирована зависимость $\sigma - \varepsilon$ через средние значения прочностных и деформационных характеристик сжатого бетона (см. п. 3.1.5 [20]) ее можно считать осредненным законом деформирования. В отечественных нормах, к сожалению, такого нет.

4.2.2. Нормативный (базовый) закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) – это такой трансформированный закон деформирования типа $\sigma = f_{b,n}(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{bt,n}(\varepsilon_{bt})$), который получают путем математического преобразования (трансформации)

эталонного закона деформирования (3), путем принятия в качестве точечной оценки случайных величин σ и ε **5-го перцентиля** (с фиксированной вероятностью $p = 0,05$ (5 %)) и сохранении уровня доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для определения нижней границы одностороннего доверительного интервала оценки данного перцентиля, а также при необходимости дополнительно корректируя значения σ и ε для учета вида бетона, характера напряженно-деформированного состояния (градиента деформаций), формы и размеров конструктивного элемента (масштабного фактора), скорости нагружения, условий работы и т. п.

График функции $f_{b,n}(f_{bt,n})$ в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **нормативной (базовой) диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении)**.

По аналогии с прочностью согласно п. 2.2.5 ГОСТ 27751-2014 [21] нормативный закон деформирования бетона необходим для нормирования физико-механических свойств бетона и их контроля при изготовлении, возведении и эксплуатации строительного объекта.

Этот закон путем дальнейшей трансформации порождает семейство расчетных законов деформирования для использования их в расчетах по первой и второй группам предельных состояний:

4.2.2.1. Расчетный закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) для расчетов по первой группе предельных состояний – это такой трансформированный закон деформирования типа $\sigma = f_b(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{bt}(\varepsilon_{bt})$), который получают путем математического преобразования (трансформации) нормативного закона деформирования $f_{b,n}(f_{bt,n})$, путем принятия в качестве точечной оценки случайных величин σ и ε **0,4-го перцентиля** (с фиксированной вероятностью $p = 0,004$, или 0,4 %) и при сохранении уровня доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для определения минимальной границы одностороннего доверительного интервала оценки данного перцентиля.

График функции $f_b(f_{bt})$ в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **расчетной диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении) для расчетов по первой группе предельных состояний**.

4.2.2.2. Расчетный закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) для расчетов по второй группе предельных состояний – это такой трансформированный закон деформирования типа $\sigma = f_{b,ser}(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{bt,ser}(\varepsilon_{bt})$), который получают путем математического преобразования (трансформации) нормативного закона деформирования $f_{b,n}(f_{bt,n})$, путем принятия в качестве точечной оценки случайных величин σ и ε **p -перцентиля с фиксированной вероятностью p из интервала (0,004;0,05)** (принимают $p = 0,05$, если нет иных указаний) и при сохранении уровня доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для определения нижней границы одностороннего доверительного интервала оценки данного перцентиля.

График функции $f_{b,ser}$ ($f_{bt,ser}$) в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **расчетной диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении) для расчетов по второй группе предельных состояний**.

В конце 4-го пункта сделаем одно важное замечание по перцентиллям. То, что в качестве точечной оценки нормативных значений физико-механических характеристик бетона в нормах применяется именно 5-й перцентиль (он означает, что в 5 % случаев – для 5 % образцов бетона, 5 % конструкций одного типа и т. п. – в генеральной совокупности значение данной характеристики окажется меньше заданного (нормируемого) значения и соответственно в 95 % случаев значения будут выше нормируемого) можно «догадаться» на примере кубиковой прочности по формуле под таблицей Приложения 1 ГОСТ 26633-85 [22], которая, по сути, представляет класс бетона по прочности В (одновременно он является нормативной прочностью бетона на сжатие) как 5-й перцентиль генеральной совокупности по кубиковой прочности с нормальным законом распределения. Из последующих редакций ГОСТ эту формулу (ГОСТ 26633-91 [23]), а затем и саму таблицу (ГОСТ 26633-2012 [24] и далее в ГОСТ 26633-2015 [25]) незаслуженно исключили. Этот же перцентиль применяется для нормирования расчетных значений физико-механических свойств бетона в расчетах по второй группе предельных состояний.

Что касается первой группы, то вместо одностороннего p -перцентиля в литературе обычно фигурирует обеспеченность $\gamma = 1 - p$ (также односторонняя). Ее оценки крайне неоднозначны, например В.Д. Райзер предлагает приравнять ее к 99,5 % [26], в статьях [27, 28] γ принимают равной 99,86 %, в [29] – 99,865 %, в [30] – 99,9 % и т. д. Все эти предложения объединяет одна проблема – отсутствие строгого математического обоснования во взаимосвязи коэффициентов надежности для расчетных характеристик бетона с точки зрения механического расчета конструкций и методик выборочного контроля характеристик бетона с точки зрения обеспечения требуемого качества. Большинство авторов существенно упрощает задачу, оперируя характеристиками только генеральной совокупности, без учета выборочных оценок, применяя при этом широко известное в статистике правило «трех сигм», которое приводит к обеспеченности, равной $\gamma = 99,865$ %. В данной статье эта проблема решается от обратного – отталкиваясь от известного значения коэффициента надежности по бетону $\gamma_b = 1,3$, в результате чего перцентиль получается равным $p = 0,4$ % (см. числовой пример под формулой (3) во второй части статьи), а соответствующая обеспеченность $\gamma = 99,6$ %.

В предыдущих определениях выделены два направления трансформации законов деформирования бетона: по учету неоднородности свойств бетона, что

в рамках метода предельных состояний реализуется через так называемые коэффициенты надежности по материалу (например, коэффициенты γ_b и γ_{bt} в п. 6.1.11 [1]), их получают на основе положений теории вероятностей и математической статистики; по учету прочих систематических факторов, которые по каким-то причинам невозможно учесть иным способом в самой расчетной схеме, в уравнениях равновесия или в уравнениях совместности деформаций.

Во второй части статьи подробно остановимся на первом направлении, в то время как второе было затронуто выше – в п. 3 данной статьи.

Выводы

1. Предложено исключить из нормативных документов и научного оборота в вопросах расчета железобетонных конструкций по НДМ такие неоднозначно понимаемые термины и определения, как: «диаграмма состояния», «рабочая диаграмма» и «диаграммный метод».

2. Там, где это уместно по смыслу, вместо термина «диаграмма деформирования» использовать «закон деформирования».

3. В нормах (в частности, в [1]) следует дополнить раздел «Термины и определения» ныне полностью отсутствующими терминами и определениями, касающимися расчетов по НДМ, что возможно выполнить на основе результатов данной статьи.

4. Исходя из общей логики метода расчета по предельным состояниям введены следующие новые 12 понятий со строгим математическим (вероятностно-статистическим) содержанием, которые обеспечивают всю полноту, целостность и взаимоувязанность нормирования характеристик физико-механических свойств бетона: эталонный (-ая), осредненный (-ая), трансформированный (-ая), нормативный (базовый) (-ая), расчетные для расчетов соответственно по первой и второй группам предельных состояний, закон (диаграмма) деформирования бетона при сжатии (растяжении).

Отличия в понятиях связаны с назначением своей фиксированной вероятности $p \in [0,004; 0,5]$ левостороннего перцентиля нормального распределения при постоянном уровне доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ левой границы доверительного интервала оценки этого перцентиля на основе t -распределения.

Список литературы

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями № 1, 2). Москва: ФГБУ «РСТ», 2022.
2. Сидоров Е.В. Полная равновесная диаграмма состояния системы железо-углерод на основании теоретических и экспериментальных исследований // *Литейное производство*. 2023. № 2. С. 12–17. EDN: RNYWJH.

3. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: ФГУП «ЦПП», 2004.
4. Лавров А.В., Ерасов В.С., Ладник Д.Н. Об одном подходе к трактовке объединенной теории прочности Я.Б. Фрийдмана // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 87–94. DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-2-87-94>. EDN: YLXMXV.
5. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры // *Строительство и реконструкция*. 2012. № 2 (40). С. 11–19. EDN: OZMBYX.
6. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // *Известия КГАСУ*. 2013. № 4 (26). С. 113–120. EDN: RSTDVV.
7. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019.
8. ГОСТ Р 8.694-2010 (Руководство ИСО 35:2006). Стандартные образцы материалов (веществ). Общие статистические принципы определения метрологических характеристик. Москва: Стандартинформ, 2012.
9. ГОСТ Р 57845-2017. Композиты полимерные. Расчет нормативных значений характеристик конструкционных материалов. Москва: Стандартинформ, 2017.
10. Ерасов В.С., Автаев В.В., Орешко Е.И., Яковлев Н.О. Преимущества «жесткого» нагружения при испытаниях на статическое и повторно-статическое растяжение // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). С. 92–104. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104>. EDN: YAKSUX.
11. Безгодов, И.М. Левченко П.Ю. К вопросу о методике получения полных диаграмм деформирования бетона // *Технологии бетонов*. 2013. № 10 (87). С. 34–36. EDN: SYTIYL.
12. Рахманов В.А., Сафонов А.А. Разработка экспериментальных методов оценки диаграмм деформирования бетона при сжатии // *Academia. Архитектура и строительство*. 2017. № 3. С. 120–125. EDN: ZIOFFR.
13. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. Москва: Стройиздат, 1996. 416 с.
14. Радайкин О.В. К построению диаграмм деформирования бетона при одноосном кратковременном растяжении/сжатии с применением деформационного критерия повреждаемости // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 6. С. 71–78. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-71-78>. EDN: YPNFNL.
15. Адищев В.В., Митасов В.М., Сергуничева Е.М. [и др.] Трансформация эталонных диаграмм деформирования бетона при изгибе // *Ресурсо- и энергосбережение в реконструкции и новом строительстве: сб. докл. Международного конгр.* Новосибирск, 2005.
16. Березина Э.В., Сергуничева Е.М., Ершова Н.В. Экспериментальное определение коэффициента трансформации эталонной диаграммы деформирования бетона растянутой зоны при изгибе // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2007. № 4 (17). С. 93–97. EDN: JUDAIJ.
17. Адищев В.В., Березина Э.В., Ершова Н.В. Экспериментальная апробация метода трансформации эталонных диаграмм деформирования бетона при изгибе // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2011. № 8–9 (632–633). С. 118–124. EDN: OZNFUR.
18. Никулин А.И. Энергетический подход к трансформированию эталонных диаграмм сжатия бетона // *Бетон и железобетон*. 2013. № 5. С. 12–14. EDN: TFCGAR.
19. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // *Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций*. Москва: НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. С. 7–25.
20. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
21. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2015.
22. ГОСТ 26633-85. Бетон тяжелый. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1988.
23. ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2005.
24. ГОСТ 26633-2012. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014.
25. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
26. Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. Москва: Стройиздат, 1995. 347 с.
27. Попов В.М., Савин С.Н., Плюснин М.Г., Белов В.В., Хегай М.О. Обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов // *Вестник гражданских инженеров*. 2023. № 5 (100). С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-5-31-36>. EDN: ZMLERD.

28. Горбунов И.А., Капустин Д.Е. Расчетное сопротивление бетона и сталефибробетона в вероятностной трактовке // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 1. С. 58–64. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c5062099aebc6.33938587. EDN: YWGVNB.
29. Талантова К.В. Определение коэффициентов надежности по сталефибробетону // *Строитель Донбасса*. 2018. № 2 (3). С. 17–21. EDN: AJYGIF.
30. Краснощеков Ю.В., Карпова А.А. Вероятностная модель коэффициента надежности по бетону при сжатии // *Техника и технологии строительства*. 2021. № 4 (28). С. 4–8. EDN: RUCTJJ.
11. Bezgodov I.M., Levchenko P.Yu. To the question about the method of obtaining concrete deformation complete diagrams. *Concrete Technologies*. 2013, no. 10 (87), pp. 34–36. (In Russian). EDN: SYTIYL.
12. Rakhmanov V.A., Safonov A.A. Development of experimental methods for evaluating concrete deformation diagrams under compression. *Academia. Architecture and Construction*. 2017, no. 3, pp. 120–125. (In Russian). EDN: ZIOFFR.
13. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat Publ., 1996, 416 p. (In Russian).
14. Radaikin O.V. About construction of concrete deformation diagrams at uniaxial short-time tension/compression with the use of the damage deformation criterion. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*. 2017, no. 6, pp. 71–78. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-71-78>. EDN: YPNFNL.
15. Adishchev V.V., Mitasov V.M., Sergunicheva E.M. [et al.] Transformation of reference diagrams of concrete deformation during bending. *Resource and energy conservation in reconstruction and new construction: collection of reports. International Congr. Novosibirsk*, 2005. (In Russian).
16. Berezina E.V., Sergunicheva E.M., Yershova N.V. Experimental determination of the transformation coefficient of the reference diagram of concrete deformation of the stretched zone during bending. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Journal of Construction and Architecture*. 2007, no. 4 (17), pp. 93–97. (In Russian). EDN: JUDAIJ.
17. Adishchev V.V., Berezina E.V., Yershova N.V. Experimental approbation of the method of transformation of reference diagrams of concrete deformation during bending. *News of higher educational institutions. Construction*. 2011, no. 8–9 (632–633), pp. 118–124. (In Russian). EDN: OZNFUR.
18. Nikulin A.I. Energy approach to transformation of reference diagrams of concrete compression. *Beton i zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2013, no. 5, pp. 12–14. (In Russian). EDN: TFCGAR.
19. Karpenko N.I., Mukhamediev T.A., Petrov A.N. Initial and transformed diagrams of concrete and reinforcement deformation. *Stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures*. Moscow: NIIZHB of Gosstroy of the USSR, 1986, pp. 7–25. (In Russian).
20. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
21. State Standard 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).

References

1. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003 (with Changes No. 1, 2). Moscow: FSBI RST Publ., 2022. (In Russian).
2. Sidorov E.V. Complete equilibrium diagram of the iron-carbon system based on theoretical and experimental studies. *Liteinoye proizvodstvo*. 2023, no. 2, pp. 12–17. EDN: RNYWJH. (In Russian).
3. SNiP 52-01-2003. Concrete and reinforced concrete structures. Principal rules. Moscow: FSUE CPP Publ., 2004. (In Russian).
4. Lavrov A.V., Erasov V.S., Landik D.N. One of the approaches to interpretation of the united strength theory of Ya.B. Fridman. *Aviation Materials and Technologies*. 2017, no. 2 (47), pp. 87–94. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-2-87-94>. EDN: YLXMXV.
5. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. A determination of strain reinforce concrete flexural elements using stress-strain diagram of concrete and reinforcement. *Building and reconstruction*. 2012, no. 2 (40), pp. 11–19. (In Russian). EDN: OZMBYX.
6. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. Calculation of strength, stiffness and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using non-linear deformation model. *News KSUAE*. 2013, no. 4 (26), pp. 113–120. (In Russian). EDN: RSTDVV.
7. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
8. State Standard R 8.694-2010 (The ISO Manual 35:2006). Standard reference materials (substances). General statistical principles of determination of metrological characteristics. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian).
9. State Standard R 57845-2017. Polymer composites. Calculation of normative values for structural materials. Moscow: Standartinform Publ., 2017. (In Russian).
10. Erasov V.S., Avtaev V.V., Oreshko E.I., Yakovlev N.O. Strain-controlled testing advantages at static tension and repeated-static tension. *Proceedings of VIAM*. 2018, no. 9 (69), pp. 92–104. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104>. EDN: YAKSUX.

22. State Standard 26633-85. Heavy-weight concrete. Specifications. Moscow: Publishing house of standard, 1988. (In Russian).
23. State Standard 26633-91. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2005. (In Russian).
24. State Standard 26633-2012. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
25. State Standard 26633-2015. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
26. Raiser V.D. Calculation and regulation of reliability of building structures. Moscow: Stroyizdat Publ., 1995, 347 p. (In Russian).
27. Popov V.M., Savin S.N., Plyusnin M.G., Belov V.V., Khagai M.O. Ensuring the load-bearing capacity of bending reinforced concrete elements. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*. 2023, no. 5 (100), pp. 31–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-5-31-36>. EDN: ZMLERD.
28. Gorbunov I.A., Kapustin D.E. The calculated resistance of concrete and steel-fiber concrete in a probabilistic interpretation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019, no. 1, pp. 58–64. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c5062099aebc6.33938587. EDN: YWGVNB.
29. Talantova K.V. Determination of reliability coefficients for steel-fiber concrete. *The builder of Donbass*. 2018, no. 2 (3), pp. 17–21. (In Russian). EDN: AJYGIF.
30. Krasnoshchekov Yu.V., Karpova A.A. Probabilistic model of the reliability coefficient for concrete under compression. *Construction equipment and technologies*. 2021, no. 4 (28), pp. 4–8. (In Russian). EDN: RUCTJJ.

**Информация об авторе /
Information about the author**

Олег Валерьевич Радайкин, д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»; директор центра развития промышленного дизайна института дизайна и пространственных искусств, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань
e-mail: olegxxii@mail.ru

Oleg V. Radaykin, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the "Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures" Department, Kazan State Power Engineering University; Director of the Industrial Design Development Center of the Institute of Design and Spatial Arts, Kazan Federal University, Kazan
e-mail: olegxxii@mail.ru