

NDM R1

Диаграммы деформирования тяжелого бетона

Приложение: NDM
Версия: R1
Описание: Диаграммный метод расчета плоских железобетонных сечений
Дата: 2021-05-28

Разработка: <https://constructionlab.ru>
E-mail: support@constructionlab.ru

Содержание

1	Общие положения.....	4
2	Криволинейные диаграммы деформирования тяжелого бетона	5
2.1	Кратковременное загрузеение	5
2.2	Длительное загрузеение	9
3	Трехлинейные диаграммы деформирования тяжелого бетона	11
3.1	Кратковременное загрузеение	11
3.2	Длительное загрузеение	12
4	Приложение. Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона при сжатии	13
5	Литература.....	21

1 Общие положения

Диаграммы деформирования тяжелого бетона в приложении NDM представлены двух видов:

- трехлинейные в соответствии с СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» (с изменением № 1) [1];
- криволинейные в соответствии с методическим пособием «Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии», разработанным ФАУ «ФЦС» [2], в том числе криволинейные диаграммы-изохроны с учетом длительной ползучести.

Основные механические и деформационные характеристики бетона принимаются по [1]. В данном руководстве приводятся только нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона. Для перехода к расчетным диаграммам необходимо нормативные сопротивления бетона заменить на расчетные.

2 Криволинейные диаграммы деформирования тяжелого бетона

2.1 Кратковременное нагружение

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при **сжатии** и кратковременном нагружении принимается в следующем виде (см. рисунок 1):

$$\varepsilon_{bc} = \frac{\sigma_{bc}}{E_b \nu_{bc}}, \quad (2.1)$$

где ε_{bc} – относительная деформация сжатия бетона (отрицательная величина);

σ_{bc} – напряжение сжатия в бетоне (отрицательная величина), МПа;

E_b – начальный модуль упругости бетона, МПа;

ν_{bc} – коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\nu_{bc} = \nu_{bc,top} + (\nu_{bc,start} - \nu_{bc,top}) \sqrt{1 - \omega_{bc} \eta_{bc} - (1 - \omega_{bc}) \eta_{bc}^2}, \quad (2.2)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\nu_{bc} = \nu_{bc,top} - (\nu_{bc,start} - \nu_{bc,top}) \sqrt{1 - \omega_{bc} \eta_{bc} - (1 - \omega_{bc}) \eta_{bc}^2}, \quad (2.3)$$

где $\nu_{bc,top}$ – коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии в вершине диаграммы (положительная величина);

$\nu_{bc,start}$ – начальный коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии;

ω_{bc} – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при сжатии;

η_{bc} – уровень напряжений в бетоне при сжатии (положительная величина).

Коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии в вершине диаграммы (положительная величина):

$$\nu_{bc,top} = \left| \frac{R_{bc,n}}{E_b \varepsilon_{bc,top}} \right|, \quad (2.4)$$

где $R_{bc,n}$ – нормативная призмная прочность бетона с обеспеченностью 0,95 при сжатии, МПа;

$\varepsilon_{bc,top}$ – относительная деформация бетона при сжатии в вершине диаграммы (отрицательная величина):

$$\varepsilon_{bc,top} = -\frac{B}{E_b} \cdot \frac{1 + \left(0,80 - 0,15 \frac{B^2}{10000}\right) \frac{B}{60} + \frac{0,20}{B}}{0,12 + 1,03 \frac{B}{60}}, \quad (2.5)$$

где B – класс бетона по прочности на сжатие с обеспеченностью 0,95 (кубиковая прочность), МПа.

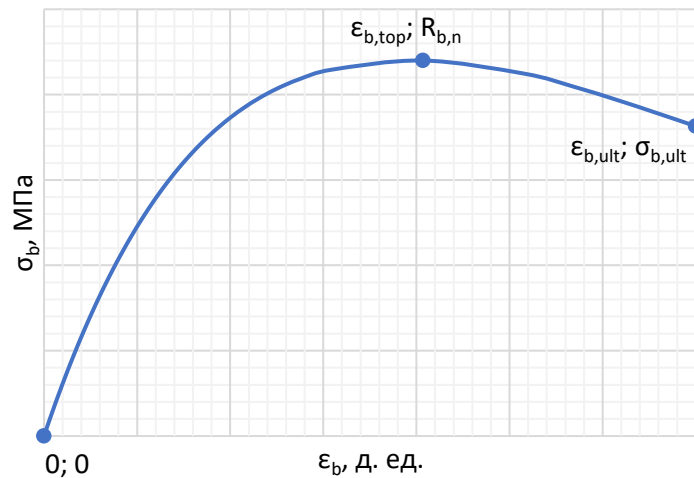


Рисунок 1 – Криволинейная диаграмма деформирования тяжелого бетона

Начальный коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии:

для восходящей ветви диаграммы:

$$v_{bc,start} = 1,0, \quad (2.6)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$v_{bc,start} = 2,05v_{bc,top}. \quad (2.7)$$

Коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при сжатии:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bc} = 2,00 - 2,50v_{bc,top}, \quad (2.8)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bc} = 1,95v_{bc,top} - 0,138. \quad (2.9)$$

Если высота сжатой зоны изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов составляет от $0,2h_0$ до $0,5h_0$, где h_0 – рабочая высота сечения, то коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при сжатии, вычисляется по формулам:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bc} = 2,00 - 1,40v_{bc,top}, \quad (2.10)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bc} = 2,00v_{bc,top} - 0,13. \quad (2.11)$$

Уровень напряжений в бетоне при сжатии (положительная величина):

$$\eta_{bc} = \left| \frac{\sigma_{bc}}{R_{bc,n}} \right|. \quad (2.12)$$

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при *растяжении* и кратковременном нагружении принимается в следующем виде (см. рисунок 1):

$$\varepsilon_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{E_b v_{bt}}, \quad (2.13)$$

где ε_{bt} – относительная деформация растяжения бетона (положительная величина);

σ_{bt} – напряжение растяжения в бетоне (положительная величина), МПа;

E_b – начальный модуль упругости бетона, МПа;

v_{bt} – коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении:

для восходящей ветви диаграммы:

$$v_{bt} = v_{bt,top} + (v_{bt,start} - v_{bt,top}) \sqrt{1 - \omega_{bt} \eta_{bt} - (1 - \omega_{bt}) \eta_{bt}^2}, \quad (2.14)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$v_{bt} = v_{bt,top} - (v_{bt,start} - v_{bt,top}) \sqrt{1 - \omega_{bt} \eta_{bt} - (1 - \omega_{bt}) \eta_{bt}^2}, \quad (2.15)$$

где $v_{bt,top}$ – коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении в вершине диаграммы;

$v_{bt,start}$ – начальный коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении;

ω_{bt} – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при растяжении;

η_{bt} – уровень напряжений в бетоне при растяжении.

Коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении в вершине диаграммы:

$$v_{bt,top} = \frac{0,55 + 0,06 R_{bt,n}}{\gamma_{btq}}, \quad (2.16)$$

где $R_{bt,n}$ – нормативная прочность бетона с обеспеченностью 0,95 на осевое растяжение, МПа;

γ_{btq} – коэффициент, учитывающий влияние градиентов деформаций.

Если высота сжатой зоны составляет от $0,2h_0$ до $0,5h_0$, где h_0 – рабочая высота сечения:

$$\gamma_{btq} = 2,007 - \sqrt[5]{\frac{h}{300}} \geq 0,907, \quad (2.17)$$

где h – высота сечения, мм.

В остальных случаях $\gamma_{btq} = 1,0$.

Начальный коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении:

для восходящей ветви диаграммы:

$$v_{bt,start} = 1,0, \quad (2.18)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$v_{bt,start} = 2,05v_{bt,top}. \quad (2.19)$$

Коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при растяжении:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bt} = 2,00 - 2,50v_{bt,top}, \quad (2.20)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bt} = 1,95v_{bt,top} - 0,138. \quad (2.21)$$

Если высота сжатой зоны изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов составляет от $0,2h_0$ до $0,5h_0$, где h_0 – рабочая высота сечения, то коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при растяжении, вычисляется по формулам:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bt} = 2,00 - 1,40v_{bt,top}, \quad (2.22)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bt} = 2,00v_{bt,top} - 0,13. \quad (2.23)$$

Уровень напряжений в бетоне при растяжении:

$$\eta_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{R_{bt,n}\gamma_{btq}}. \quad (2.24)$$

Относительная деформация бетона при растяжении в вершине диаграммы:

$$\varepsilon_{bt,top} = \frac{R_{bt,n}\gamma_{btq}}{E_b v_{bt,top}}. \quad (2.25)$$

2.2 Длительное нагружение

Для учета влияния на процесс деформирования элементов длительного действия нагрузок используются два типа диаграмм-изохрон:

- диаграммы-изохроны, соответствующие ступенчатому режиму нагружения (жесткий режим), когда нагрузка мгновенно прикладывается в возрасте бетона t_0 , сут., с последующей выдержкой;
- диаграммы-изохроны, соответствующие режиму нагружения бетона в возрасте t_0 , сут., возрастающими напряжениями или деформациями (мягкий режим), причем скорость роста напряжений или деформаций в течение времени нагружения остается в среднем близкой к постоянной (например, при учете этапности возведения здания).

Возраст бетона в момент приложения нагрузки t_0 принимается не менее 7 суток.

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при длительном нагружении принимается по формулам (2.1) – (2.25) со следующими изменениями (индексы для сжатого или растянутого бетона условно не приводятся):

вместо $v_{b,top}$ используется значение $v_{b,top,cr}$:

$$v_{b,top,cr} = \frac{v_{b,top}}{1 + v_{b,top} f_c \varphi}; \quad (2.26)$$

на восходящей ветви диаграммы вместо $v_{b,start}$ используется значение $v_{b,start,cr}$:

$$v_{b,start,cr} = \frac{1}{1 + \varphi}. \quad (2.27)$$

Предельная характеристика ползучести бетона:

$$\varphi = \varphi_N \xi_1 \xi_2 (0,5 + d e^{-2\gamma t_0}). \quad (2.28)$$

При мягком режиме нагружения в формулах (2.26) и (2.27) вместо φ принимается $\varphi/2$.

Функция, учитывающая нелинейность деформаций ползучести:

$$f_c = 1 + k v_c, \quad (2.29)$$

где $k = 0,7$ – при жестком режиме нагружения;

$k = 0,3$ – при мягком режиме нагружения.

Параметры φ_N , ξ_1 , ξ_2 , d , γ и v_c в формулах (2.28) и (2.29) принимаются по таблицам 2.1-2.5. Промежуточные значения определяются по линейной интерполяции.

При жестком режиме нагружения ниспадающие ветви диаграммы не учитываются.

Таблица 2.1 – Параметры φ_N и ν_c

Параметр	Класс бетона по прочности на сжатие					
	B15	B20	B30	B40	B50	B60 и выше
φ_N	3,29	3,10	2,73	2,41	1,95	1,56
ν_c	1,87	1,41	0,97	0,74	0,74	0,74

Таблица 2.2 – Параметр ξ_1

Параметр	Относительная влажность воздуха окружающей среды, %						
	40 и менее	50	60	70	80	90	100
ξ_1	1,27	1,13	1,00	0,87	0,73	0,60	0,47

Таблица 2.3 – Параметр ξ_2

Параметр	Модуль открытой поверхности элемента, 1/м						
	0	5	10	20	30	40	60 и более
ξ_2	0,51	0,65	0,76	0,93	1,00	1,22	1,27

Таблица 2.4 – Параметр d

Параметр	t_0 , сут.	Модуль открытой поверхности элемента, 1/м			
		10 и менее	20	30	40 и более
d	7	0,752	0,842	0,942	1,052
	28 и более	0,625	0,700	0,785	0,875

Таблица 2.5 – Параметр γ

Параметр	Модуль открытой поверхности элемента, 1/м			
	10 и менее	20	30	40 и более
γ	0,004	0,006	0,008	0,010

3 Трехлинейные диаграммы деформирования тяжелого бетона

3.1 Кратковременное нагружение

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при сжатии и растяжении и кратковременном нагружении описывается следующими формулами (см. рисунок 2):

При $0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}$

$$\sigma_b = E_b \varepsilon_b, \quad (3.1)$$

При $\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b0}$

$$\sigma_b = \left(0,4 \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} + 0,6 \right) R_b, \quad (3.2)$$

При $\varepsilon_{b0} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$

$$\sigma_b = R_b, \quad (3.3)$$

где $\varepsilon_{b1} = \sigma_{b1}/E_b = (0,6R_b)/E_b$ – относительные деформации условного предела пропорциональности.

Базовые относительные деформации принимаются равными:

$$\varepsilon_{bc0} = 0,0020; \quad \varepsilon_{bt0} = 0,00010;$$

$$\varepsilon_{bc2} = 0,0035; \quad \varepsilon_{bt2} = 0,00015.$$

Для высокопрочных бетонов классов по прочности на сжатие от В70 до В100 ε_{bc2} принимается по линейному закону от 0,0033 при В70 до 0,0028 при В100.

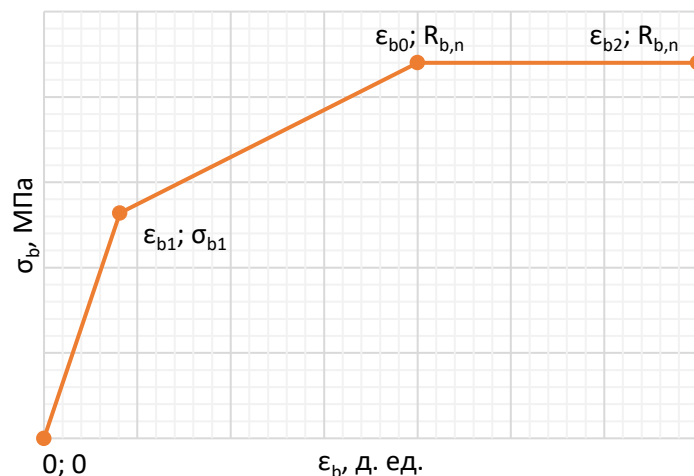


Рисунок 2 – Трехлинейная диаграмма деформирования тяжелого бетона

3.2 Длительное нагружение

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при сжатии и растяжении и длительном нагружении также описывается формулами (3.1) – (3.3), в которых E_b умножается на $1/(1 + \varphi_{b,cr})$, а базовые относительные деформации принимаются по таблице 3.1.

Характеристика ползучести $\varphi_{b,cr}$ принимается по таблице 3.2.

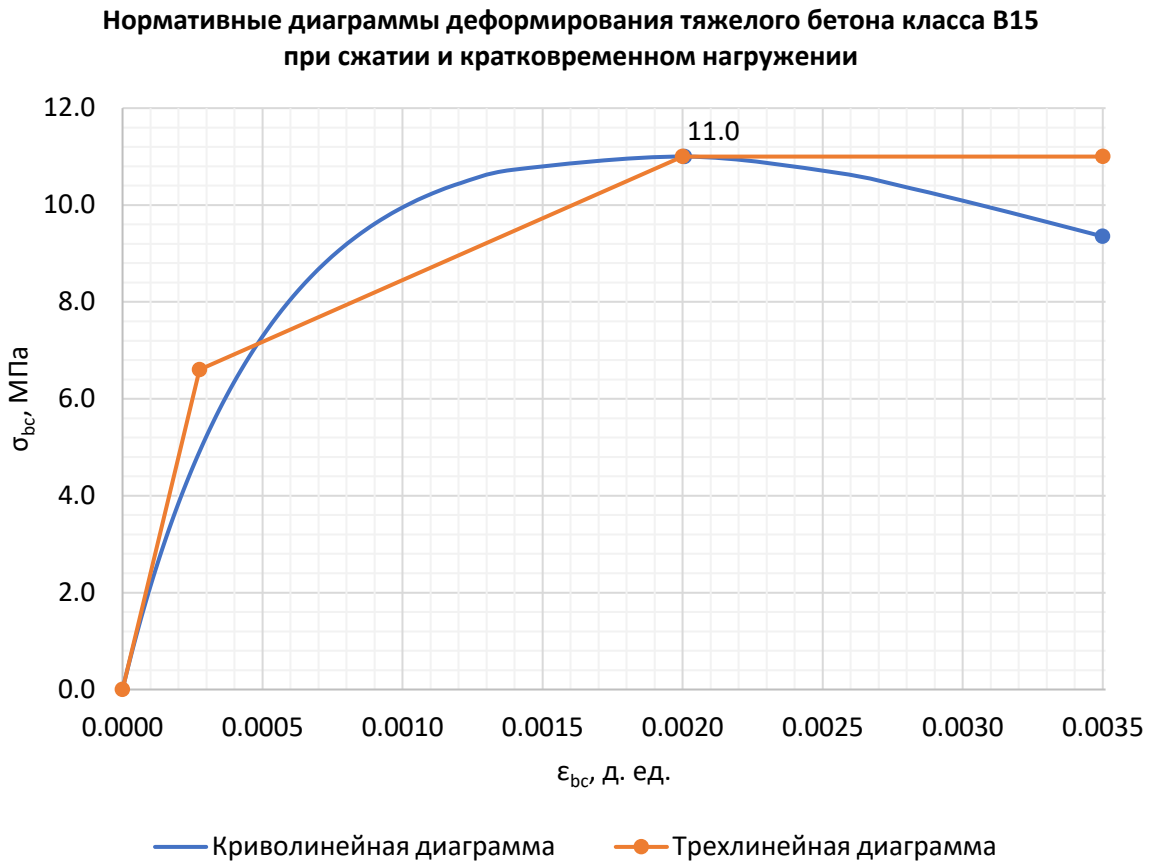
Таблица 3.1 – Относительные деформации при длительном нагружении

Параметр	Относительная влажность воздуха окружающей среды, %		
	выше 75	40-75	ниже 40
ε_{bc0}	0,00300	0,00340	0,00400
ε_{bc2}	0,00420	0,00480	0,00560
ε_{bt0}	0,00021	0,00024	0,00028
ε_{bt2}	0,00027	0,00031	0,00036

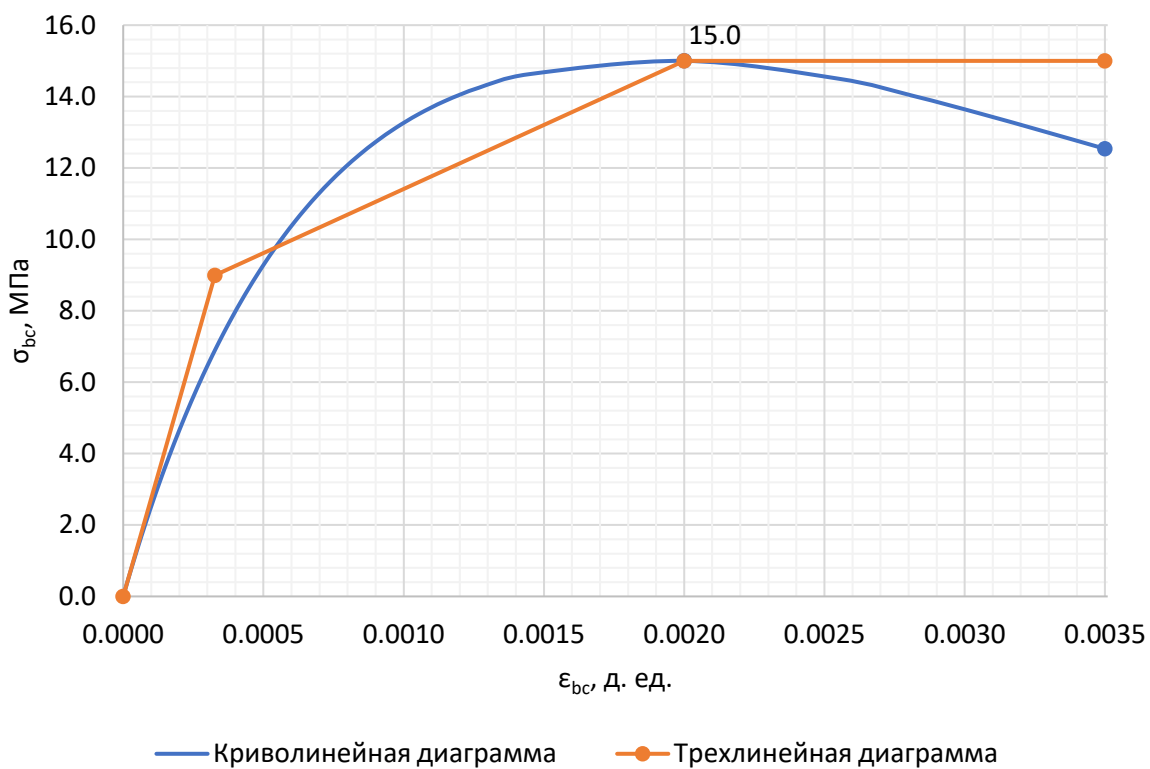
Таблица 3.2 – Характеристика ползучести $\varphi_{b,cr}$

Относительная влажность воздуха окружающей среды, %	Класс бетона по прочности на сжатие									
	B15	B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55	B60-B100
выше 75	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
40-75	3,4	2,8	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4
ниже 40	4,8	4,0	3,6	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0

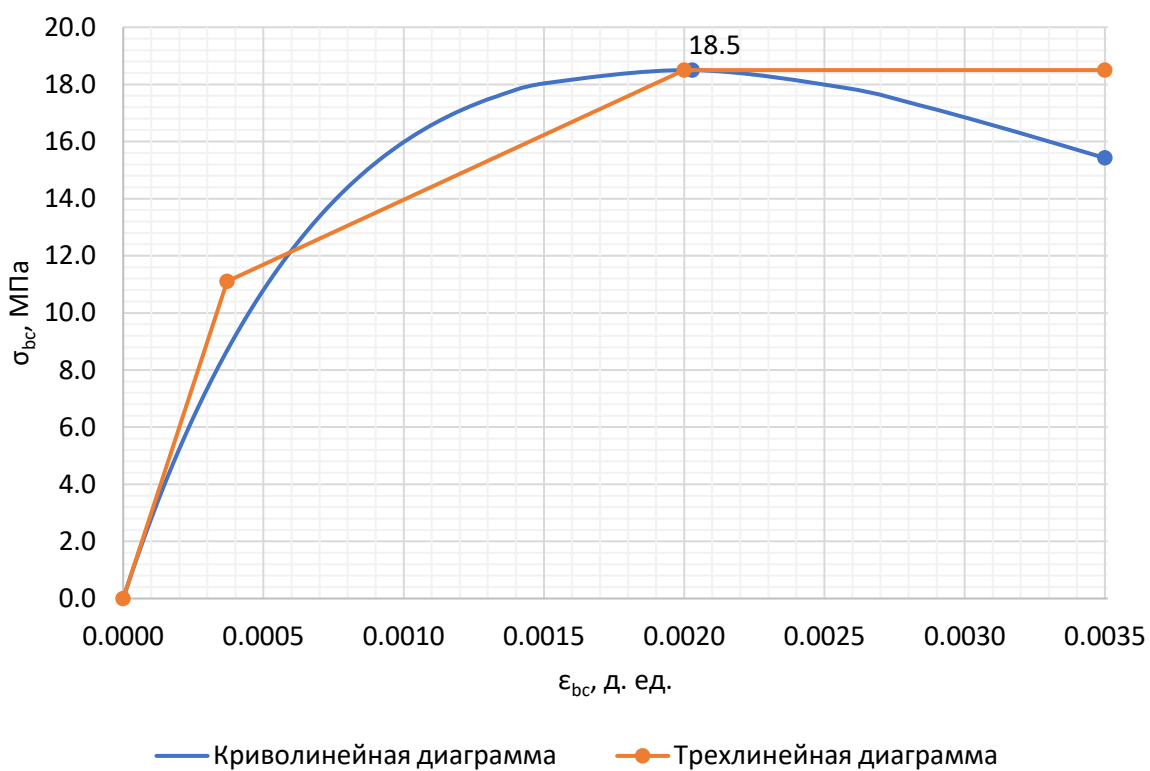
4 Приложение. Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона при сжатии



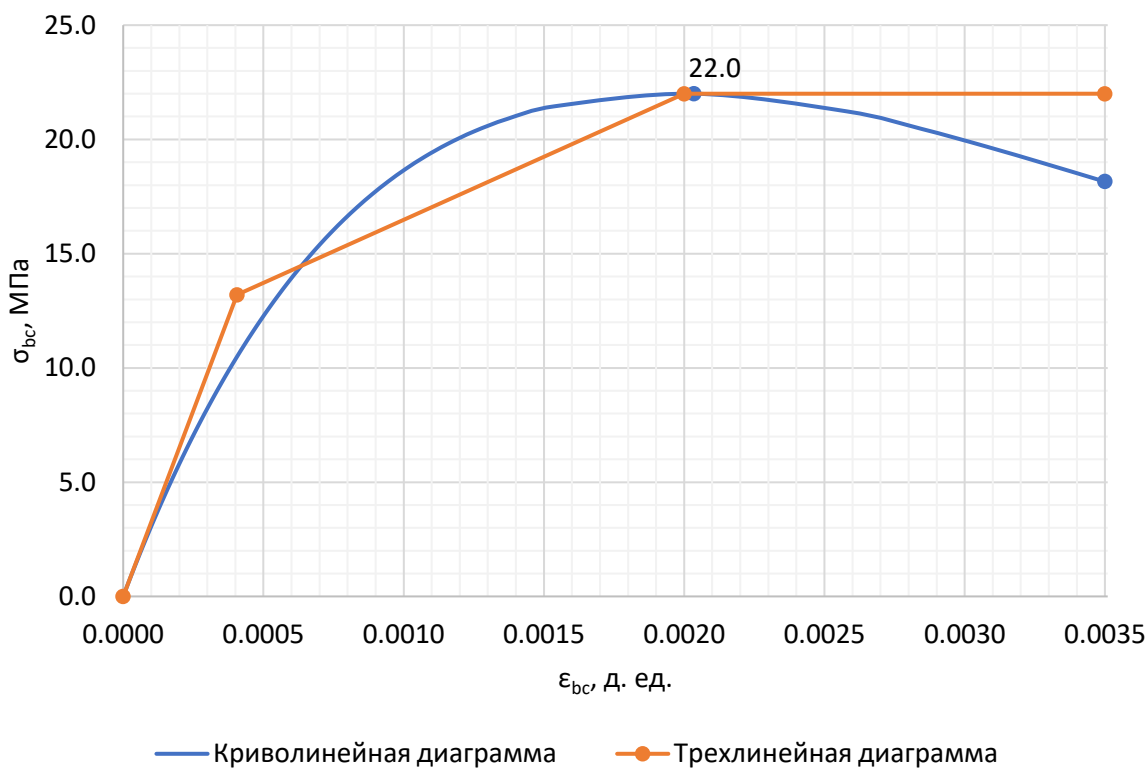
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В20 при сжатии и кратковременном нагружении



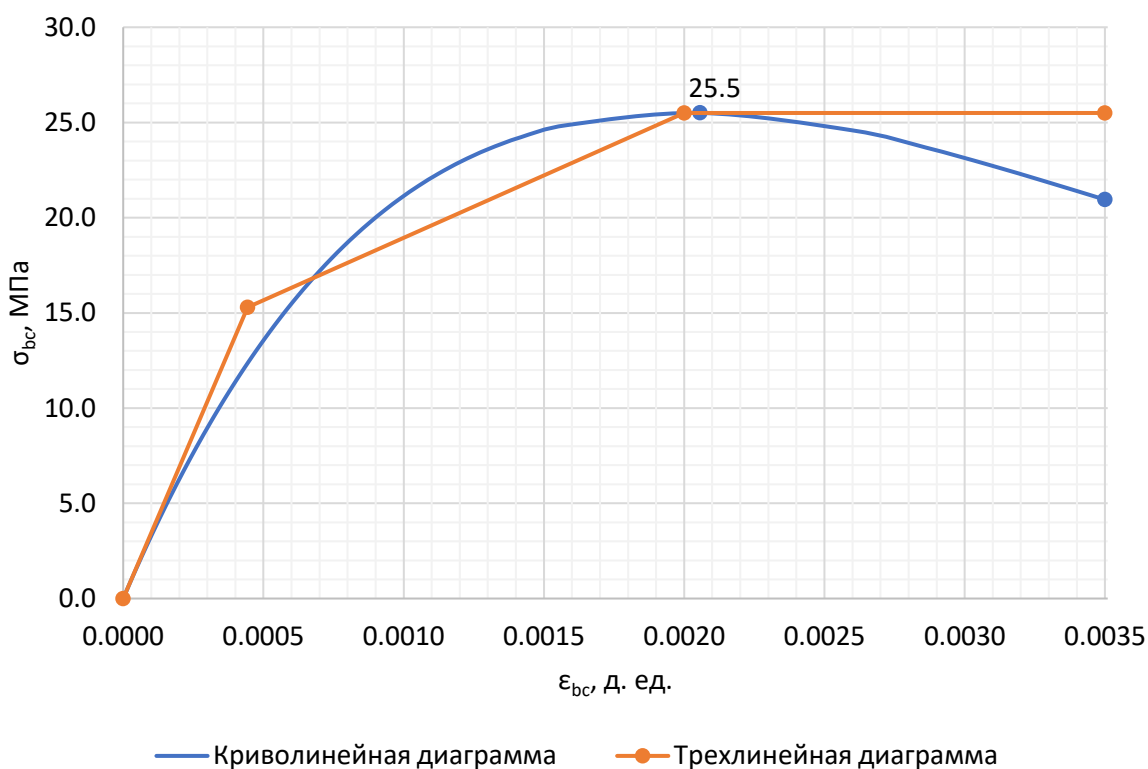
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В25 при сжатии и кратковременном нагружении



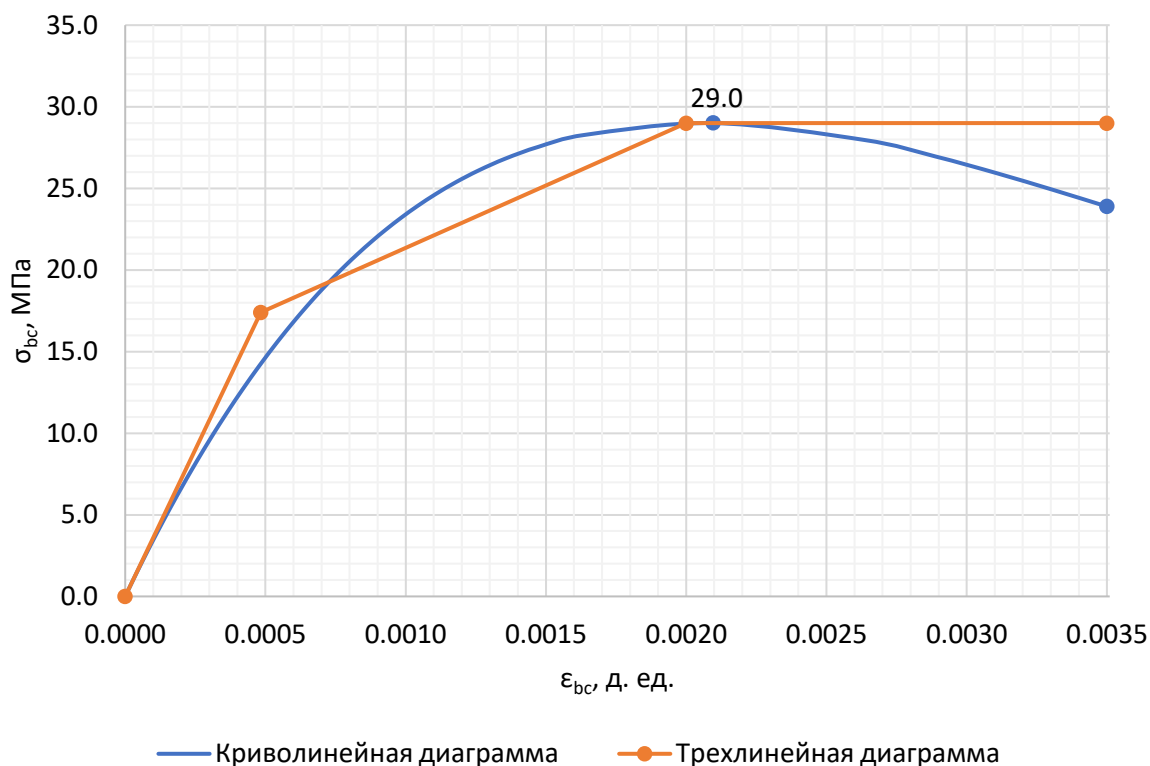
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В30 при сжатии и кратковременном нагружении



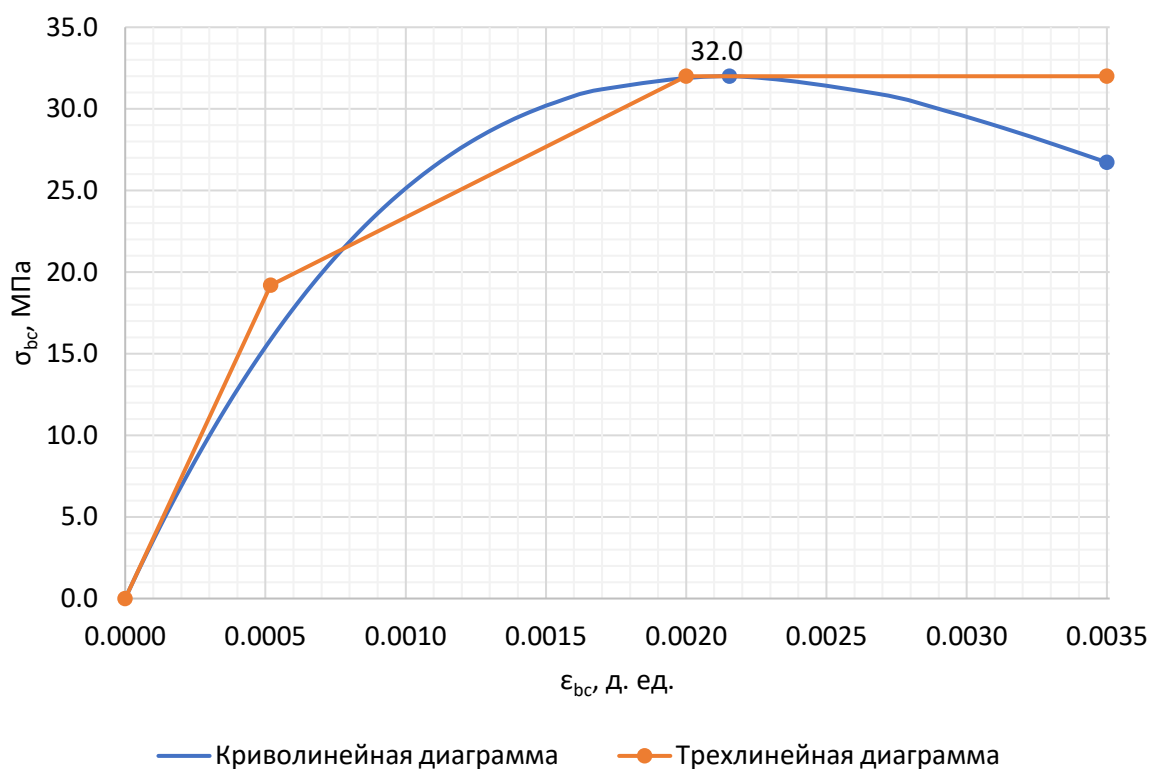
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В35 при сжатии и кратковременном нагружении



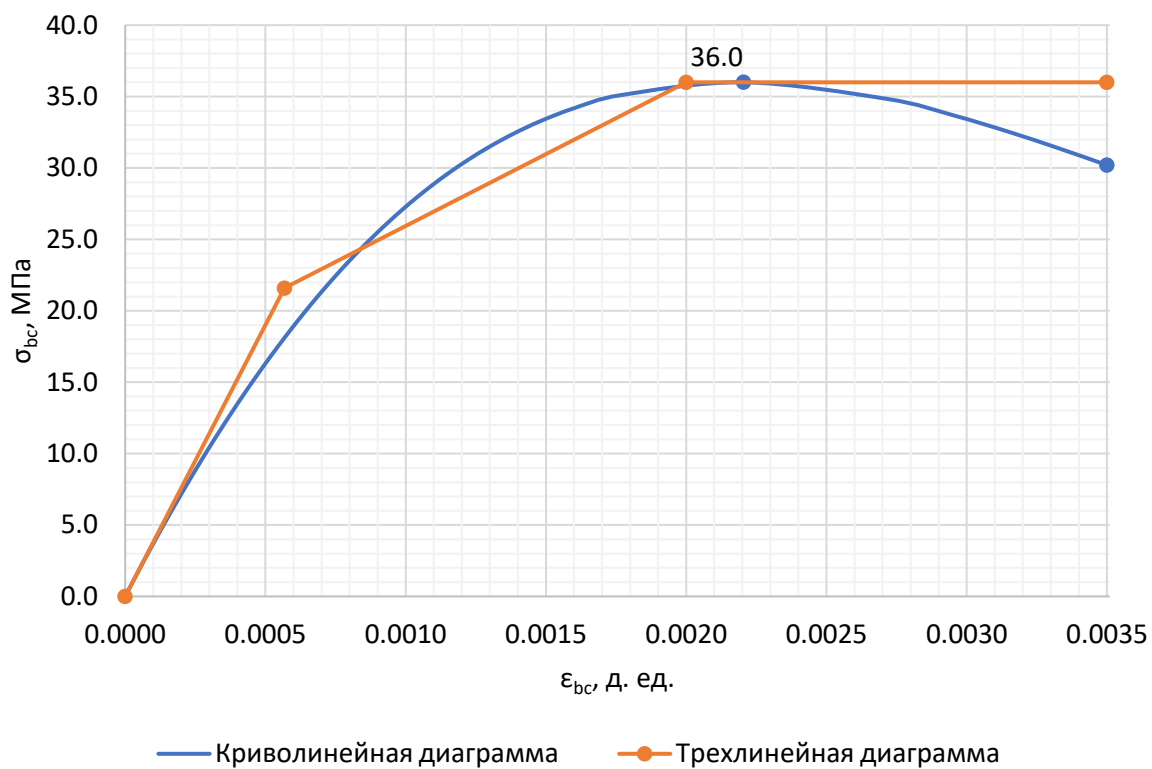
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В40
при сжатии и кратковременном нагружении



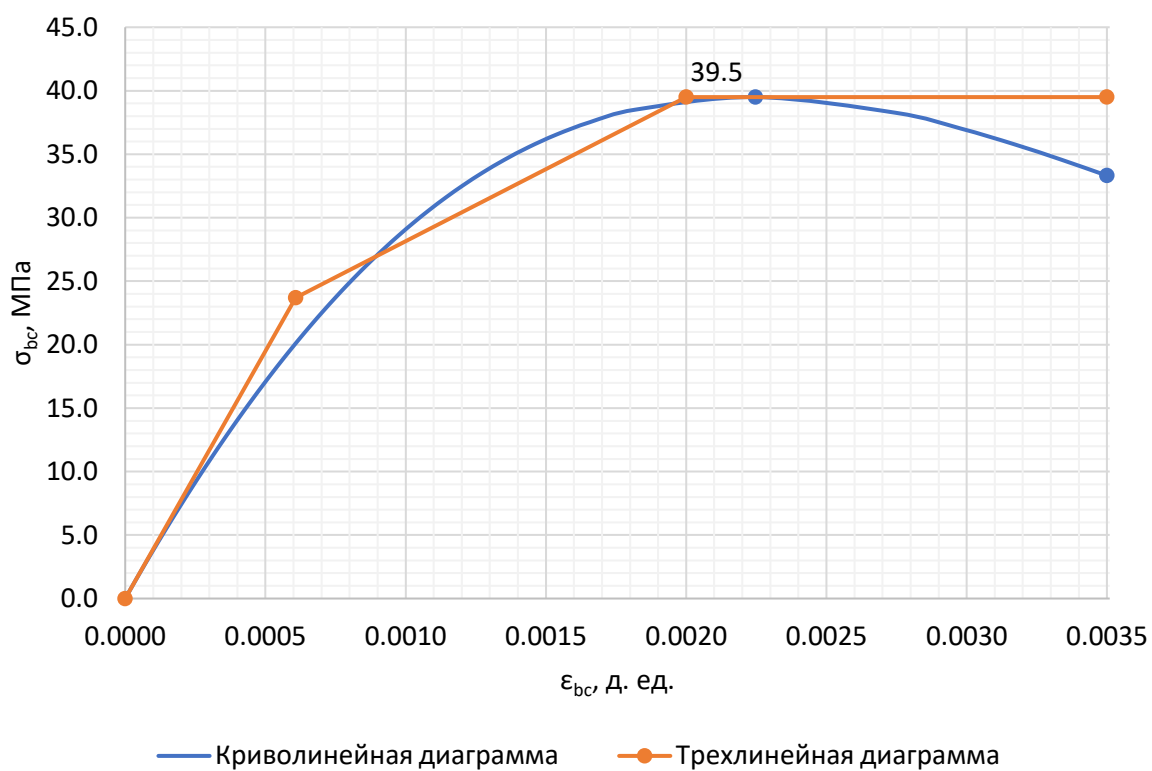
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В45
при сжатии и кратковременном нагружении



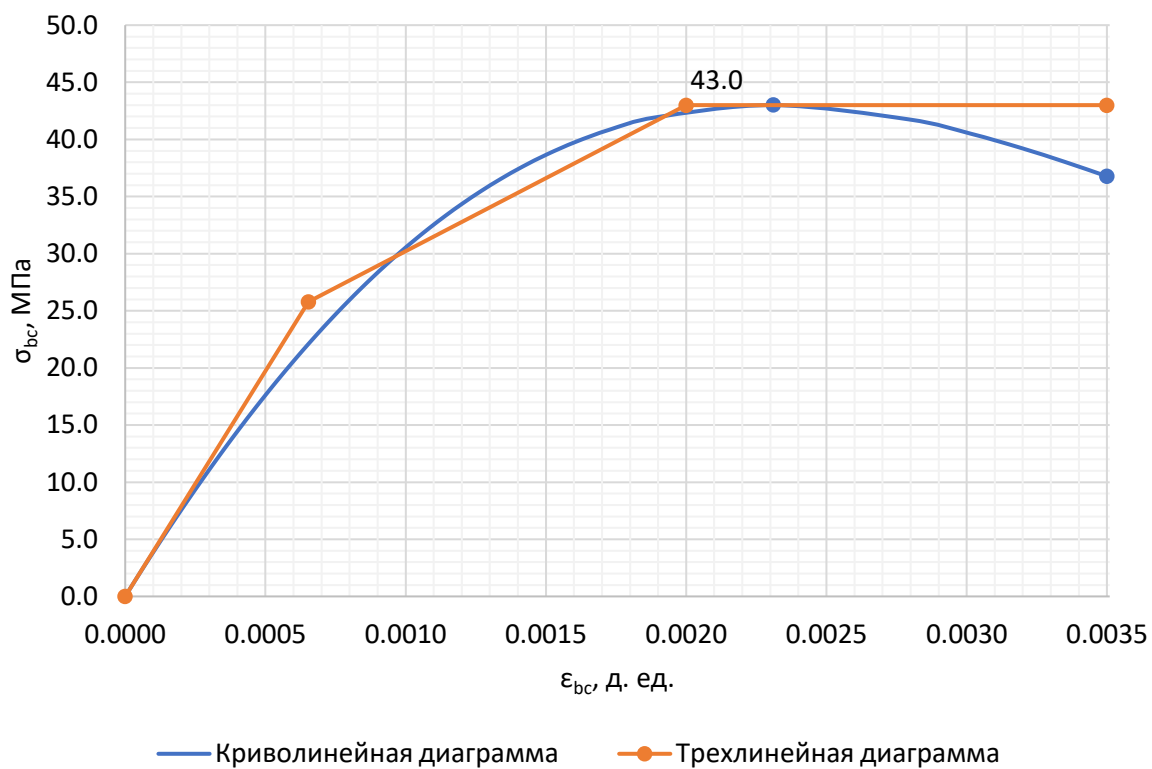
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В50 при сжатии и кратковременном нагружении



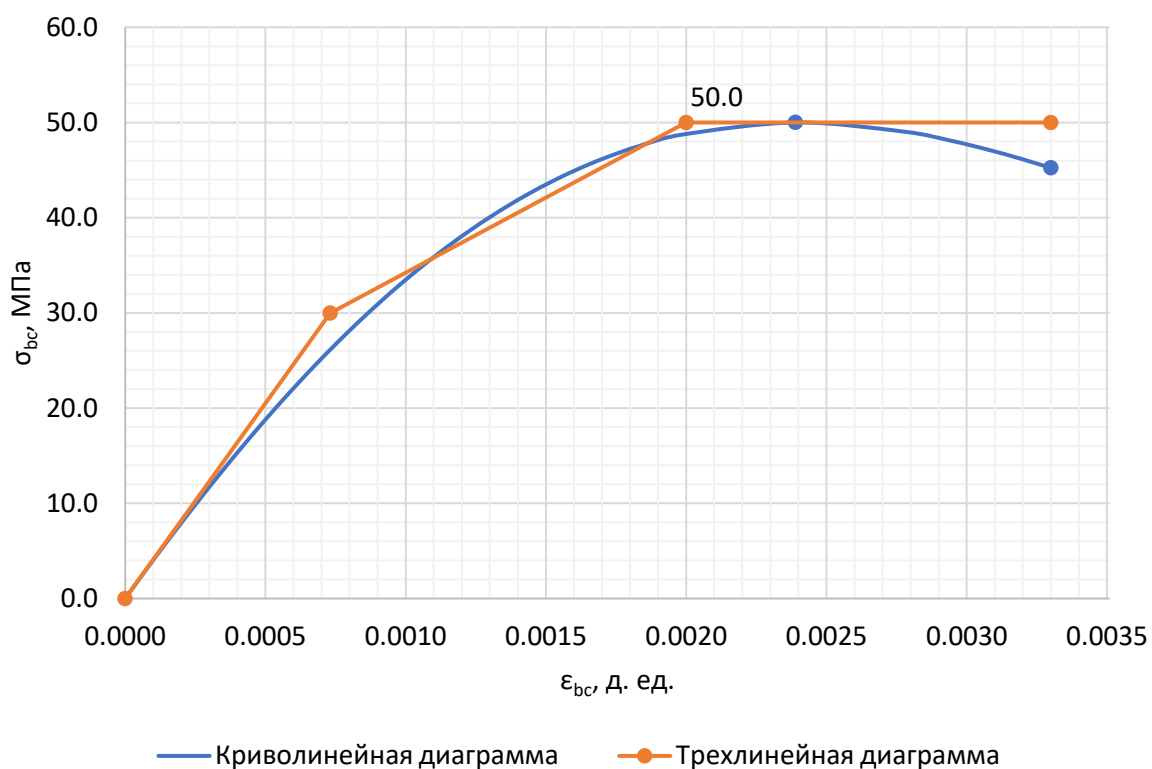
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В55 при сжатии и кратковременном нагружении



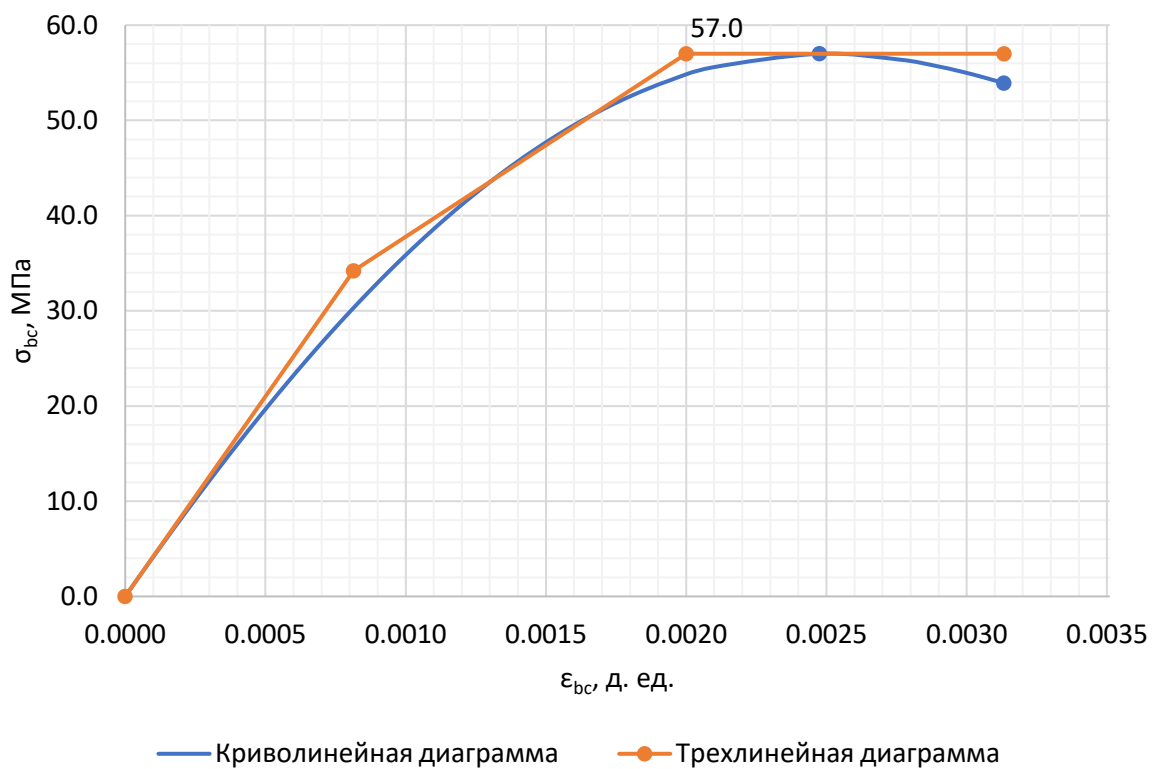
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В60 при сжатии и кратковременном нагружении



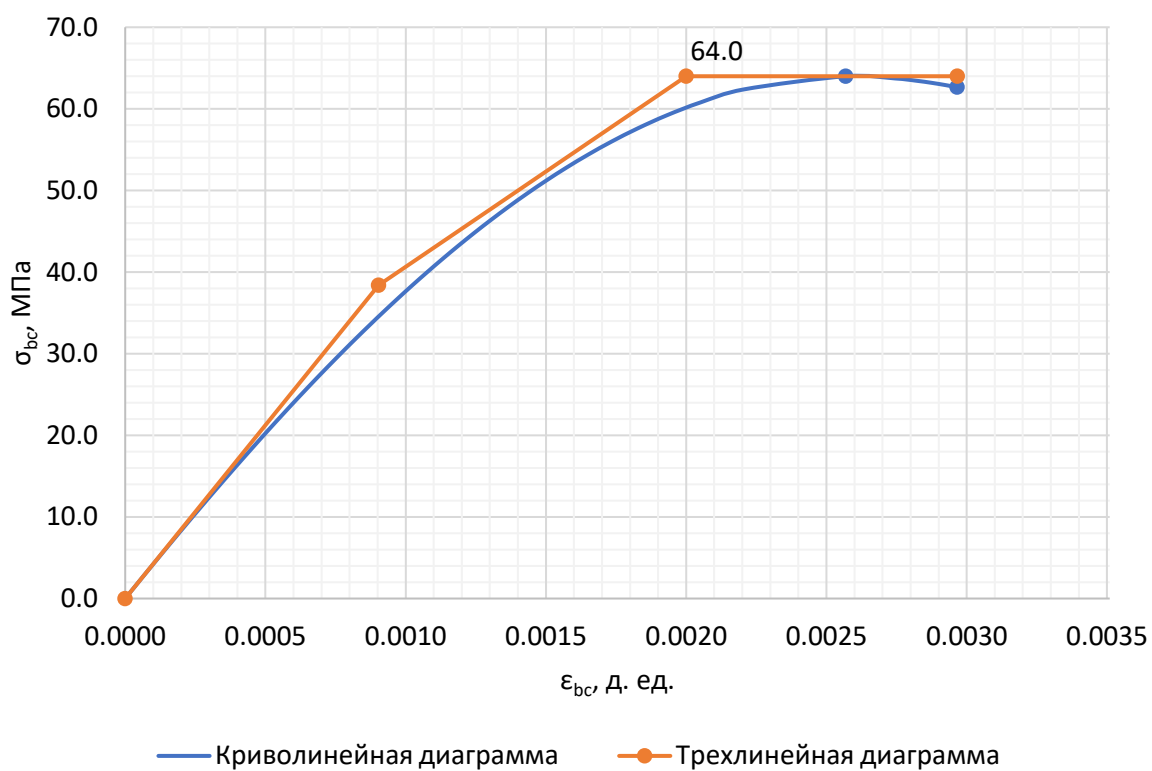
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В70 при сжатии и кратковременном нагружении



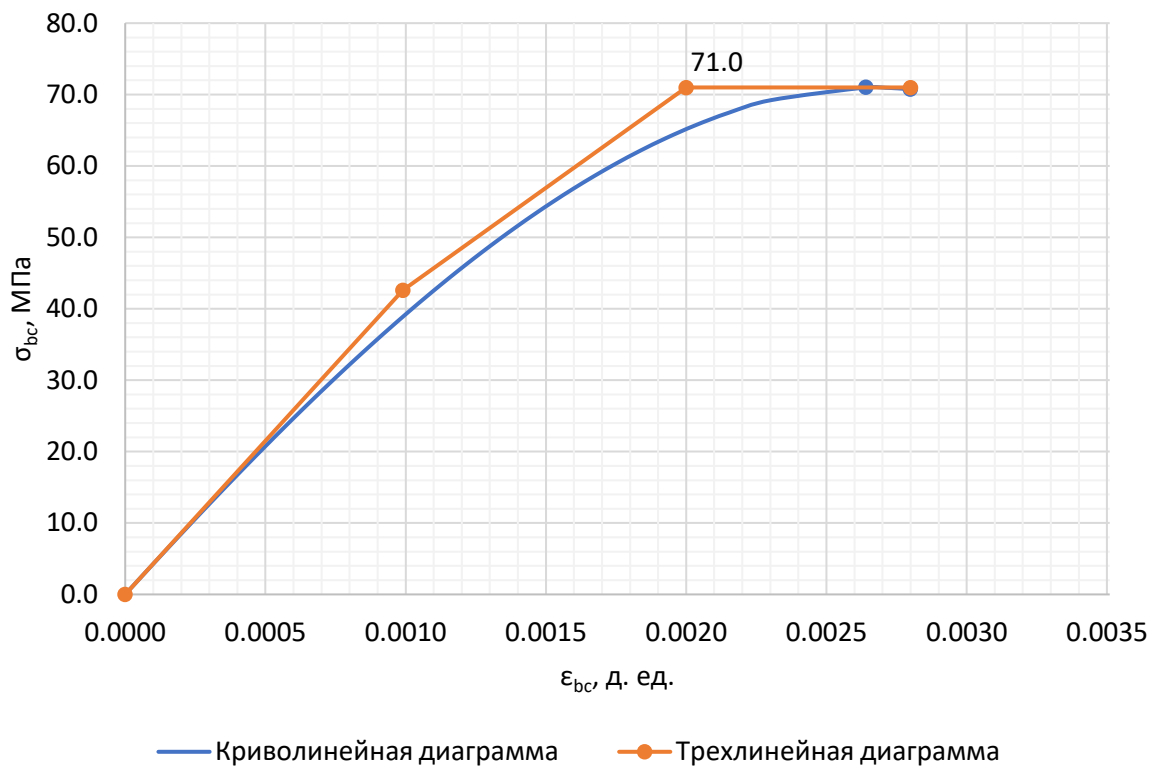
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В80 при сжатии и кратковременном нагружении



Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В90 при сжатии и кратковременном нагружении



Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В100
при сжатии и кратковременном нагружении



5 Литература

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с изменением № 1) / НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство». М.: Минстрой России, 2018.
2. Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М.: Минстрой России, 2019.