

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 «Строительство»

(код и наименование направления подготовки)

Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Соотношение прочностных параметров в расчетах  
железобетонных изгибаемых стержневых конструкций по нелинейной  
деформационной модели и методу предельных усилий

Студент

А.А. Васильев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

д.т.н., доцент, В.А. Ерышев

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Виды расчетных диаграмм деформирования бетона.....	6
1.1 Основные положения деформационного метода расчета бетона железобетона.....	6
1.2 Трех- и Двухлинейные диаграммы деформирования бетона.....	7
1.3 Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СП 63.13330.2012 .....	10
1.4 Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02..	12
1.5 Описание и расчет двухлинейной диаграммы деформирования бетона на ЭВМ .....	15
1.6 Описание и расчет трехлинейной диаграммы деформирования бетона на ЭВМ .....	17
1.7 Описание и расчет криволинейной диаграммы деформирования бетона по СП 63.13330.2012 на ЭВМ .....	19
1.8 Описание и расчет криволинейной диаграммы деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02 на ЭВМ.....	21
1.9 Соотношение параметров диаграмм бетона в российских и иностранных нормах.....	23
Глава 2 Расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов .....	28
2.1 Основные положения деформационного метода расчета бетона железобетона.....	28
2.2 Методика расчета прочности железобетонных элементов по деформационной модели .....	29
2.3 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по двухлинейной диаграмме деформирования бетона.....	33
2.4 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по трехлинейной диаграмме деформирования бетона .....	34
2.5 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по криволинейной диаграмме деформирования бетона (СП 63.13330.2012) .....	34

2.6 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по криволинейной диаграмме деформирования бетона (СНБ 5.03.01-02).....	35
2.7 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по методу предельных усилий (СНиП).....	36
Глава 3 Проведение эксперимента опытных образцов .....	38
3.1 Описание эксперимента.....	38
3.2 Твердение образца для определения прочности.....	38
3.3 Методика определения призмной прочности .....	39
3.4 Проведение испытания .....	39
3.5 Аппаратура.....	41
3.6 Обработка результатов .....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	48
Список используемых источников.....	49
ПРИЛОЖЕНИЕ А	
Фрагменты испытания опытных образцов .....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	
Диаграммы деформирования бетона.....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ В	
Расчет прочности изгибаемого элемента.....	70

## **ВВЕДЕНИЕ**

Представленная магистерская диссертация посвящена изучению научных вопросов поведения и совершенствование методов расчета бетона и железобетона. Надежность и безопасность бетонных и железобетонных конструкций и сооружений не может быть обеспечена без учета важных особенностей деформирования бетона. Сравнить методы расчета прочностных характеристик по деформационной модели и методу предельных усилий, определить при этом, наиболее совершенный и точный метод расчета, такова цель исследований в диссертационной работе. Для этого поставлено ряд задач: Построить диаграммы для армированных классов бетона, разобрать расчетную программу для ЭВМ по деформационной модели, а также установить соотношения между прочностными характеристиками. Наиболее важной на данный период времени задачей для исследователей считается усовершенствование концепции железобетона посредством сближения расчетной и физической моделей конструкции. Для решения данной задачи, как правило, создаются и используются предназначенные программы и программные комплексы для ЭВМ. Актуальность данной работы заключается в совершенствовании расчетов железобетонных конструкций.

Предметом исследования магистерской диссертации являются железобетонные конструкции, а объектом – расчет железобетонных изгибаемых стержневых элементов. Разобравшись с задачами диссертационной работы, была определена научная новизна данной работы, которая, заключается в усовершенствовании автоматизированного метода расчета, в следствии которого получен алгоритм расчета по деформациям изгибаемых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели, алгоритм расчета описан на ЭВМ с выполнением расчетов, произведено сравнение диаграмм деформирования бетона и методов расчета прочности (отечественных и зарубежных). Практическая значимость состоит

в научно-технической проблеме, учета основных свойств бетона, при расчётном обосновании железобетонных конструкций. Результаты работы докладывались и обсуждались:

- Жемчуев А.О., Васильев А.А. Соотношение предельных параметров при описании диаграмм деформирования бетона в расчетах прочности железобетонных элементов по деформационной модели.: Студенческие дни науки в ТГУ, Тольятти, 2019: материалы научно – практической конференции: Тольяттинский государственный университет, с. 44-46;

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

## **Глава 1 Виды расчетных диаграмм деформирования бетона**

### **1.1 Основные положения деформационного метода расчета бетона железобетона**

В последние годы статус приоритетного приобрел деформационный метод для расчета железобетонных конструкций с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры, поскольку обеспечивает высокую степень надежности в оценке их прочностных и деформативных свойств. «Наряду условиях с деформационными моделями в практике проектирования долгое время успешно применяется традиционная методика расчета по методу предельных усилий»[17]. Расчет железобетонных элементов на прочность по нелинейной деформационной модели производят на основе диаграмм осевого сжатия бетона, растяжения арматуры и гипотезы плоских сечений. Связь между деформациями и напряжениями в диаграммах деформирования осуществляется по оценкам испытаний стандартных образцов бетонных сечений (призм, цилиндров), бетон нагрузкой при сжатии, арматуры при растяжении. Отечественные и зарубежные нормативные документы рекомендуют в качестве расчетных, аппроксимирующих экспериментальные кривые деформирования бетона, стальной арматуры и устанавливающих связь между относительными деформациями и напряжениями, любые виды диаграмм: упрощенные, криволинейные, рабочие кусочно-линейные (трехлинейные и двухлинейные), соответствующие механическим свойствам материалов.

Процесс расчета сводится к выделению по высоте сечения элементарных участков и, используя аналитические связи между напряжениями и деформациями в диаграммах деформирования материалов, для каждого участка формируются значения средних напряжений[6,17]. Переход от напряжений к внутренним обобщенным усилиям выполняется с помощью количественного интегрирования напряжений по толщине сечения

элемента и после проверки условия равновесия в физических соотношениях вычисляются внутренние усилия, величина которых не должна превосходить усилий от внешних воздействий [7,32,33]. «Для исчисления фактических деформаций бетона и арматуры от внешней нагрузки, нелинейная задача решается способом последовательных приближений (итераций) или в приращениях до выполнения условия равновесия усилий в сечении с заданной достоверностью по кривизне элемента» [11]. Если максимальные относительные деформации от внешней нагрузки не превышают нормируемых значений предельных относительных деформации бетона на сжатие и арматуры на растяжение, то прочность сечения обеспечивается. При деформациях выше предельных значений соответствующий элемент бетона или стержень арматуры выключаются из работы и условие прочности не удовлетворяется. Когда при заданных параметрах сечения необходимо определить значения предельных усилий, в практике проектирования выполняются поверочные расчеты. Материалы бетон и арматура имеют различные деформационные и прочностные характеристики. По этой причине к предельным деформациям арматура и бетон приходят не одновременно, и определение ответственного материала за разрушение сечения в целом является актуальной задачей.

Соотношения между параметрами в предельном состоянии устанавливаются из условия равенства равнодействующих усилий в бетоне сжатой зоны с фактической и прямоугольной эпюрами напряжений в зависимости от вида используемых в расчетах диаграмм бетона.

## **1.2 Трех- и Двухлинейные диаграммы деформирования бетона**

В качестве рабочих диаграмм состояния тяжелого, мелкозернистого и напрягающего бетонов, определяющих связь между напряжениями и относительными деформациями, принимают упрощенные трехлинейную (рис. 1) и двухлинейную диаграммы (рис. 2) по типу диаграмм Прандтля.

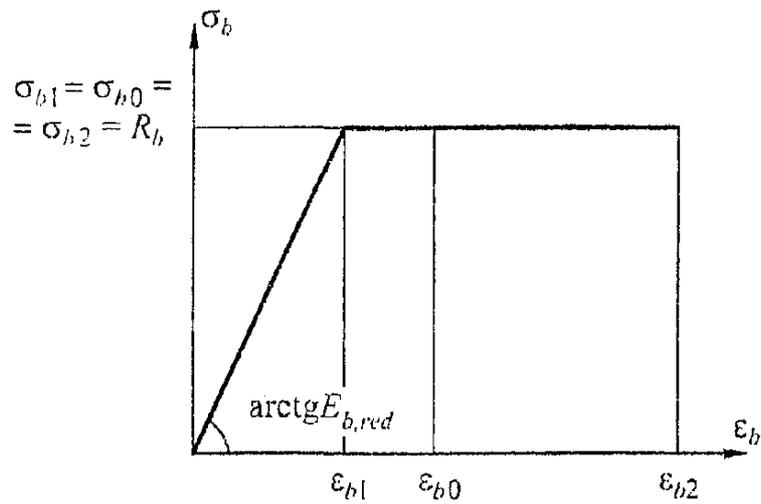


Рисунок 1 – Двухлинейная диаграмма деформирования бетона

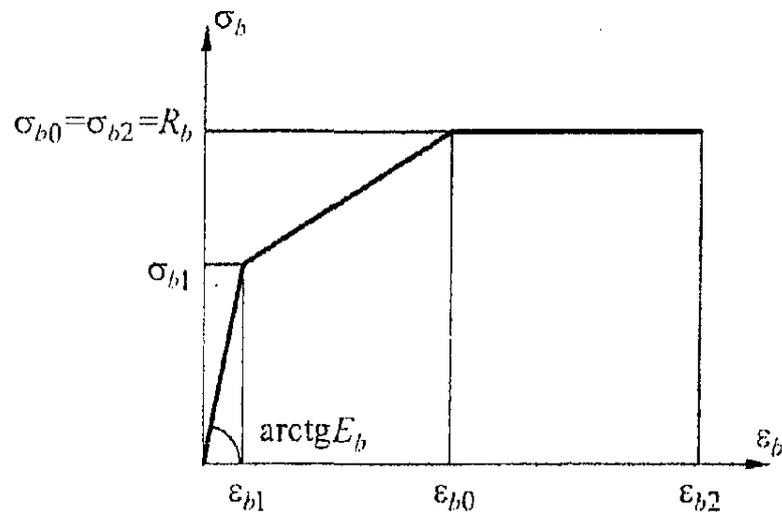


Рисунок 2 – Трехлинейная диаграмма деформирования бетона

При двухлинейной диаграмме сжимающие напряжения бетона  $\sigma_b$  в зависимости от относительных деформаций  $\varepsilon_b$  определяют по формулам:

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

где

$$\varepsilon_{b1} = \frac{R_b}{E_{b,red}}$$

$$\sigma_b = E_{b,red} \cdot \varepsilon_b \quad (1)$$

при  $\varepsilon_{b1} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$

$$\sigma_b = R_b \quad (2)$$

«Приведенного модуль деформации бетона  $E_{b,red}$  принимают»[3]:

$$E_{b,red} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b1,red}} \quad (3)$$

Значения относительных деформаций  $\varepsilon_{b1,red}$  принимают:

для тяжелого бетона при непродолжительном действии нагрузки  $\varepsilon_{b1,red} = 0,0015$ ;

для легкого бетона при непродолжительном действии нагрузки  $\varepsilon_{b1,red} = 0,0022$ ;

При трехлинейной диаграмме сжимающие напряжения бетона  $\sigma_b$  в зависимости от относительных деформаций укорочения бетона  $\varepsilon_b$  определяют по формулам:

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

$$\sigma_b = E_b \cdot \varepsilon_b \quad (4)$$

при  $\varepsilon_{b1} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$

$$\sigma_b = \left[ \left( 1 - \frac{\sigma_{b1}}{R_b} \right) \cdot \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} + \frac{\sigma_{b1}}{R_b} \right] \cdot R_b \quad (5)$$

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

$$\sigma_b = R_b \quad (6)$$

«Напряжения  $\sigma_{b1}$  принимают

$$\sigma_{b1} = 0,6 \cdot R_b$$

а величину относительных деформаций  $\varepsilon_{b1}$  принимают

$$\varepsilon_{b1} = \frac{\sigma_{b1}}{E_b}$$

Относительные деформации  $\varepsilon_{b2}$  [3] для тяжелого, мелкозернистого и напрягающего бетонов принимают:

при непродолжительном действии нагрузки:

для бетонов класса по прочности на сжатие В60 и ниже  $\varepsilon_{b2} = 0,0035$ ;

для высокопрочных бетонов класса по прочности на сжатие В70 - В100  $\varepsilon_{b2}$  принимается по линейному закону от 0,0033 при В70 до 0,0028 при В100;

### 1.3 Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СП 63.13330.2012

Аналитическая зависимость криволинейных диаграмм деформирования бетона принимается в виде:

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m \cdot \nu_m}, \quad d\varepsilon_m = \frac{d\sigma_m}{E_m \cdot \nu_m^k} \quad (7)$$

где  $\varepsilon_m$ ,  $\sigma_m$ ,  $E_m$  соответственно относительные деформации, напряжения, начальные модули упругости (d - знак дифференциала);

m - индекс материала (для бетона m = b, bt; для арматуры m = s);

$\nu_m$  - коэффициент изменения секущего модуля, определяемый по формуле

$$\nu_m = \bar{\nu}_m \pm \left( \nu_0 - \bar{\nu}_m \right) \cdot \sqrt{1 - \omega_1 \cdot \eta - \omega_2 \cdot \eta^2} \quad (8)$$

здесь  $\nu_m$  - значение коэффициента в вершине диаграммы (при  $\sigma_m = \bar{\sigma}_m$ );

$\nu_0$  - начальный коэффициент изменения секущего модуля (в начале диаграммы или в начале ее криволинейного отрезка);

$\omega_1$   $\omega_2$  - коэффициенты, характеризующие полноту диаграммы материала,  $\omega_2 = 1 - \omega_1$ ;

$\eta$  - уровень приращения напряжений, который определяется как отношение

$$\eta = \frac{(\sigma_m - \sigma_{m,el})}{\left( \bar{\sigma}_m - \sigma_{m,el} \right)} \quad (9)$$

$$(\sigma_m - \sigma_{m,el}) \geq 0;$$

$\sigma_{m,el}$  - напряжения, отвечающие пределу упругости материала;

$\nu_m^k$  - коэффициент изменения касательного модуля, связанный с коэффициентом изменения секущего модуля соотношением

$$\frac{I}{v_m^k} = \frac{I}{v_m} \pm \frac{\sigma_m (v_0 - v_m) \cdot (\omega_1 + 2\omega_2\eta)}{2v_m^2 (\sigma_m - \sigma_{m,el}) \sqrt{1 - \omega_1\eta - \omega_2\eta^2}} \quad (10)$$

В формулах (8) и (10) знак плюс принимают для диаграммы деформирования арматуры и для восходящей ветви диаграммы деформирования бетона, а знак минус - для нисходящей ветви диаграммы деформирования бетона. Нисходящую ветвь диаграммы разрешается использовать до уровня напряжений  $\eta \geq 0,85$  (с учетом дополнительных указаний 8).

При одноосном и однородном сжатии бетона исходная диаграмма деформирования бетона (рисунок 3) описывается зависимостями (7) - (10), в которых следует принимать:

«На рисунке 3 представлена криволинейная диаграмма деформирования бетона по СП 63.13330.2012, в качестве примера описанных формул»[5],

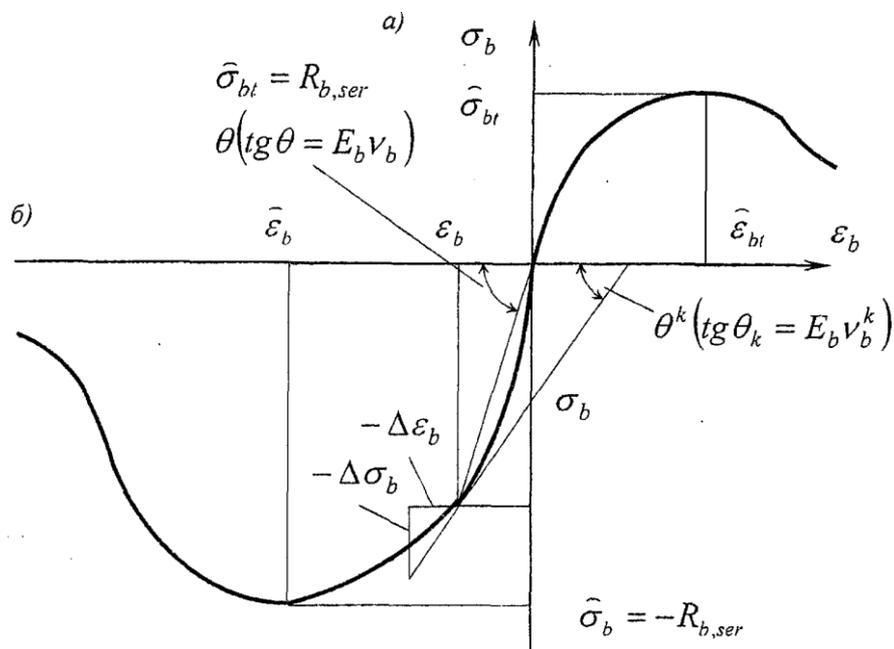


Рисунок 3 – «Криволинейные диаграммы деформирования бетона а) растяжение, б) сжатие» [5].

для обеих ветвей диаграммы

$$\bar{\sigma}_b = -R_{b,ser}; \bar{\sigma}_{b,el} = 0; \bar{\nu}_b = \frac{\bar{\sigma}}{\left(\bar{\varepsilon}_b \cdot E_b\right)}; \eta = \frac{\bar{\sigma}_b}{\bar{\sigma}_b}, \quad (11)$$

для восходящей ветви

$$\nu_0 = 1; \omega_l = 2 - 2,5 \bar{\nu}_b, \quad (12)$$

для нисходящей ветви

$$\nu_0 = 2,05 \bar{\nu}_b; \omega_l = 1,95 \bar{\nu}_b - 0,138 \quad (13)$$

Абсцисса вершины диаграммы осевого сжатия бетона определяется по формуле

$$\bar{\varepsilon}_b = -\frac{B}{E_b} \cdot \lambda \cdot \frac{1 + 0,75 \cdot \lambda \cdot \frac{B}{60} + 0,2 \cdot \frac{\lambda}{B}}{0,12 + \frac{B}{60} + \frac{0,2}{B}}, \quad (14)$$

где В - класс бетона по прочности на сжатие;

$\lambda$ - безразмерный коэффициент, зависящий от вида бетона и принимаемый равным:

для тяжелого и мелкозернистого бетона  $\lambda=1$ ;

для легкого бетона средней плотности D (кг/м<sup>3</sup>);  $\lambda= D/2400$ ;

для ячеистого бетона  $\lambda=0,25+0,35B$ .

«Двух-, трехлинейные и криволинейные диаграммы деформирования материалов используют в качестве нормированных диаграмм при расчете железобетонных конструкций»[5].

#### **1.4 Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02**

В качестве обобщенной характеристики механических свойств бетона при одноосном напряженном состоянии следует принимать диаграмму состояния (деформирования) бетона, устанавливающую связь между

напряжениями  $\sigma_c$  и продольными относительными деформациями  $\varepsilon_c$  сжатого бетона при кратковременном действии однократно приложенной нагрузки вплоть до установленных предельных значений, отвечающих разрушению бетона при однородном напряженном состоянии.

«Диаграмма деформирования (состояния) бетона при осевом кратковременном сжатии имеет криволинейное очертание с ниспадающей ветвью, в общем случае диаграмма представлена на рисунке 4»[1].

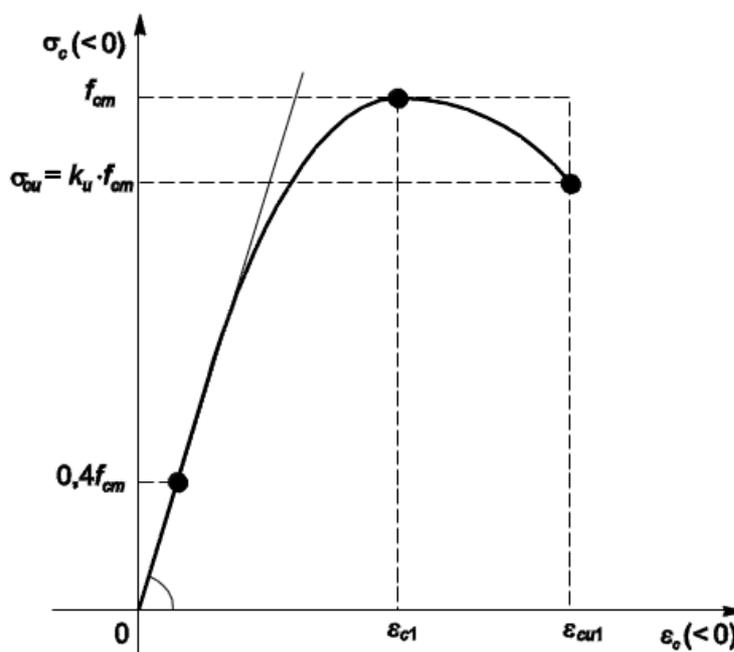


Рисунок 4 – Диаграмма деформирования (состояния) бетона при осевом кратковременном сжатии

«Использовать следующую аналитическую зависимость допускается для описания полной диаграммы деформирования бетона в условиях осевого кратковременного сжатия при выполнении нелинейных расчетов конструкций»[1].

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta}, \quad (15)$$

где  $f_{cm}$  — «прочность бетона на осевое сжатие, установленная для проектирования конструкций»[1], принимаемая по таблице 6.1 СНБ 5.03.01-02;

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}, \quad (\varepsilon_{c1} < 0);$$

здесь  $\varepsilon_{cl}$  — «относительная деформация, соответствующая пиковой точке диаграммы деформирования»[1], значение которой следует принимать по таблице 6.1 СНБ;

$$k = \frac{1,1 \cdot E_{cm,n} \cdot |\varepsilon_{cl}|}{f_{cm}} \quad (16)$$

здесь  $E_{cm,n}$  — «модуль упругости бетона для нелинейных расчетов конструкций, ГПа, определяемый по формуле»[1]:

$$E_{cm,n} = 22 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (17)$$

«Зависимость (15) применима в интервале относительных деформаций  $0 \leq |\varepsilon_{cl}| \leq |\varepsilon_{cul}|$ , где  $\varepsilon_{cul}$  — значение предельных относительных деформаций бетона при сжатии»[1], принимаемое по таблице 6.1 СНБ.

«Предельным состояниям первой группы при расчете сечений допускается принимать упрощенные диаграммы состояния для бетона (параболически-линейную, состоящую из отдельных прямолинейных участков, и т. д.), эквивалентные базовой диаграмме»[1].

«В качестве основной следует принимать базовую точку в вершине диаграммы с напряжениями, при описании нормативных диаграмм деформирования равными нормативным значениям сопротивления бетона осевому сжатию  $f_{ck}$ »[1].

«Закритическую область работы бетона на нисходящем участке диаграммы деформирования при расчете следует ограничивать уровнем напряжений  $\sigma_{cu} = k_u f_{ck}$ , принимая значение коэффициента  $k_u$ »[1].

«Предельные значения относительных деформаций бетона  $\varepsilon_{cul}$ , принимаемые в расчетах, не должны превышать значений»[1], приведенных в таблице 6.1 СНБ.

## 1.5 Описание и расчет двухлинейной диаграммы деформирования бетона на ЭВМ

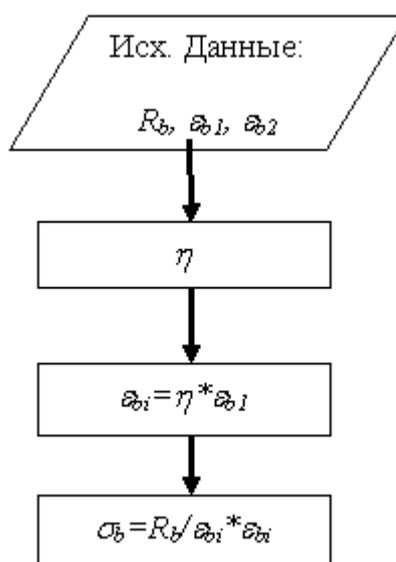


Рисунок 5 – Блок-схема построения двухлинейной диаграммы

Сведения для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Геометрические размеры сечения			Бетон		
			Класс бетона		B25
<i>h</i>	20,0	см	<i>R<sub>b</sub></i>	145	кг/см <sup>2</sup>
<i>b</i>	12,0	см	<i>R<sub>bt</sub></i>	10,5	кг/см <sup>2</sup>
<i>l</i>	240,0	см	<i>E<sub>b</sub></i>	300000	кг/см <sup>2</sup>
			<i>ε<sub>b1</sub></i>	0,00029	
			<i>ε<sub>b2</sub></i>	0,00350	
			<i>h<sub>0</sub></i>	17,40	см
			<i>a<sub>s</sub>, a<sub>s</sub>'</i>	2,00	см
			<i>ε<sub>b0</sub></i>	0,00200	

Произведенные расчеты для построения диаграммы описаны в таблице 2.

Таблица 2 – Двухлинейная диаграмма растяжения бетона

№ п/п	$\eta = \varepsilon_{bi} / \varepsilon_{b1}$	$\varepsilon_{bi}$	$\Delta \varepsilon_{bi}$	$\sigma_b$	$\Delta \sigma_{bi}$	$\Delta \varepsilon_{bi} \Delta \sigma_{bi}$	$\varepsilon_{bi}$	Si
1	0	0,00000	0,00000	0,00	0,00	0,00000	0,00000	0,00000
2	0,1	0,00015	0,00015	14,50	7,25	0,001088	0,00008	0,000000
3	0,2	0,00030	0,00015	29,00	21,75	0,003263	0,00023	0,000001
4	0,3	0,00045	0,00015	43,50	36,25	0,005438	0,00038	0,000002
5	0,4	0,00060	0,00015	58,00	50,75	0,007613	0,00053	0,000004
6	0,5	0,00075	0,00015	72,50	65,25	0,009788	0,00068	0,000007
7	0,6	0,00090	0,00015	87,00	79,75	0,011963	0,00083	0,000010
8	0,7	0,00105	0,00015	101,50	94,25	0,014138	0,00098	0,000014
9	0,8	0,00120	0,00015	116,00	108,75	0,016313	0,00113	0,000018
10	0,9	0,00135	0,00015	130,50	123,25	0,018488	0,00128	0,000024
11	1	0,00150	0,00015	145,00	137,75	0,020663	0,00143	0,000029
12	1,1	0,00165	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00158	0,000034
13	1,2	0,00180	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00173	0,000038
14	1,3	0,00195	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00188	0,000041
15	1,4	0,00210	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00203	0,000044
16	1,5	0,00225	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00218	0,000047
18	1,6	0,00240	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00233	0,000051
19	1,7	0,00255	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00248	0,000054
20	1,8	0,00270	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00263	0,000057
21	1,9	0,00285	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00278	0,000060
22	2	0,00300	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00293	0,000064
23	2,1	0,00315	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00308	0,000067
24	2,2	0,00330	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00323	0,000070
25	2,3	0,00345	0,00015	145,00	145,00	0,021750	0,00338	0,000073
26	2,33	0,00350	0,00005	145,00	145,00	0,007250	0,00348	0,000025
						0,398750		0,000833

Затем, после того, как произведены расчеты, строится диаграмма в соответствии с таблицей 2.

Диаграмма представлена на рисунке 6.

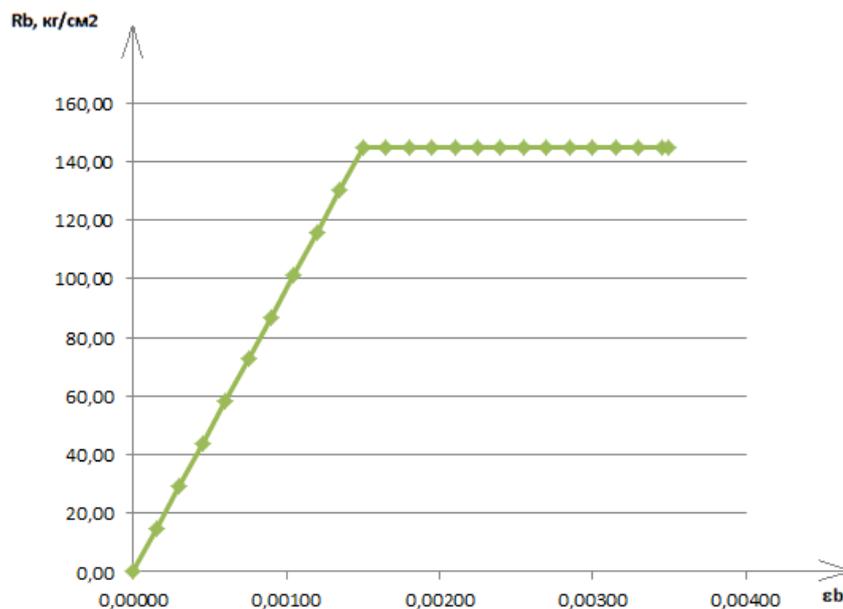


Рисунок 6 – Двухлинейная диаграмма деформирования бетона

## 1.6 Описание и расчет трехлинейной диаграммы деформирования бетона на ЭВМ

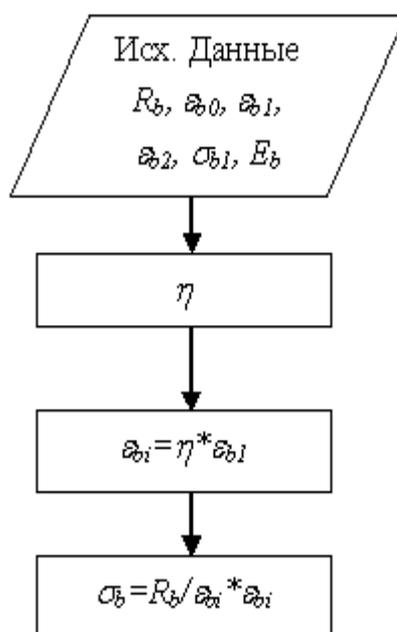


Рисунок 7 – Блок-схема построения трехлинейной диаграммы

Сведения для расчета представлены в таблице 2.

Таблица 3 – Исходные данные

Геометрические размеры сечения			Бетон		
			Класс бетона		B25
$h$	20,0	см	$R_b$	145	кг/см <sup>2</sup>
$b$	12,0	см	$R_{bt}$	10,5	кг/см <sup>2</sup>
$l$	240,0	см	$E_b$	300000	кг/см <sup>2</sup>
			$\varepsilon_{b1}$	0,00029	
			$\varepsilon_{b2}$	0,00350	
			$h_0$	17,40	см
			$a_s, a_s'$	2,00	см
			$\varepsilon_{b0}$	0,00200	

Далее строим трихлинейную диаграмму деформирования бетона.

Таблица 4 – Трехлинейная диаграмма растяжения бетона

№	$\eta = \varepsilon_{bi} / \varepsilon_{b1}$	$\varepsilon_{bi}$	$\Delta \varepsilon_{bi}$	$\sigma_b$	$\Delta \sigma_{bi}$	$\Delta \varepsilon_{bi} \Delta \sigma_{bi}$	$\varepsilon_{bi}$	$S_{bt,d}$
1	0	0,00000	0,00000	0,00	0,00	0,00000	0,00000	0,00000
2	0,1	0,00020	0,00020	60,00	30,00	0,006000	0,00010	0,000001
3	0,2	0,00040	0,00020	90,73	75,37	0,015073	0,00030	0,000005
4	0,3	0,00060	0,00020	97,51	94,12	0,018825	0,00050	0,000009
5	0,4	0,00080	0,00020	104,30	100,91	0,020181	0,00070	0,000014
6	0,5	0,00100	0,00020	111,08	107,69	0,021538	0,00090	0,000019
7	0,6	0,00120	0,00020	117,87	114,47	0,022895	0,00110	0,000025
8	0,7	0,00140	0,00020	124,65	121,26	0,024251	0,00130	0,000032
9	0,8	0,00160	0,00020	131,43	128,04	0,025608	0,00150	0,000038
10	0,9	0,00180	0,00020	138,22	134,82	0,026965	0,00170	0,000046
11	1	0,00200	0,00020	145,00	141,61	0,028322	0,00190	0,000054
12	1,1	0,00220	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00210	0,000061
13	1,2	0,00240	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00230	0,000067
14	1,3	0,00260	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00250	0,000073
15	1,4	0,00280	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00270	0,000078
16	1,5	0,00300	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00290	0,000084
18	1,6	0,00320	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00310	0,000090
19	1,7	0,00340	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00330	0,000096
20	1,75	0,00350	0,00010	145,00	145,00	0,014500	0,00345	0,000050
21						0,427158		0,000841

Диаграмма в соответствии с таблицей 4.

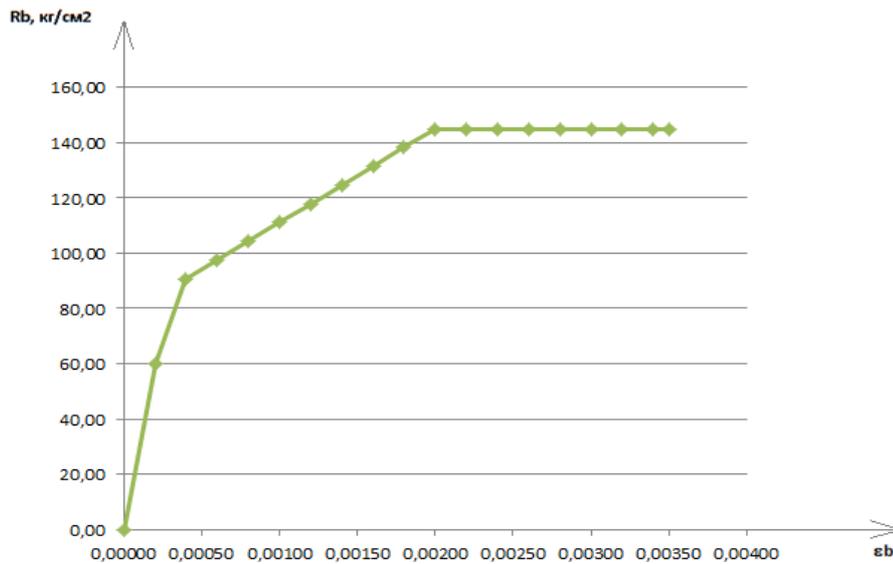


Рисунок 8 – Трехлинейная диаграмма деформирования бетона

### 1.7 Описание и расчет криволинейной диаграммы деформирования бетона по СП 63.13330.2012 на ЭВМ

Построение криволинейной диаграммы деформирования бетона по СП 63.13330.2012 производится согласно алгоритму, который представлен в качестве блок схемы на рисунке 9.

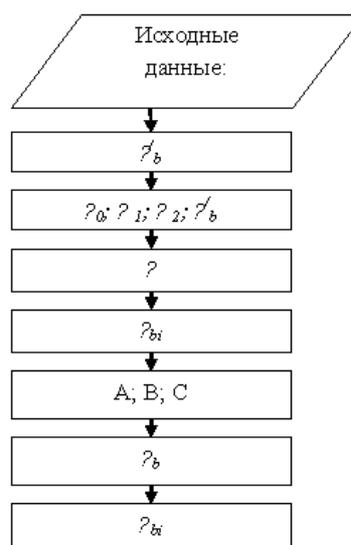


Рисунок 9 – Блок схема построения криволинейной диаграммы

Сведения для расчета представлены в таблице 5

Таблица 5. Исходные данные для построения криволинейной диаграммы по СП 63.13330.2012.

Геометрические размеры			Бетон		
h	20	см	Бетон	B25	25
b	12	см	Rb	145	кг/см <sup>2</sup>
l	210	см	Rbt	10,5	кг/см <sup>2</sup>
			$\varepsilon_{bt1}$	0,00008	кг/см <sup>2</sup>
			$\varepsilon_{bt0}$	0,0001	
			$\varepsilon_{bt2}$	0,00015	
			$\varepsilon_b$	0,00015	
			Eb	300000	кг/см <sup>2</sup>
			h <sub>0</sub>	17,4	см
			азс	2	см
			азс'	2	см
			$\varepsilon_{b1}$ , red	0,0015	
			$\nu_0$	1	0,49043
			w <sub>1</sub>	1,40192	0,3285
			w <sub>2</sub>	-0,4019	0,6715
			$\varepsilon^B = \varepsilon R$	0,00202	
			$\lambda$	1	
			$\nu^B$	0,23923	
			$\eta_d$	0,07426	
			k	0,85	

Далее строим криволинейную диаграмму деформирования бетона.

Таблица 6 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона

№ п/п	$\eta_d$	$\varepsilon_b$	A	B	C	$\nu_b$	$\Sigma$	$\sigma_b$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,1	0,00020	0,054906	0,007973	0,029849	0,813482	0,00	49,30551
2	0,2	0,00040	0,047928	-0,01144	0,029849	0,67881	0,00	82,28596
3	0,3	0,00061	0,036297	-0,03085	0,029849	0,57651	0,00	104,8276
4	0,4	0,00081	0,020013	-0,05026	0,029849	0,495942	0,00	120,237
5	0,5	0,00101	-0,00092	-0,06967	0,029849	0,430878	0,00	130,5787
6	0,6	0,00121	-0,02651	-0,08908	0,029849	0,37747	0,00	137,2719
7	0,7	0,00141	-0,05675	-0,10849	0,029849	0,333189	0,00	141,3634
8	0,8	0,00162	-0,09164	-0,1279	0,029849	0,29625	0,00	143,6467
9	0,9	0,00182	-0,13119	-0,14731	0,029849	0,265293	0,00	144,7159
10	1,0	0,00202	-0,17538	-0,16673	0,029849	0,239233	0,00	145
11	1,1	0,00222	0,1085	0,021929	0,000336	0,216408	0,00	144,2823
12	1,2	0,00242	0,118246	0,021433	0,000336	0,195763	0,00	142,3831
13	1,3	0,00263	0,128838	0,020937	0,000336	0,177212	0,00	139,6319

Продолжение таблицы 6

14	1,4	0,00283	0,140278	0,020441	0,000336	0,16062	0,00	136,2938
15	1,5	0,00303	0,152566	0,019945	0,000336	0,145824	0,00	132,577
16	1,6	0,00323	0,165701	0,019449	0,000336	0,132652	0,00	128,6415
17	1,7	0,00343	0,179683	0,018954	0,000336	0,120934	0,00	124,6082
18	1,733536	0,003502	0,184562	0,018787	0,000336	0,117302	0,00	123,25

Построение диаграммы в соответствии с таблицей 6.

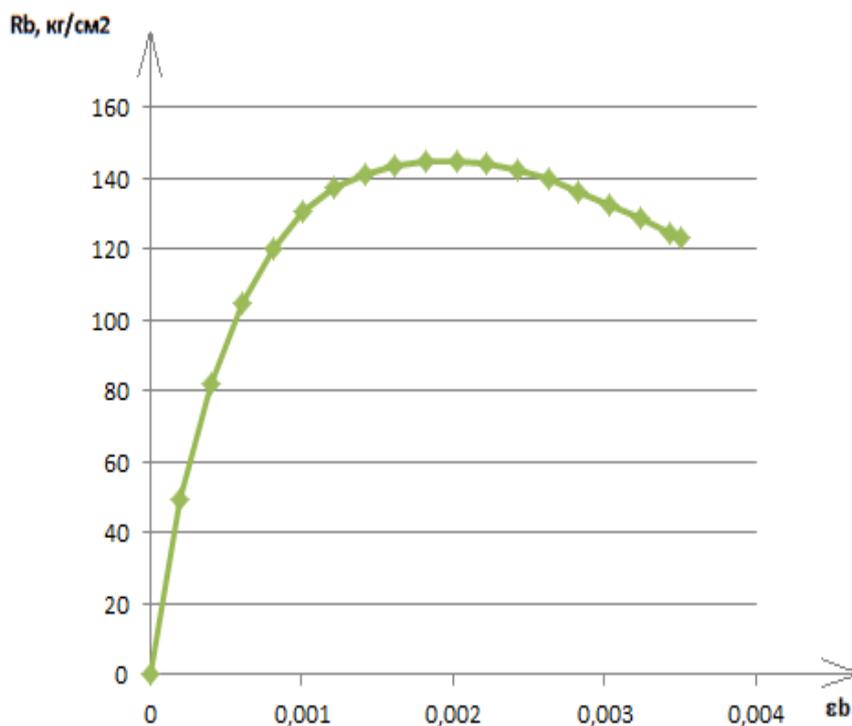


Рисунок 10 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СП 63.13330.2012 класса В25

### 1.8 Описание и расчет криволинейной диаграммы деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02 на ЭВМ

Построение криволинейной диаграммы деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02 производится согласно алгоритму, который представлен в качестве блок схемы на рисунке 9.

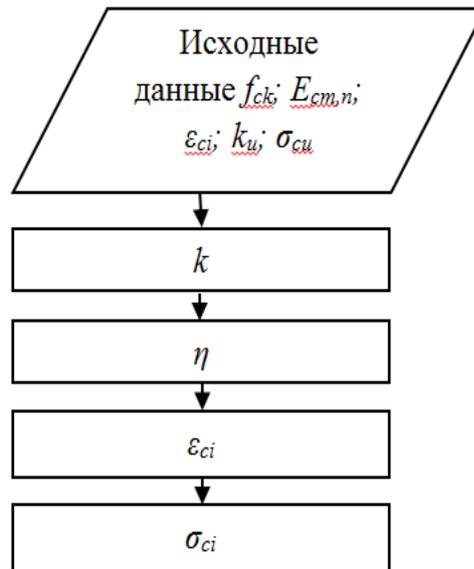


Рисунок 11 – Блок схема построения криволинейной диаграммы

Исходные данные для построения диаграммы представлены в таблице 6.

Таблица 7. Исходные данные для построения криволинейной диаграммы по СНБ 5.03.01-02 (Еврокод).

$f_{ck} =$	145	кг/см <sup>2</sup>
$\sigma_{cu} =$	116	кг/см <sup>2</sup>
$k_u =$	0,8	
$0.4f_{ck} =$	58	кг/см <sup>2</sup>
$E_{cm,n} =$	300000,00	кг/см <sup>2</sup>
$k =$	5,00690	
$\epsilon_{c1} =$	0,00220	
$\epsilon_{cu1} =$	0,00350	

Далее строим криволинейную диаграмму деформирования бетона

Таблица 8 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона

№ п/п	$\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1}$	$\epsilon_c$	$\Delta \epsilon_c$	$\sigma_c$	$\Delta \sigma_{ci}$	$\Delta \epsilon_c \Delta \sigma_{ci}$	$\epsilon_{ci}$	$S_i$
1	0	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,1	0,00022	0,00022	54,70	27,35	0,006017	0,00011	0,000001
3	0,2	0,00044	0,00022	87,05	70,88	0,015593	0,00033	0,000005
4	0,3	0,00066	0,00022	107,65	97,35	0,021417	0,00055	0,000012
5	0,4	0,00088	0,00022	121,30	114,47	0,025184	0,00077	0,000019
6	0,5	0,00110	0,00022	130,52	125,91	0,027700	0,00099	0,000027

Продолжение таблицы 8

7	0,6	0,00132	0,00022	136,73	133,62	0,029397	0,00121	0,000036
8	0,7	0,00154	0,00022	140,80	138,76	0,030528	0,00143	0,000044
9	0,8	0,00176	0,00022	143,30	142,05	0,031250	0,00165	0,000052
10	0,9	0,00198	0,00022	144,61	143,95	0,031670	0,00187	0,000059
11	1	0,00220	0,00022	145,00	144,80	0,031857	0,00209	0,000067
12	1,1	0,00242	0,00022	144,66	144,83	0,031863	0,00231	0,000074
13	1,2	0,00264	0,00022	143,74	144,20	0,031725	0,00253	0,000080
14	1,3	0,00286	0,00022	142,34	143,04	0,031469	0,00275	0,000087
15	1,4	0,00308	0,00022	140,55	141,44	0,031118	0,00297	0,000092
16	1,5	0,00330	0,00022	138,42	139,48	0,030687	0,00319	0,000098
17	1,59091	0,00350	0,00020	136,25	137,33	0,027467	0,00340	0,000093
18	1,6	0,00352		136,02		0,434940		0,000845

Построение диаграммы в соответствии с таблицей 8.

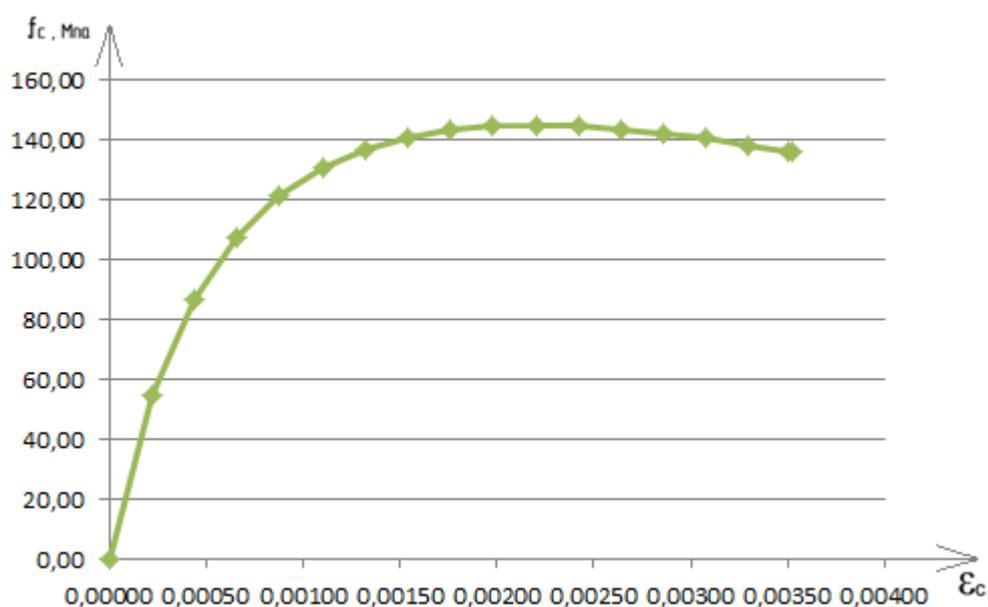


Рисунок 12 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02 класса В25

### 1.9 Соотношение параметров диаграмм бетона в российских и иностранных нормах

Установлены соотношения между деформационными параметрами и усилиями в нормальном сечении изгибаемых элементов с фактической эпюрой напряжений в сжатой зоне бетона и условной прямоугольной формы

эпюры напряжений метода «предельных усилий в предельном состоянии при достижении в арматуре напряжений, равных расчетному сопротивлению»[3]. Фактические значения параметров в нормальном сечении железобетонного элемента вычисляются по нелинейной деформационной модели численными методами последовательного приближения с использованием нормированных диаграмм бетона в редакции отечественных и зарубежных нормативных документов. Соотношения между параметрами в предельном состоянии устанавливаются из условия равенства равнодействующих усилий в бетоне сжатой зоны с фактической и прямоугольной эпюрами напряжений в зависимости от вида используемых в расчетах диаграмм бетона.

Значения определения диаграмм представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Значения для диаграмм деформирования бетона

СНБ	Класс бетона C\B	C25	C35	C50	C60	C70	C80	C90
		30	45	60	75	85	95	105
	$f_{cd} =$	14,17	19,8	28,3	32	35,47	39,7	43,7
	$f_{ck} =$	170	250	330	420	475	528	584
	$f_{cm} =$	33	43	58	68	78	88	98
	$\varepsilon_{cI} =$	0,00216	0,00230	0,00248	0,00258	0,00267	0,00276	0,00283
	$\varepsilon_{cu} =$	0,003519	0,003473	0,003346	0,003236	0,003112	0,002976	0,002831
	$\sigma_{cu} =$	136	200	264	336	380	422,4	467,2
	S	5328	7230	9781	11090	11650	12389	12508
	W	0,859	0,836	0,803	0,78	0,767	0,742	0,724
СП	Класс бетона	B30	B45	B60	B75	B85	B95	B105
	Rb	17	25	33	42	47,5	52,8	58,4
	Eb	32,5	37	39,5	41,5	42,25	42,75	43,25
	$\varepsilon(\text{кр})$	0,00218	0,002364	0,002504	0,002618	0,002685	0,002745	0,002801
	$\varepsilon_{bu} =$	0,00309	0,00282	0,00255	0,00229	0,00211	0,00193	0,00175
	$\sigma_{bu} =$	15,11111	23	31,2	40,6	46,5	52,272	58,4
	$\eta_{bu}$	0,888889	0,92	0,945455	0,966667	0,978947	0,99	1
	$\eta_{eu}$	1,417085	1,193407	1,019717	0,872914	0,784824	0,702511	0,62483
	S	5385	7633	9603	10808	11341	11700	11942
	W	0,851	0,827	0,8	0,773	0,754	0,734	0,711

Общая диаграмма деформирования бетона всех классов представлены на рисунках 13 и 14.

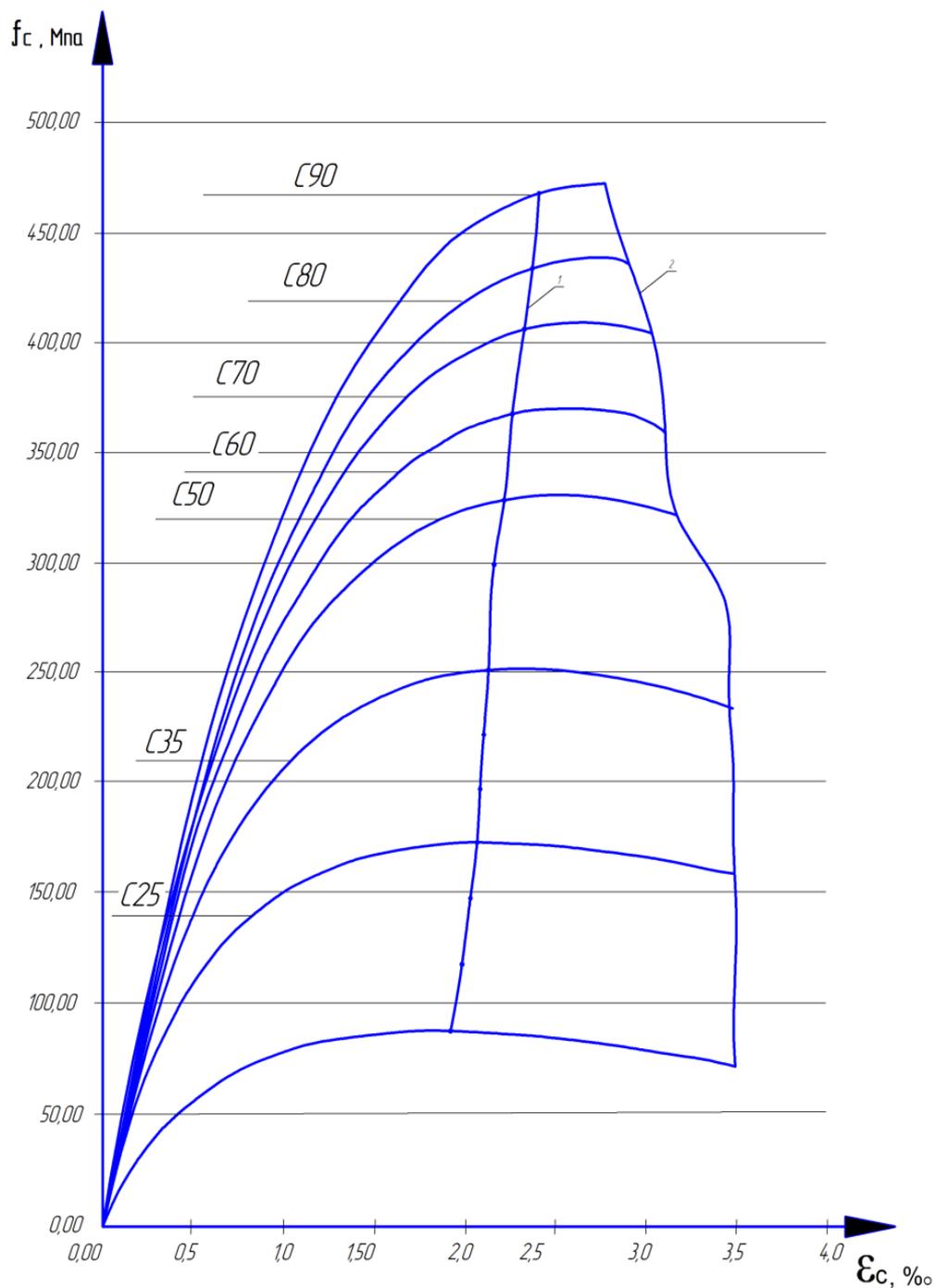


Рисунок 13 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02

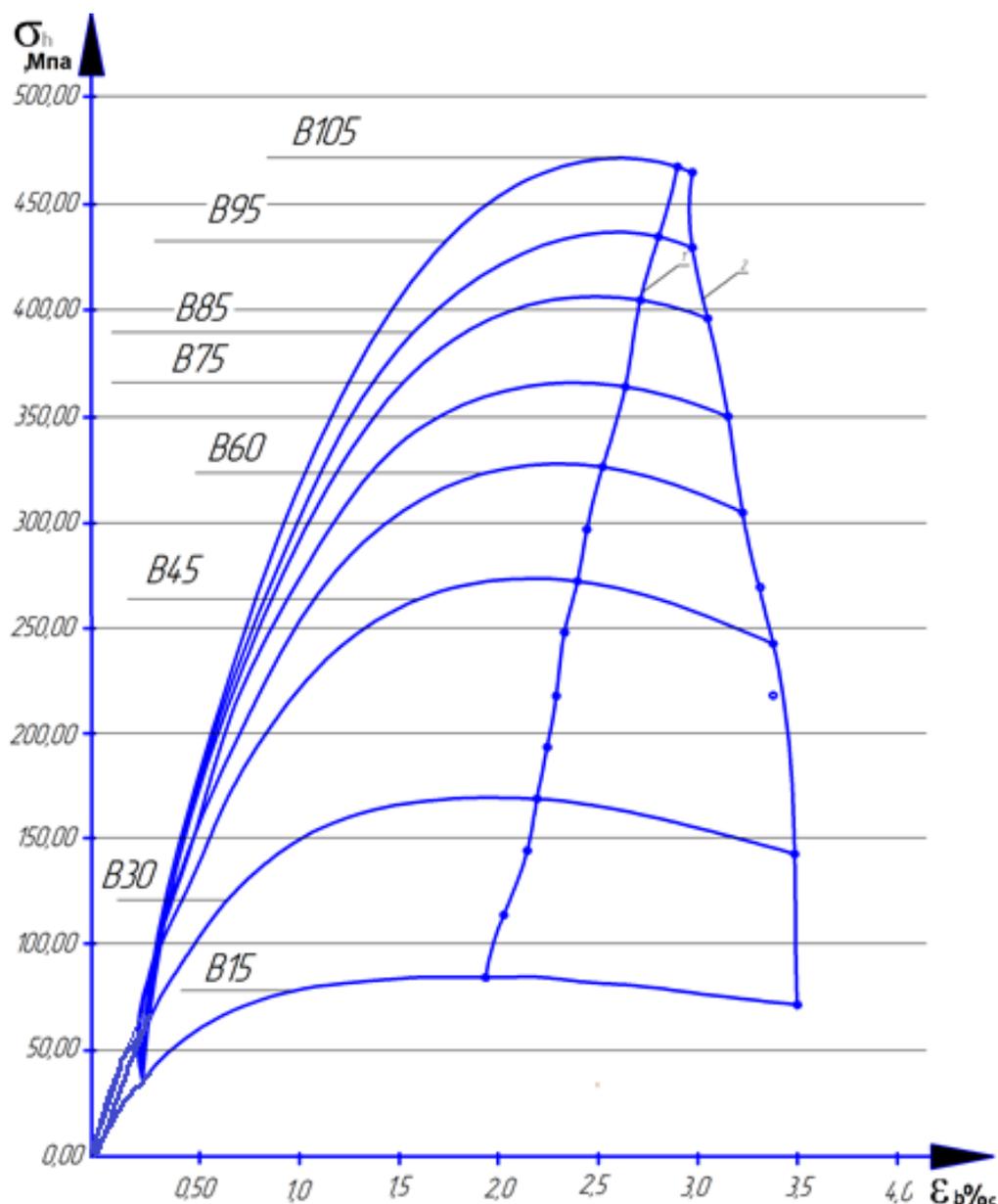


Рисунок 14 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СП 63.13330.2012

### Выводы по первой главе

В данной главе были исследованы и описаны диаграммы деформирования бетона (двух-, трехлинейные, криволинейные по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02) с построением их в ЭВМ. Произведено сравнение параметров, расчетов и диаграмм российских (СП 63.13330.2012) и зарубежных (СНБ 5.03.01-02) норм.

В частности произвели расчет двух методов построения криволинейных диаграмм. При этом, изучив различные характеристики участвующих в расчетах и зависимость для построения криволинейных диаграмм. Дали определение основному понятию, который гласит о том, что общий метод анализа напряженно-деформированного состояния поперечных сечений элементов, который известен в литературе под названием «деформационная модель» сечения и включен в Еврокоды, строительные нормы и своды правил России, нормы Беларуси и других стран. Одним из основных параметров, необходимых для расчетов по нелинейной деформационной модели является зависимость между деформациями и напряжениями, т.е. диаграмма напряжения-деформации.

Установлены соотношения между условной прямоугольной формы эпюры напряжений метода предельных усилий в предельном состоянии при достижении в арматуре напряжений, равных расчетному сопротивлению, деформационными параметрами и усилиями в нормальном сечении изгибаемых элементов с фактической эпюрой напряжений в сжатой зоне бетона. Фактические значения параметров в нормальном сечении железобетонного элемента вычисляются по нелинейной деформационной модели численными методами последовательного приближения с использованием нормированных диаграмм бетона в редакции отечественных и зарубежных нормативных документов. Соотношения между параметрами в предельном состоянии устанавливаются из условия равенства равнодействующих усилий в бетоне сжатой зоны с фактической и прямоугольной эпюрами напряжений в зависимости от вида используемых в расчетах диаграмм бетона.

Построены диаграммы деформирования с класса В10 до класса в 60 и сравнение их в одном графике. Сравнение прилагается в приложении Б.

## Глава 2 Расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов

### 2.1 Основные положения деформационного метода расчета бетона железобетона

«Расчет железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели производят на основе диаграмм состояния бетона и арматуры, исходя из гипотезы плоских сечений»[5]. Критерием прочности нормальных сечений является достижение предельных относительных деформаций в бетоне или арматуре. При расчете элементов железобетонных конструкций на прочность применяют два метода, по сечениям, нормальным к продольной оси[10-14,16,20-22,24-28]. Рассмотрим упрощенный метод предельных усилий, представленный как в СНиП 2.03.01-84\*[2], так и в более поздних СНиП 52-01-2003[3] нормах проектирования железобетонных конструкций. Согласно методу предельных усилий, прочность элемента почитается обеспеченной, если действующие в его сечениях усилия не превышают максимальных значений, вычисляемых из предположения о равномерном распределении нормальных напряжений, равных расчетному сопротивлению бетона, по условной сжатой зоне бетона; растянутый бетон из работы сечения, как правило, исключается. Данный метод является безопасным и простым стимулированием анализа при простых геометрических формах сечения и усложняется при более сложной конфигурации сечения и при косом изгибе. Метод предельных усилий, в изыскательской практике, обширно используется многие годы.

В последние годы также стали применять второй метод, более сложный, общий метод анализа напряженно-деформированного состояния поперечных сечений элементов, который известен в русскоязычной литературе под названием «деформационная модель» сечения и включен в Еврокоды[1,37], в нормы Беларуси, строительные нормы и своды правил России и других стран. Данный метод основан на использовании диаграмм

деформирования, аппроксимирующих нелинейную работу бетона и арматуры, и некоторого закона распределения относительных деформаций по площади поперечных сечений элементов; здесь применяется гипотеза плоских сечений или ее модификация для средних деформаций. Зависимости «напряжения - относительные деформации» произвольного вида (кусочно-линейные, криволинейные), построенные с мониторингом вида напряженного состояния и режима нагружения могут быть заимствованы в качестве диаграмм деформирования материалов. Общеввропейский метод расчета позволяет исполнять анализ сечений не только в предельном, но и в допредельном и запредельном состояниях, в отличие от алгоритма предельных усилий.

## **2.2 Методика расчета прочности железобетонных элементов по деформационной модели**

Заключается в том что, в поперечном прямоугольном сечении изгибаемого железобетонного элемента с армированием в нижней зоне арматурой площадью  $A_s$  и в верхней зоне площадью  $A'_s$  расчетная схема усилий в нормальном сечении с трещиной включают в себя: усилие  $N_s$  - в продольной арматуре, расположенной в растянутой зоне; усилие  $N_b$  - в бетоне сжатой зоны, приложенных в центре тяжести эпюр напряжений; усилие  $N'_s$  - в продольной арматуре, расположенной в сжатой зоне. Уравнение равновесия усилий в сечении железобетонного элемента запишется в виде:

$$N_b + N'_s - N_s = 0 \quad (18)$$

Значения усилий, напряжений в бетоне и арматуре в предельном состоянии, непосредственно перед разрушением нормального сечения, определяются через деформации по диаграммам деформирования материалов. На основании линейного закона распределения относительных деформаций по высоте элемента следуют соотношения

$$\frac{1}{\rho} = \chi = \frac{\varepsilon_{sn}}{h_0 - x} = \frac{\varepsilon_{bn}}{x} = \frac{\varepsilon_{bn} + \varepsilon_{sn}}{h_0} \quad (19)$$

где:  $h_0$  – рабочая высота сечения;

$x$  - высота сжатой зоны;

$\varepsilon_{bn}$  - относительные деформации на крайнем волокне бетона сжатой зоны;

$\chi$  - кривизна элемента;

$\rho$  - радиус кривизны;

$\varepsilon_{sn}$  - относительные деформации в растянутой арматуре.

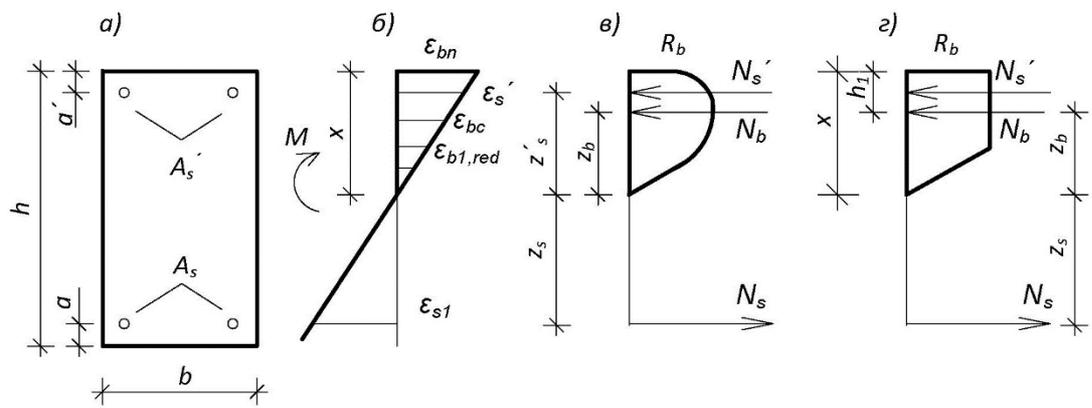


Рисунок 15 – Схемы распределения деформаций (б), напряжений и усилий в поперечном сечении изгибаемого ненапряженного элемента при расчете на прочность с использованием нормируемых диаграмм (в, г)

В области диаграммы, ограниченной максимальными деформациями бетона  $\varepsilon_{bn}$  (в расчетах на прочность  $\varepsilon_{bn} = \varepsilon_{b2}$ ), с помощью моделирования в ЭВМ по оси деформаций откладываются отдельные малые участки  $\Delta\varepsilon_{b,i}$  ( $i$ -номер участка). Деформациям в центре тяжести каждого участка  $\varepsilon_{bc,i}$  в диаграммах соответствуют средние значения напряжений в полосках:  $\sigma_{b,i}$ . В сжатой зоне элемента напряжения  $\sigma_{bi}$  распределяются в границах элементарных участков  $\Delta h_{b,i}$ , размеры которых вычисляются из соотношения:  $\Delta h_{b,i} = \Delta\varepsilon_{b,i} / \chi$ . Значение усилия  $N_b$ , воспринимаемого бетоном сжатой зоны в предельном состоянии для полоски единичной ширины ( $b=1$ ),

определяется путем численного суммирования усилий, действующих в пределах каждого элементарного участка

$$N_b = N_{b,d} / \chi \quad (20)$$

где в общем случае  $N_{b,d} = \sum_{i=1}^n A_{b,i} = \sum_{i=1}^n \sigma_{b,i} \Delta \varepsilon_{b,i}$  - представляет собой работу, затраченную на деформацию образца при нагрузке до их предельных значений, численно равную сумме площадей элементарных участков в области, ограниченной ветвями диаграмм бетона на сжатие и максимальным значением деформаций  $\varepsilon_{bn}$ . С учетом полученных зависимостей уравнение равновесия (18) для элемента шириной сечения  $b$  запишется:

$$\frac{N_{b,d} b}{\chi} + \sigma'_s A'_s - \sigma_s A_s = 0 \quad (21)$$

Деформации арматуры вычисляются из выражений:

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{bn} - \chi a', \varepsilon_s = \chi h_0 - \varepsilon_{bn} \quad (22)$$

Проверку уравнения равновесия (21) выполняется методом последовательных приближений (методом итераций). В первом приближении на крайнем волокне бетона сжатой зоны и растянутой арматуре принимаются предельные значения деформаций  $\varepsilon_{bn}^{(1)} = \varepsilon_{b,ult} = \varepsilon_{b2}$ ;  $\varepsilon_{sn}^{(1)} = \varepsilon_{s2}$ . В соответствии с принятыми в уравнении (21) знаками перед слагаемыми в левой части уравнения по результатам вычисления могут возникнуть два случая: 1 – левая часть уравнения (21) больше нуля, что свидетельствует о недостаточности армирования сечения; 2 – левая часть уравнений (21) меньше нуля, что означает – переармированное сечение.

При возникновении первого случая необходимо при постоянных значениях  $\varepsilon_{s2}$  уменьшать деформации первого приближения  $\varepsilon_{bn}^{(1)}$  на величину приращения  $\Delta \varepsilon_b^{(1)}$ :  $\varepsilon_b^{(2)} = \varepsilon_{bn}^{(1)} - \Delta \varepsilon_b^{(1)}$  и проверить выполнение условие равновесия (21). Процедура приближения выполняется до тех пор,

пока при некотором  $\varepsilon_b^{(k)}$  ( $k$ -ом приближении) не будет достигнута заданная точность по сумме усилий в левой части уравнения (21):

$$\sum N_{b,s} \leq 0,0001 \quad (23)$$

При реализации второго случая, т.е. когда левая часть уравнения оказалась меньше нуля, алгоритм проверки уравнения равновесия (21) выполняется в той же последовательности. Однако деформации в арматуре, принятые в первом приближении  $\varepsilon_{sn}^{(1)} = \varepsilon_{s2} = 0,025$ , уменьшаются на втором цикле итераций на величину приращения  $\Delta\varepsilon_s^{(1)}$ :  $\varepsilon_s^{(2)} = \varepsilon_{sn}^{(1)} - \Delta\varepsilon_s^{(1)}$  при постоянных значениях деформаций на крайнем волокне сжатой зоны бетона  $\varepsilon_{bn}^{(1)} = \varepsilon_{b2} = 0,0035$ . Вычисления выполняются до тех пор, пока не будет достигнута достаточная (заданная) точность выполнения условия (23) по  $\varepsilon_s^{(k)}$ .

Условие прочности сечений железобетонных изгибаемых элементов записывается в виде  $M \leq M_{ult}$ , где  $M$  – изгибающий момент от внешних нагрузок;  $M_{ult}$  – предельный изгибающий момент, воспринимаемый сечением элемента. Значения  $M_{ult}$  для элементов прямоугольного сечения определяются относительно фиксированной нулевой линии. Расстояния усилий в арматуре  $N_s'$ ,  $N_s$  и усилий в бетоне  $N_b$  до нейтральной оси соответственно составляют:

$$z_s' = \frac{\varepsilon_b^{(k)} - a' \chi^{(k)}}{\chi^{(k)}}; z_s = \frac{\chi^{(k)} h_0 - \varepsilon_b^{(k)}}{\chi^{(k)}}; z_b = \frac{S_{b,d}}{\chi^{(k)} N_{b,d}} = \frac{\varepsilon_{b,c}}{\chi^{(k)}}, \quad (24)$$

где  $S_{b,d} = \sum_{i=1}^n A_{b,i} \varepsilon_{bc,i} = \sum_{i=1}^n \sigma_{b,i} \Delta\varepsilon_{b,i} \varepsilon_{bc,i}$  – момент, численно равный сумме произведений площадей элементарных площадок в диаграммах бетона на расстояния их центров тяжести до оси напряжений  $\sigma_b$ ;  $\varepsilon_{b,c} = S_{b,d} / N_{b,d}$  – расстояние от оси напряжений  $\sigma_b$  бетона до центра тяжести диаграммы;  $\chi^{(k)}$  – кривизна элемента после выполнения условия (23) на  $k$ -ой итерации.

Уравнение для вычисления предельного изгибающего момента примет вид:

$$M_{ult} = N_b b z_b + \sigma_s A_s z_s + \sigma'_s A'_s z'_s \quad (25)$$

где используются значения:  $\varepsilon_{bu} = \varepsilon_b^{(\kappa)}$  - для первого случая,  $\varepsilon_{su} = \varepsilon_s^{(\kappa)}$  - для второго случая,  $\chi^{(\kappa)}$ , полученные на последних циклах итераций, после выполнения условия (21).

### 2.3 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по двухлинейной диаграмме деформирования бетона

Требуется проверить прочность железобетонного изгибаемого элемента, характеристики которого описаны в таблице 10.

Таблица 10. Исходные данные для расчета прочности сечения

Геометрические размеры			Арматура			Бетон		
$h$	20,0	см	Класс арматуры	A400		Класс бетона	B25	
$b$	12,0	см	$A_s$	2,26	$см^2$	$R_b$	145	$кг/см^2$
$l$	240,0	см	$A'_s$	1,01	$см^2$	$R_{bt}$	10,5	$кг/см^2$
			$\sigma_t$	3500	$кг/см^2$	$E_b$	300000	$кг/см^2$
			$E_s$	2000000	$кг/см^2$	$\varepsilon_{b1}$	0,00150	
			$\varepsilon_{s2}$	0,025		$\varepsilon_{b2}$	0,00350	
			$R_s$	3500	$кг/см^2$	$h_0$	17,40	см
			$\varepsilon_{s0}$	0,00175		$a_s$		
						$a'_s$	2,00	см
						$\varepsilon_{b1,red}$	0,00150	
						$E_{b,red}$	96666,67	$кг/см^2$

Расчет прочности изгибаемого элемента производился на ЭВМ в программе Microsoft Excel и описан в таблице А3.

## 2.4 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по трехлинейной диаграмме деформирования бетона

Требуется проверить прочность железобетонного изгибаемого элемента, характеристики которого описаны в таблице 8.

Таблица 11. Исходные данные для расчета прочности сечения

Геометрические размеры			Арматура			Бетон		
$h$	20,0	см	Класс арматуры		A400	Класс бетона		B25
$b$	12,0	см	$A_s$	2,26	$см^2$	$R_b$	145	$кг/см^2$
$l$	240,0	см	$A_s'$	1,01	$см^2$	$R_{bt}$	10,5	$кг/см^2$
			$\sigma_t$	3500	$кг/см^2$	$E_b$	300000	$кг/см^2$
			$E_s$	2000000	$кг/см^2$	$\epsilon_{b1}$	0,00029	
			$\epsilon_{s2}$	0,025		$\epsilon_{b2}$	0,00350	
			$R_s$	3500	$кг/см^2$	$h_0$	17,40	см
			$\epsilon_{s0}$	0,00175		$a_s, a_s'$	2,00	см
						$\epsilon_{b0}$	0,00200	

Расчет прочности изгибаемого элемента производился на ЭВМ в программе Microsoft Excel и описан в таблице А4.

## 2.5 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по криволинейной диаграмме деформирования бетона (СП 63.13330.2012)

Требуется проверить прочность железобетонного изгибаемого элемента, характеристики которого описаны в таблице 10.

Таблица 12. Исходные данные для расчета прочности сечения

Геометрические размеры			Арматура			Бетон		
$h$	20	см	Арматура	A400		Бетон	B25	
$b$	12	см	$A_s$	2,26	см	$R_b$	145	$кг/см^2$
$l$	210	см	$A_s'$	1,01	см	$R_{bt}$	10,5	$кг/см^2$
			$\sigma_t$	3500	$кг/см^2$	$\epsilon_{bt1}$	0,00008	$кг/см^2$

Продолжение таблицы 12

			$E_s$	2000000	кг/см <sup>2</sup>	$\epsilon_{bt0}$	0,0001	
			$\epsilon_{s1}$	0,00175		$\epsilon_{bt2}$	0,00015	
			$\epsilon_{s2}$	0,025		$\epsilon_b$	0,00015	
			$R_s$	=	$\sigma_t$	$E_b$	300000	кг/см <sup>2</sup>
						$h_0$	17,4	см
						$a_{zc}$	2	см
						$a_{zc}'$	2	см
						$\epsilon_{b1, red}$	0,0015	
						$\nu_0$	1	0,49043
						$w_1$	1,40192	0,3285
						$w_2$	-0,4019	0,6715
						$\epsilon^{\wedge}_B = \epsilon R$	0,00202	
						$\lambda$	1	
						$\nu^{\wedge}_B$	0,23923	
						$\eta d$	0,07426	
						$k$	0,85	

Расчет прочности изгибаемого элемента по СП 63.13330.2012 представлен в приложении В, таблица В.1.

## 2.6 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по криволинейной диаграмме деформирования бетона (СНБ 5.03.01-02)

Требуется проверить прочность железобетонного изгибаемого элемента, характеристики которого описаны в таблице 11.

Таблица 13. Исходные данные для построения диаграммы

Геометрические размеры			Арматура			Бетон		
$h$	20,0	см	Класс арматуры		A400	Класс бетона		B25
$b$	12,0	см	$A_s$	2,26	см <sup>2</sup>	$R_b$	145	кг/см <sup>2</sup>
$l$	240,0	см	$A_s'$	1,01	см <sup>2</sup>	$R_{bt}$	10,5	кг/см <sup>2</sup>
			$\sigma_t$	3500	кг/см <sup>2</sup>	$E_b$	300000	кг/см <sup>2</sup>
			$E_s$	2000000	кг/см <sup>2</sup>	$\epsilon_{c1}$	0,0022	
			$\epsilon_s$	0,01		$\epsilon_{cu1}$	0,0035	
			$R_s$	3500	кг/см <sup>2</sup>	$h_0$	17,40	см
						$a_s$		
						$a_s'$	2,00	см

Расчет прочности изгибаемого элемента по СП 63.13330.2012 представлен в приложении В, таблица В.2.

## 2.7 Расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента по методу предельных усилий (СНиП)

Одним из наиболее простых способов расчета по прочности железобетонных элементов является метод предельных усилий, который описывается в СНиП. Схема сечения, с указанием действия момента, и направлением сил показаны на рисунке 16.

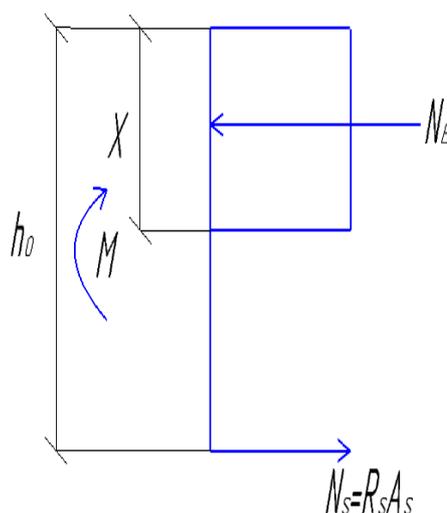


Рисунок 16 – Схема сечения с направлениями сил

Исходные данные:

1. Размер поперечного сечения:  $b=120\text{мм}$ ;  $h=200\text{мм}$
2. Класс арматуры: А400
3. Класс бетона: В25
4.  $h_0 = 17,4\text{см}$
5.  $R_s = 350\text{МПа}$ ;  $R_b = 14,5\text{МПа}$ ;
6. Защитный слой бетона: 20мм

Первым этапом мы составляем уравнение  $N_B - N_s = 0$ .

Для определения момента нам необходимо найти  $x = \frac{N_s}{b \cdot R_b}$ , где

$$N_S = R_S * A_S \quad (26)$$

Определив все данные необходимые для расчета непосредственно момента, определяем  $M_{ult} = R_S A_S * (h_0 - \frac{x}{2})$ .

Подставив все найденные значения,  $M_{ult} = 11,96 \text{кНм}$ .

### Выводы по второй главе

Произведены расчеты изгибаемых железобетонных элементов по полученным диаграммам. Проанализировав прочностные характеристики способов, сравниваем все методы расчета и определили самую эффективную методику расчета.

Для составления данной таблицы сравнения прочностных характеристик, рассчитаны:

Кривизна, не считая, метода предельных усилий, усилия продольные и поперечные, в растянутой и в сжатой зоне, а также момент.

Таблица 14. Прочностные характеристики

Диаграмма В25	$\chi, \text{см}^{-1}$	Nb	Ns	Ns'	<i>Mult</i>	$z_b, \text{см}$	$z_s, \text{см}$
2-ух линейная	0,000989	4836,76	7910	3073,24	12,46	2,11	13,86
3-ех линейная	0,001027	4990,01	7910	2919,99	12,44	1,92	13,99
СНБ	0,000731	5357,03	7910	2552,97	12,4	2,13	13,67
Карпенко	0,000986	4819,16	7910	3090,84	12,91	1,83	13,85
Метод предельных усилий	-	4350	7910	3535	11,96	1,72	15

## **Глава 3 Проведение эксперимента опытных образцов**

### **3.1 Описание эксперимента**

В рамках подкрепления теоретического анализа была поставлена цель – провести испытание на прочность трех образцов цилиндрической формы круглого сечения и трех образцов призмной формы квадратного сечения.

Для проведения эксперимента были приняты мероприятия для более качественных и достоверных сведений. В этот список вошли:

1. Изготовление образцов цилиндрической и призмной формы;
2. Измерение геометрических характеристик образцов;
3. Проведение испытаний на сжатие;
4. Свод данных испытания в таблицу;
5. Анализ полученных результатов.

### **3.2 Твердение образца для определения прочности**

Для выполнения испытания необходимо было изготовить образцы в виде призмы и цилиндра. Данные образцы изготавливались в специальной форме сечения из бетона класса В25. Бетонная смесь данных образцов представляет собой цемент М400, кварцевый речной песок, в качестве крупного заполнителя применялся гранитный щебень с фракцией 40мм и вода. Формы сечений были залиты с диаметром 160мм и высотой 600мм. После изготовления «образца, его поместили в комнату с нормальными условиями для твердения и набора прочности, где формы хранились 28 суток»[6]. Способ и режим твердения образцов бетона, предназначенных для производственного контроля прочности, производился по описанию в ГОСТ 10180-2012[1].

1. «Образцы, предназначенные для твердения в нормальных условиях, после изготовления до их распалубливания хранят в формах,

покрытых влажной тканью или другим материалом, исключая испарение из них влаги, в помещении с температурой воздуха  $(20\pm 5)$  °С»[1].

2. «После распалубливания образцы помещают в камеру с нормальными условиями твердения: с температурой  $(20\pm 2)$ °С и относительной влажностью воздуха  $(95\pm 5)\%$ . Образцы укладывают на подкладки так, чтобы расстояние между образцами, а также между образцами и стенками камеры было не менее 5 мм»[1].

### **3.3 Методика определения призмной прочности**

Цилиндр и призма испытывались в соответствии с ГОСТ 10180-2012[1] и ГОСТ 24452-80[2]. При специальной подготовке образцов к испытанию устанавливались специальные железные рамки, для этого размечались центральные линии на боковых поверхностях. С помощью данных железных рамок по всем сторонам образцов для замера деформаций, закреплялись индикаторы часового типа (рис. 3.1). На нижнюю опорную часть пресса по центру плиты, устанавливался образец с приборами. Производилась установка первоначального отсчета по делениям шкалы прибора. Скорость нагружения в пределах каждой ступени составляла  $0,6\pm 0,2$  МПа/с. При достижении нагрузки при которой образец разрушается, с образца снимаются приборы.

### **3.4 Проведение испытания**

Методика проведения испытаний разрабатывалась согласно ГОСТ 10180-2012[1].

При проведении испытаний соблюдены все указания ГОСТа:

- «смонтированы нагрузочные приспособления»[1];
- «установлены приборы, подмости и ограждения»[1];

- «выполнены работы по предварительному загрузению испытательной конструкции»[1].



Рисунок 16 – Общий вид образцов с установленными индикаторами часового типа

Испытание проводилось в строительной лаборатории. Для начала испытания немало времени заняла подготовка образцов к испытанию. Подготовка начиналась с закрепления стальных рамок для устройства индикаторов на расстоянии 150мм верха и низа граней, такое расстояние должно быть равным, так как база согласно ГОСТу должна быть 300мм. На прикреплённые стальные рамки, на каждую грань образца, устанавливаются индикаторы часового типа для замера деформации при увеличении нагрузки. Бетон-материал пористый и имеет небольшие впадины (пузырьки). Для равномерности распределения усилий и для более точного получения результатов опыта, нижнюю и верхнюю плоскость образца, находящейся в контакте с плитами пресса, смазывают гипсовым раствором. Перед установкой образца в «испытательную машину необходимо проверить, удалены ли частицы бетона»[6], оставшиеся от предыдущего испытания на опорных плитах испытательной машины, что играет немало важную роль для

получения более точных результатов испытания. Поместив образец в испытательную машину, совмещают верхнюю плиту испытательной машины с верхней опорной гранью образца так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Образец нагружают «равномерно и доводят его до разрушения»[6]. Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимают за разрушающую нагрузку.



Рисунок 16 – Общий вид бетонных образцов во время разрушения

Все достигнутые результаты записывались в табличную форму Microsoft Excel. В табличной форме полное описание испытания в числовых характеристиках, выраженных в диаграммах деформирования бетона. Более подробные фрагменты испытания образцов показаны в приложении А.

### 3.5 Аппаратура

Для испытаний была использована следующая аппаратура:

Пресс гидравлический МОД П-250 показан на рисунке 3.3



Рисунок 17 – Пресс гидравлический МОД П-250

В качестве основных инструментов использовались – металлическая линейка в виде уголка, гаечный ключ для закрепления металлических рамок, карандаш и измерительная рулетка.

Основные характеристики гидравлического прессы представлены на рисунке 18.



Рисунок 17 – Основные характеристики гидравлического пресса МОД П-250

### 3.6 Обработка результатов

Для составления расчетной таблицы в программе Microsoft excel, определены основные параметры для построения конечной диаграмм разрушения призм и цилиндров.

«Начальный модуль упругости бетона соответствует лишь упругим деформациям бетона, возникающим при мгновенной нагрузки. В связи с этим начальный модуль упругости бетона при сжатии определяется из зависимости:»[2]

$$E_b = \frac{\sigma_{0.3}}{\epsilon_{0.3}} \quad (27)$$

Где  $\sigma_{0.3}$  – «напряжение в бетоне, соответствующее 30% от разрушающей нагрузки;»[2]

$\epsilon_{0.3}$  – «относительные деформации бетона при соответствующих напряжениях»[2]

Напряжения, возникающие в призме, имеют смысл быть, при выражении:

$$\sigma = N/A, \text{ (кг/см}^2\text{)} \quad (28)$$

где N - разрушающая нагрузка, кН

A - площадь поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>

Относительные деформации определяют по формуле:

$$\varepsilon = \Delta\ell/\ell \quad (29)$$

где  $\Delta\ell$  - Разность показаний прибора.

Все результаты в таблицах 13-16:

Таблица 15. Результаты испытаний цилиндра №1

N(кг)	$\sigma$ (кг/см <sup>2</sup> )	индикатор				$\Sigma\Delta\ell/4$ мм	$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell} * 10^5$
		1	2	3	4		
0	0	0	0	0	0	0	0
5000	6,220143	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	26,67
10000	12,44029	0,025	0,030	0,040	0,035	0,0325	43,33
15000	18,66043	0,030	0,040	0,050	0,040	0,04	53,33
20000	24,88057	0,040	0,049	0,075	0,060	0,056	74,67
25000	31,10072	0,050	0,060	0,090	0,070	0,0675	90,00
30000	37,32086	0,060	0,080	0,100	0,083	0,08075	107,67
35000	43,541	0,060	0,095	0,120	0,095	0,0925	123,33
40000	49,76115	0,070	0,093	0,135	0,150	0,112	149,33
45000	55,98129	0,15	0,14	0,22	0,31	0,205	273,33
50000	62,20143	0,95	0,62	0,19	0,50	0,565	753,33
55700	60	0,80	0,50	0,28	0,70	0,57	800,00

Таблица 16. Результаты испытаний цилиндра №2

N(кг)	$\sigma$ (кг/см <sup>2</sup> )	индикатор				$\Sigma\Delta\ell/4$ мм	$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell} * 10^5$
		1	2	3	4		
0	0	0	0	0	0	0	0
5000	6,220143	0,02	0,005	0,00	0,01	0,00875	11,67
10000	12,44029	0,025	0,000	0,010	0,050	0,02125	28,33
15000	18,66043	0,031	0,010	0,015	0,090	0,0365	48,67
20000	24,88057	0,035	0,040	0,040	0,110	0,05625	75,00
25000	31,10072	0,036	0,060	0,060	0,180	0,084	112,00
30000	37,32086	0,040	0,100	0,090	0,200	0,1075	143,33
35000	43,541	0,046	0,150	0,100	0,300	0,149	198,67
40000	49,76115	0,070	0,250	0,140	0,380	0,21	280,00

Продолжение таблицы 16

45000	55,98129	0,66	0,62	0,19	0,55	0,505	673,33
50000	50	0,80	0,50	0,28	0,70	0,57	760,00
56600		Разрушение					

Таблица 17. Результаты испытаний призмы №1

N(кг)	$\sigma$ (кг/см <sup>2</sup> )	индикатор				$\Sigma\Delta\ell/4$ мм	$\epsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell} * 10^5$
		1	2	3	4		
0	0	0	0	0	0	0	0
5000	6,220143	0,005	0,00	0,05	0,00	0,01375	18,33
10000	12,44029	0,01	0,010	0,05	0,04	0,0275	36,67
15000	18,66043	0,04	0,03	0,030	0,06	0,04	53,33
20000	24,88057	0,06	0,040	0,05	0,090	0,06	80,00
25000	31,10072	0,08	0,05	0,070	0,11	0,08	103,33
30000	37,32086	0,08	0,07	0,10	0,14	0,0975	130,00
35000	43,541	0,10	0,09	0,12	0,16	0,1175	156,67
40000	49,76115	<u>0,11</u>	0,11	0,12	0,19	0,1325	176,6666667
45000	55,98129	0,13	0,12	0,19	0,21	0,1625	216,67
50000	62,20143	0,14	0,15	0,22	0,24	0,1875	250,00
55000	68,42158	0,16	0,18	0,25	0,26	0,2125	283,33
61250	76,19676	0,18	0,20	0,30	0,30	0,245	326,67
65000	80,86186	0,20	0,20	0,32	0,35	0,2675	356,67
68750		Разрушение					

Таблица 17. Результаты испытаний призмы №2

N(кг)	$\sigma$ (кг/см <sup>2</sup> )	индикатор				$\Sigma\Delta\ell/4$ мм	$\epsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell} * 10^5$
		1	2	3	4		
0	0	0	0	0	0	0	0
5000	6,220143	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	26,67
10000	12,44029	0,08	0,05	0,00	0,02	0,03625	48,33
15000	18,66043	0,12	0,08	0,00	0,02	0,055	73,33
20000	24,88057	0,16	0,100	0,00	0,040	0,075	100,00
25000	31,10072	0,19	0,13	0,010	0,05	0,10	126,67
30000	37,32086	0,23	0,16	0,02	0,06	0,11625	155,00
35000	43,541	0,26	0,20	0,02	0,08	0,14	186,67
40000	49,76115	<u>0,3</u>	0,21	0,03	0,1	0,16	213,3333333
45000	55,98129	0,33	0,23	0,04	0,12	0,18	240,00
50000	62,20143	0,37	0,26	0,05	0,14	0,205	273,33
55000	68,42158	0,42	0,29	0,06	0,17	0,235	313,33
61250	76,19676	0,48	0,30	0,07	0,20	0,2625	350,00
65000	80,86186	0,52	0,33	0,07	0,20	0,28	373,33
65600		Разрушение					

Рассчитываем начальный модуль упругости исходя из графика и табличных значений  $E_b = \frac{1,0738}{0,000004694} = 233276,5 \text{ Мпа}$

Исходя из результатов замера деформаций и их обработки, строится диаграмма «напряжения-деформации» представленная на рисунках 3.5:

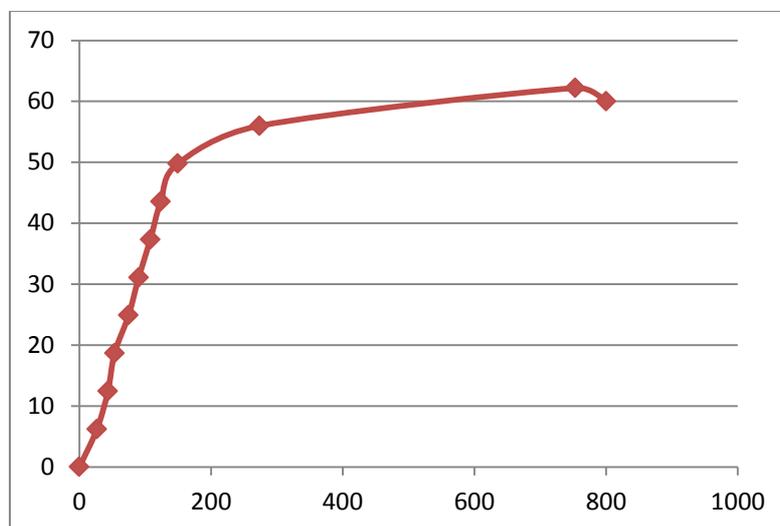


Рисунок 18 - Диаграмма напряжения бетона цилиндра №1

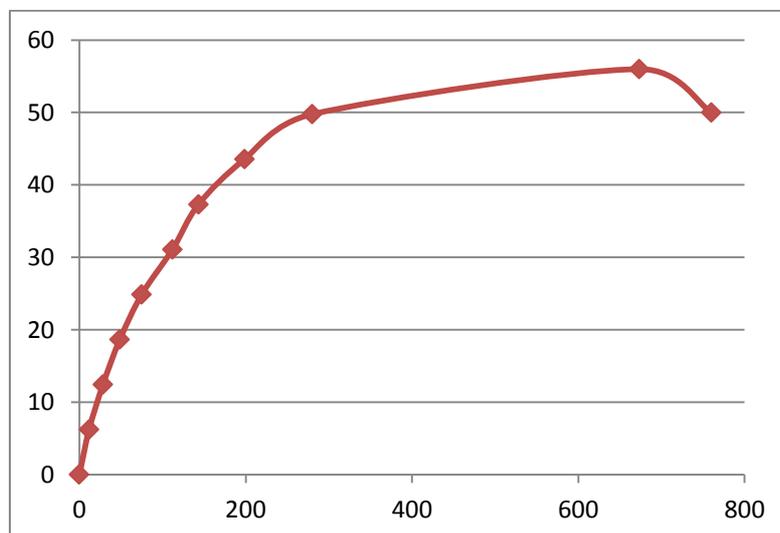


Рисунок 19 - Диаграмма напряжения бетона цилиндра №2.

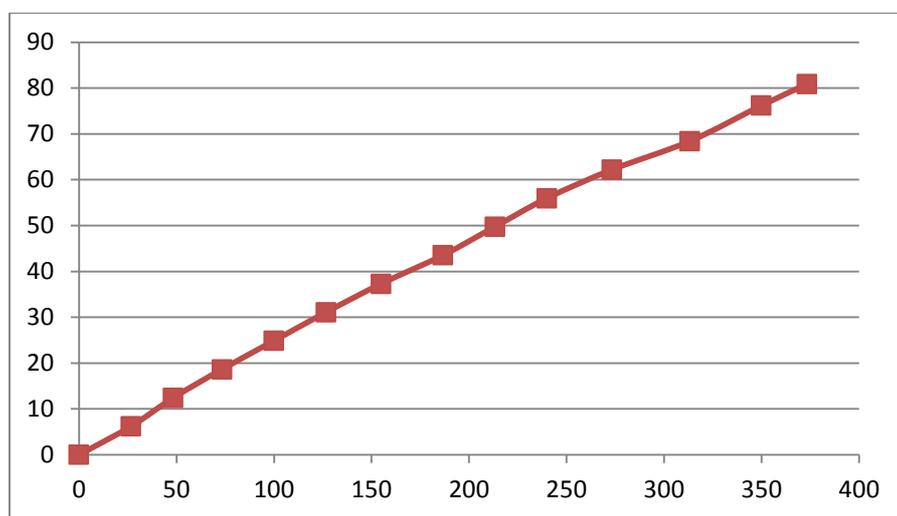


Рисунок 20 - Диаграмма напряжения бетона призмы №1

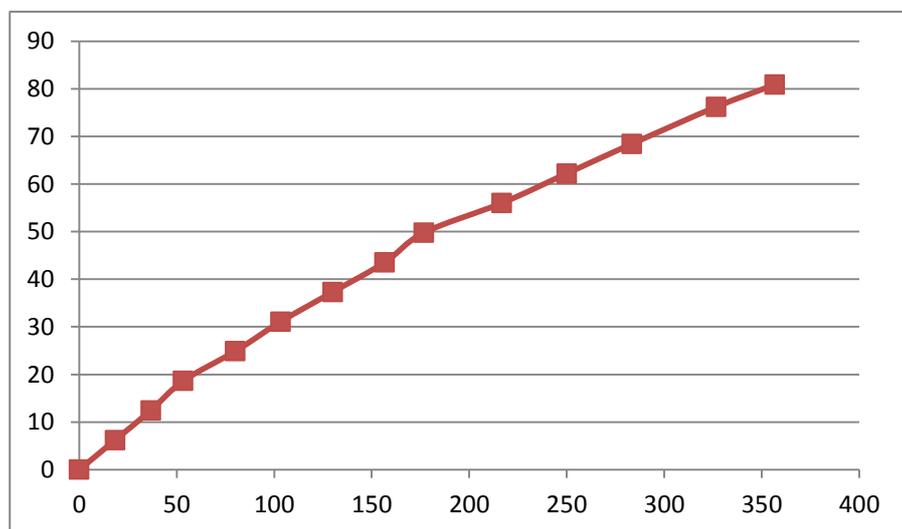


Рисунок 21 - Диаграмма напряжения бетона призмы №2

### Выводы по третьей главе

Идентичный бетон использовался для изготовления бетонных образцов класса В25. При испытании, образцы вели себя по разному и имели разные характеристики, предельные уровни напряжения и деформации, отсюда графики деформирования бетона отличаются друг от друга. В испытании с цилиндром нам удалось определить выявление нижней ветви диаграммы в опытном образце, а в испытании с призмой, при увеличении напряжений произошло разрушение образца.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной магистерской диссертации выполнены все задачи в соответствии с планом. А именно:

Произведен анализ и показано поэтапное построение диаграмм деформирования бетона применяемые в нормативных документах РФ и Европы.

Описаны нормируемые диаграммы с построением их на ЭВМ в программе Microsoft excel.

Разработаны блок-схемы и алгоритмы, согласно которым происходит построение двухлинейной, трехлинейной и криволинейных диаграмм.

Сравнение диаграмм деформирования и прочностных характеристик российских и зарубежных норм.

Произведены расчеты прочностных характеристик изгибаемых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели.

Произведены сравнения 5-ти способов расчета прочности бетона В25.

Составление программы в ЭВМ для расчета прочностных характеристик.

Изготовление опытных образцов, определены и зафиксированы результаты разрушения образцов испытанных по методу российских (СП 63.133330.2012) и зарубежных норм (СНБ 5.03.01-02). Построены диаграммы деформирования образцов в виде цилиндра и призмы.

Произвелись сравнения диаграмм бетона в одном графике с класса В10 до класса В60.

В целом как показали расчеты прочности и по деформациям, данные методики расширяют возможности применения деформационной модели и могут быть применимы при составлении более специализированных программных комплексов.

### Список используемых источников

1. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. – Минск: Минстройархитектуры, 2003.
2. СНиП 2.03.01-84\* Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: НИИЖБ Госстрой СССР, 1985. – 87 с.4
3. СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: НИИЖБ Госстрой России, 2003. - 5
4. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. – М.: ГУП НИИЖБ Госстроя России, 2004. – 186 с.6
5. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: ГУП НИИЖБ Госстроя России, 2013. – 155 с.7
6. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. - М.: Стандартинформ, 2018.
7. Акимов П.А. О развитии дискретно-континуального подхода к численному моделированию состояния несущих систем высотных зданий / П.А. Акимов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. с. 16 – 20.32
8. Бондаренко В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов/: Монография. – М.: Издательство АСВ. 2004.- 472 с.34
9. Давидюк, А.Н. Железобетон как фактор глобализации / А.Н. Давидюк, Ю.С. Волков / Технологии бетонов. – 2014 - №7 – с. 52-55. 1
10. Ерышев В.А. Методика расчета деформаций бетона при режимных нагружениях: монография / В.А. Ерышев. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. – 131 с.: пер. 2
11. Ерышев В.А. Численные методы расчета прочности железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели с использованием

- диаграмм деформирования материалов / В.А. Ерышев / Вестник НГИЭИ. – 2018 - № 6 (85) – с. 17-26.31
12. Исаков И.А. Исследование напряженно-деформированных состояний железобетонных балок на основе деформационной модели сечения / И.А. Исаков / Современные проблемы науки и образования. – 2013. - № 5 – с. 46.19
  13. Карпенко Н.И. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры / Н.И. Карпенко, Б.С. Соколов, О.В. Радайкин / Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. – 2012 - №2 (40) – с. 11-1911
  14. Карпенко Н.И. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов [Текст] / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, М.А. Сапожников // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. – М.: 1987. – С. 4-24.13
  15. Карпенко Н.И. К построению обобщенной зависимости для диаграммы деформирования бетона [Текст] / Н.И. Карпенко // Строительные конструкции. – Минск, 1983. – С. 164-173.12
  16. Карпенко Н.И. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели / Н.И. Карпенко, Б.С. Соколов, О.В. Радайкин / Известия КГАСУ. – 2013 - № 4 (26) – с. 113-120.25
  17. Карпенко Н.И. К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах / Н.И. Карпенко, О.В. Радайкин / Строительство и реконструкция. – 2010 - №3 (41) – с. 10-16.15
  18. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.9

19. Карпенко С.Н. О построении связей между приращениями напряжений и деформаций на основе различных диаграмм [Текст] / С.Н. Карпенко / Вестник гражданских инженеров. – СПбГАСУ. – 2010. – №1.14
20. Кузнецов А.А. Метод расчета стержневых железобетонных конструкций на повторные и знакопеременные нагрузки с учетом действия моментов и нормальных сил: автореф. дис. .... канд. техн. наук / А.В. Кузнецов. – 1992. – 25 с. 16
21. Майоров В.И. Исследование и аналитическое описание диаграммы работы бетона при расчете железобетонных конструкций по деформационной модели / В.И. Майоров, Рацириниву Де Руссель Ж. / Вестник РУДН. серия: Инженерные исследования. - 2000 - № 3 – с. 97-102.28
22. Никулина Ю.А. Особенности применения нелинейной и упрощенной деформационных расчетных моделей для определения прочности изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения / Ю.А. Никулина, С.И. Пирко, В.В. Кочерженко / Наука и инновации в строительстве. – 2017 – с. 82-89.26
23. Плевков В.А. Оценка прочности и трещиностойкости железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам / В.А. Плевков, А.П. Малиновский, И.В. Балдин / Вестник ТГАСУ. – 2013 - № 2 (39) – с. 144-153.23
24. Плюснин М.Г. Нелинейная деформационная модель при расчете прочности сжатых железобетонных элементов / М.Г. Плюснин, М.А. Романов, Ш.М. Гозиев / Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе. – 2018 – с. 50-54.27
25. Симбиркин В.Н. К расчету напряженно-деформированного состояния и прочности элементов железобетонных конструкций по нормальным сечениям / В.Н. Симбиркин, В.В. Матковский / Строительная механика и расчет сооружений. – 2010 - № 4 – с. 20-26.29

26. Соколов Б.С. К расчету прогибов изгибаемых железобетонных элементов с учетом совместного действия изгибающих моментов и прерывающих сил с использованием нелинейной деформационной модели / Б.С. Соколов, О.В. Радайкин / Известия КГАСУ. – 2014 - № 4 (30) – с. 165-171,24
27. Соломин В.А. Расчет прочности элемента железобетонной балки / В.А. Соломин, В.П. Хомяк / Вестник ЮУрГУ. серия: Строительство и архитектура. – 2012 - № 17 (276) – с. 4-7.22
28. Старчоус И.В. Расчет изгибаемых железобетонных элементов по прочности нормальных сечений с использованием деформационной модели / И.В. Старчоус, В.М. Бурцев / Дальний восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2016 - № 1 – с. 449-452.20
29. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования. ФАУ «ФЦС». Москва – 2017. – 197 с.17
30. Суворов А.А. Расчет прочности наклонных сечений железобетонных элементов по методике нелинейной деформационной модели / А.А. Суворов, В.Б. Филатов / Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. – 2018 – с. 88-93.21
31. Тошин, Д.С. Нелинейный расчет деформаций изгибаемых железобетонных элементов при разгрузке с применением деформационной модели :дис....канд. техн. наук / Д.С. Тошин. – Тольятти. – 2009. – 130 с.3
32. Тошин Д.С. Прикладные возможности деформационной модели железобетона / Д.С. Тошин / Молодой ученый. – 2016 - № 29 (133) – с. 164-166.30
33. Травуш В.И. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений / В.И. Травуш, В.И. Колчунов, Н.В. Ключева // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. с. 4 -11.33

34. Федоров В.С. Прогибы железобетонных конструкций в предельном состоянии / В.С. Федоров, М.В. Шавыкина, Е.В. Юсупова // Строительство и реконструкция. 2017. № 4 (72), с. 80 – 85.35
35. Шапиро Д.М. Деформационный нелинейный расчет внецентренно сжатых железобетонных конструкций / Д.М. Шапиро, А.А. Тарасов / Научный журнал строительства и архитектуры. – 2018 - № 1 (49) – с. 109-120.18
36. Aktaukenova G.S., Calculation of nonelastic reinforced concrete constructions / G.S Aktaukenova, R.T. Turebayeva // <http://repository.enu.kz/handle/123456789/5146>.
37. Amer F. Izzet, Effect of cooling mode on serviceability of partially prestressed concrete beams exposed to fire flame / Amer F. Izzet // Journal of Engineering Science and Technology Vol 13, No 6 (2018), Pp 1735 – 1750.
38. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings.8
39. Opbul E., Practical calculation of flexible members with the use of non-linear deformation model as exemplified by typical girder RGD 4.56-90 / E. Opbul, D. Dmitriev, Phan Van Phuc // Architecture and Engineering Vol 3, No 3 (2018), Pp. 29-41.
40. Rybnov E. On the durability of reinforced concrete structures / Rybnov E., Sanzharovsky R., Beilin D.// Scientific Israel – technological advantages. Vol 13, No 4 (2011), Pp. 111-121.
41. Travush V.I., Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete / Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S.// Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 1. Pp. 90–100.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Фрагменты испытания опытных образцов



Рисунок А1 – Фрагмент разрушения цилиндра №1



Рисунок А2 – Фрагмент разрушения призмы №1

Продолжение приложения А



Рисунок А3 – опытный образец в виде цилиндра

Приложение 6 (квадратная)

№ в.к.	Дата	Класс (марка) бетона в соответствии с инструкцией	Давление в тоннах			Нагрузка в тоннах		
			испытательного	испытательного	испытательного	факт., в.к.	стабильность	разрыв
1	6	11	12	13	14			
0		6,5	10	10	3			
5		4	2	0	0			
10		8	5	0	7			
15		12	8	0	2			
20		16	10	0	4			
25		19	13	1	5			
30		23	16	1,5	6			
35		26	20	2	8			
40		30	21	3	10			
45		33	23	4	12			
50		37	26	5	14			
55		42	29	6	17			
61,25		48	30	7	20			
65		52	33	7	20			
65,6		Погибшие						

Рисунок А4 – Журнал испытания образца



Продолжение приложения А



Рисунок А5 – Образцы до начала проведенных испытаний

Продолжение приложения А



Рисунок А6 – Образцы после проведенных испытаний

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Диаграммы деформирования бетона

#### Бетон класса В10

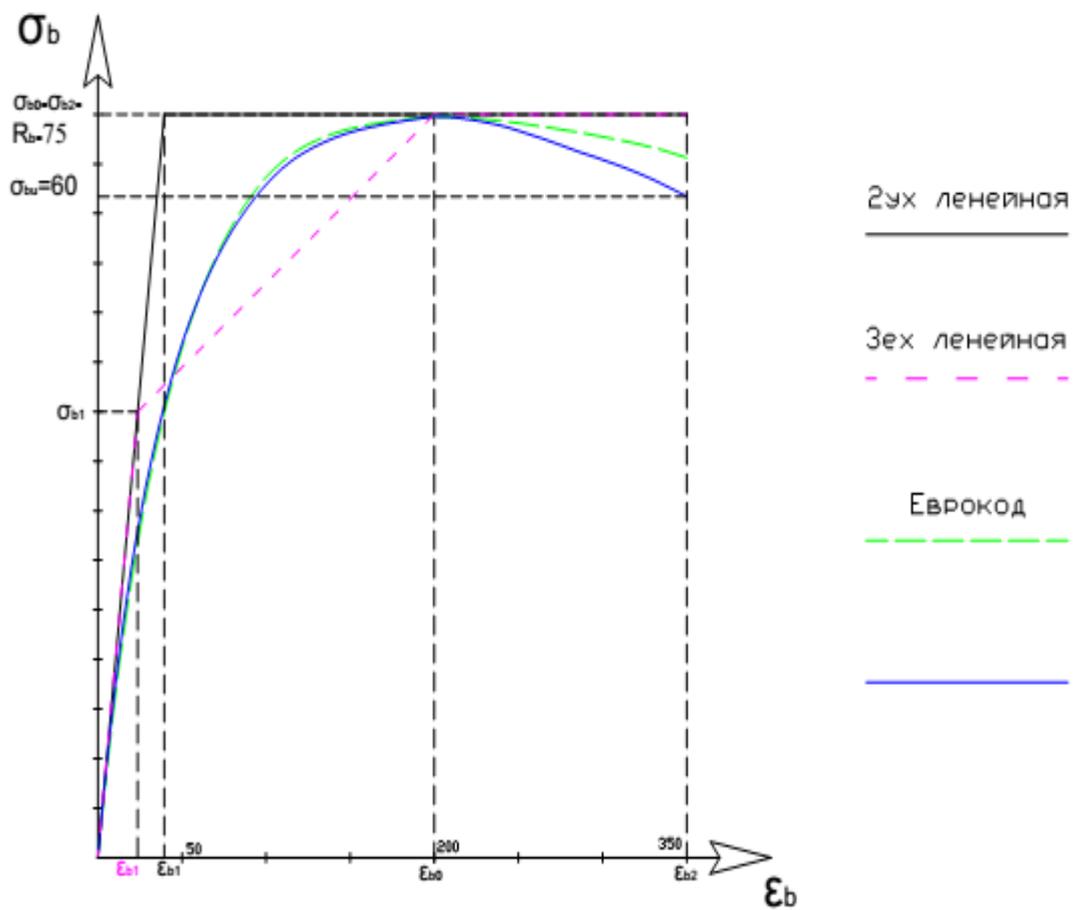


Рисунок Б.1 – Класс В10, диаграммы деформирования бетона

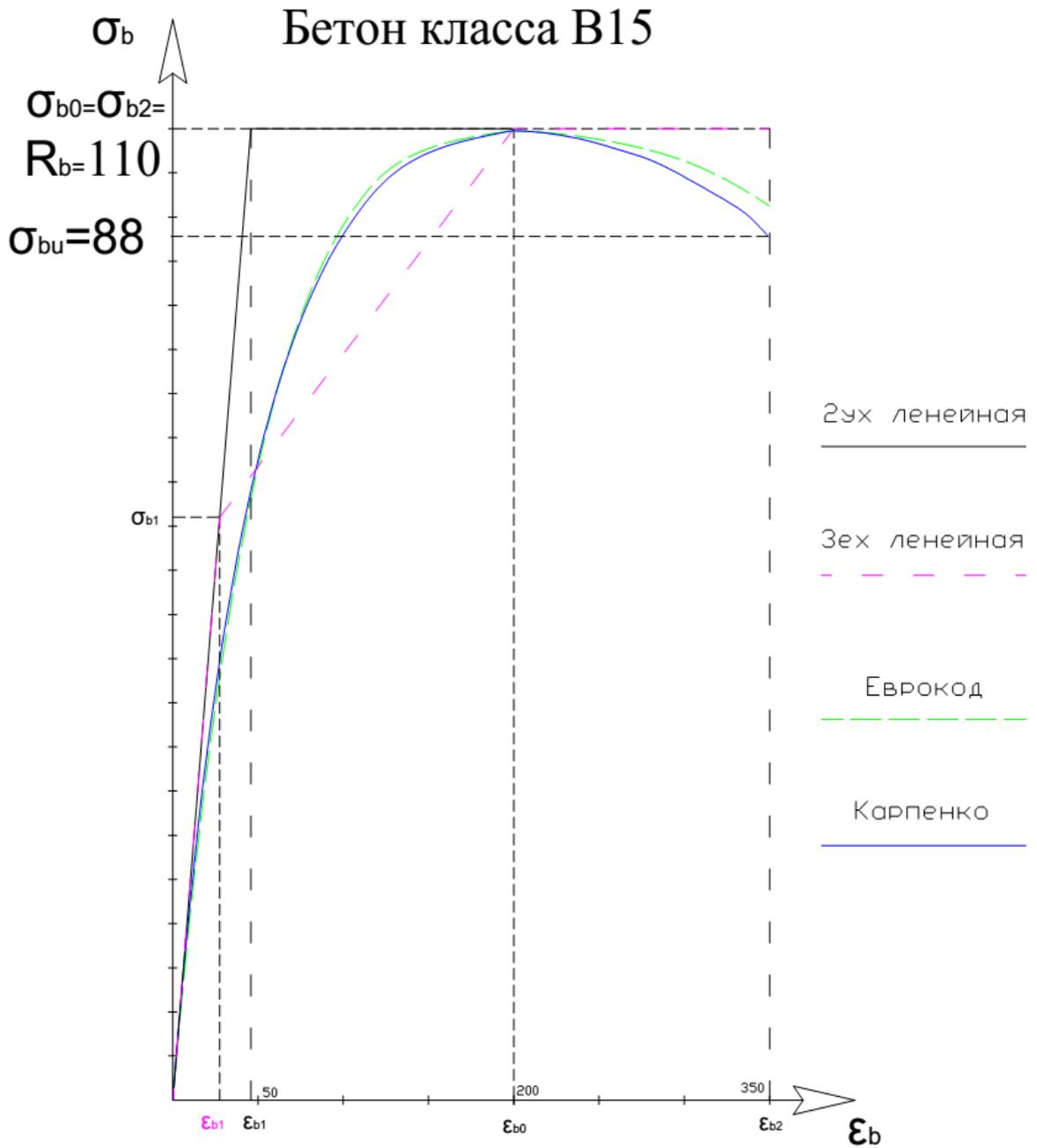


Рисунок Б.2 – Класс В15, диаграммы деформирования бетона

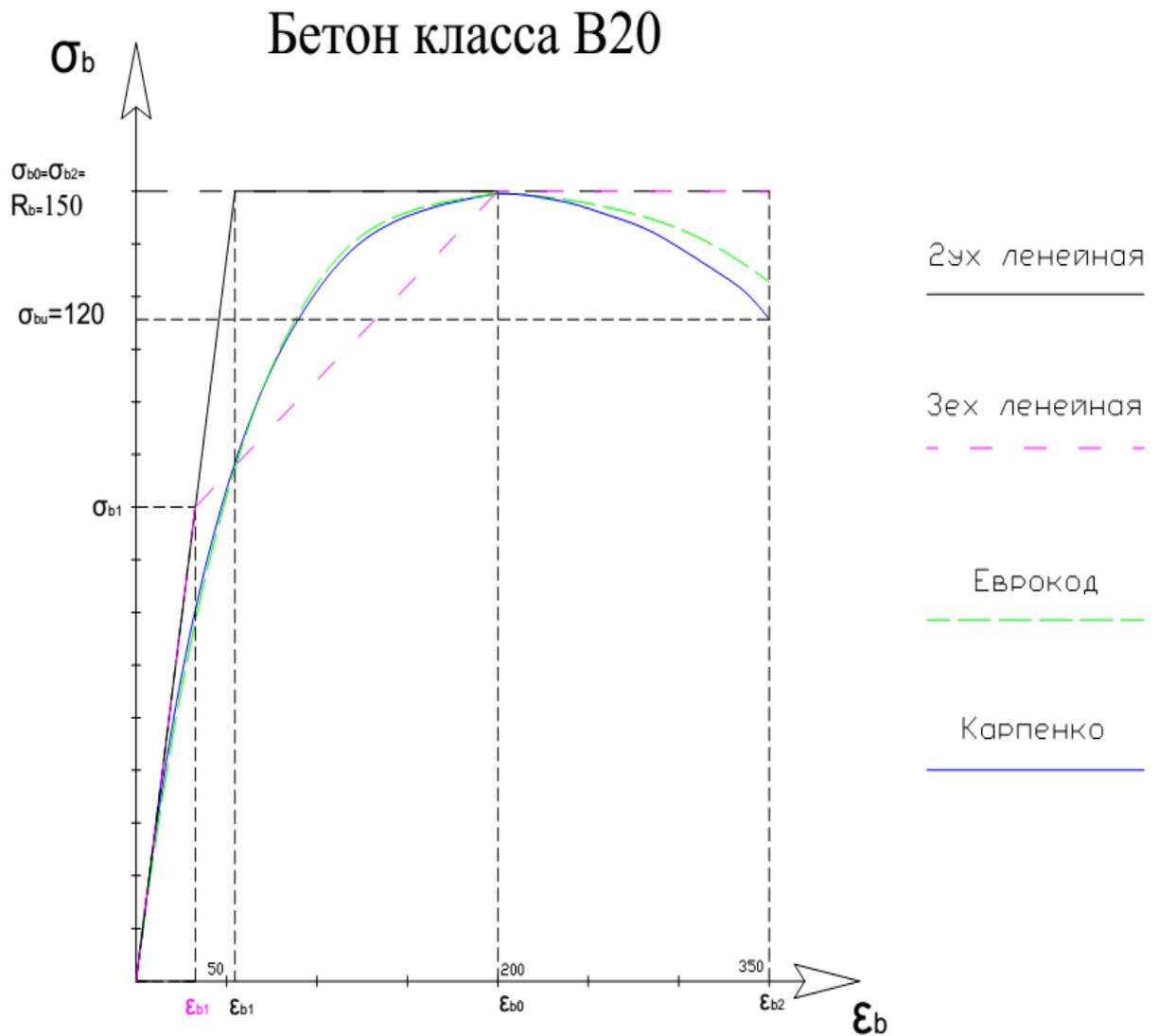


Рисунок Б.3 – Класс В20, диаграммы деформирования бетона

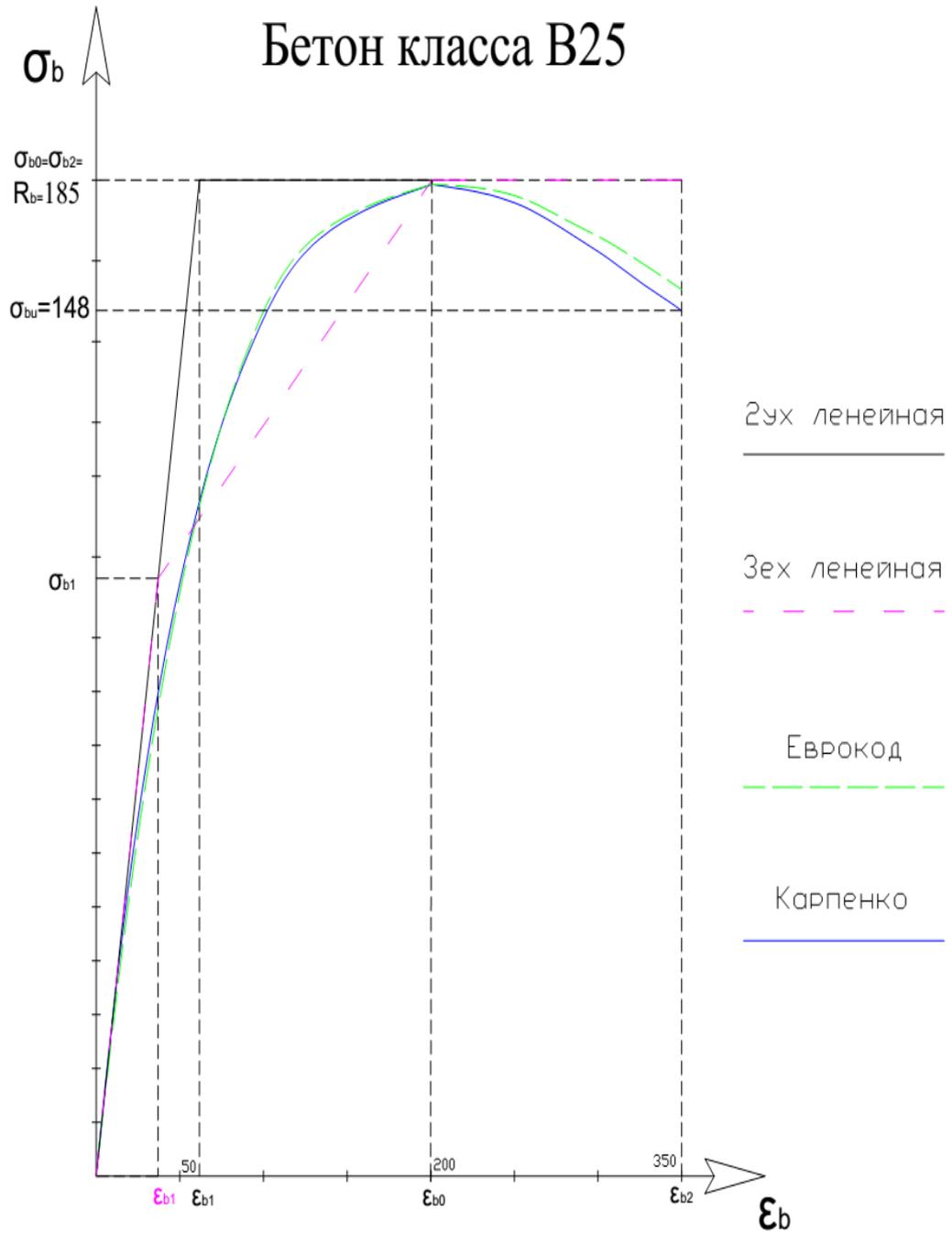


Рисунок Б.4 – Класс В25, диаграммы деформирования бетона

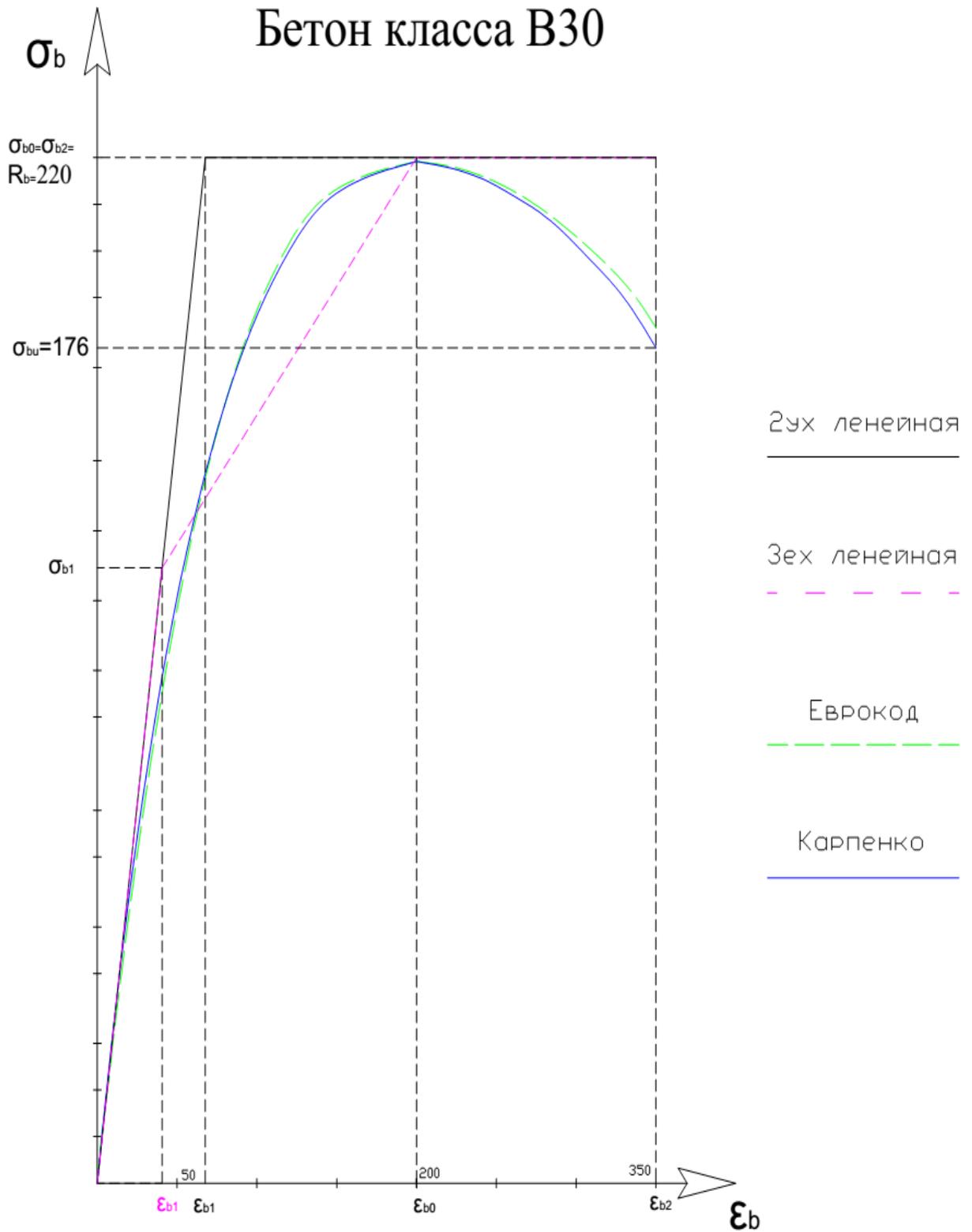


Рисунок Б.5 – Класс В30, диаграммы деформирования бетона

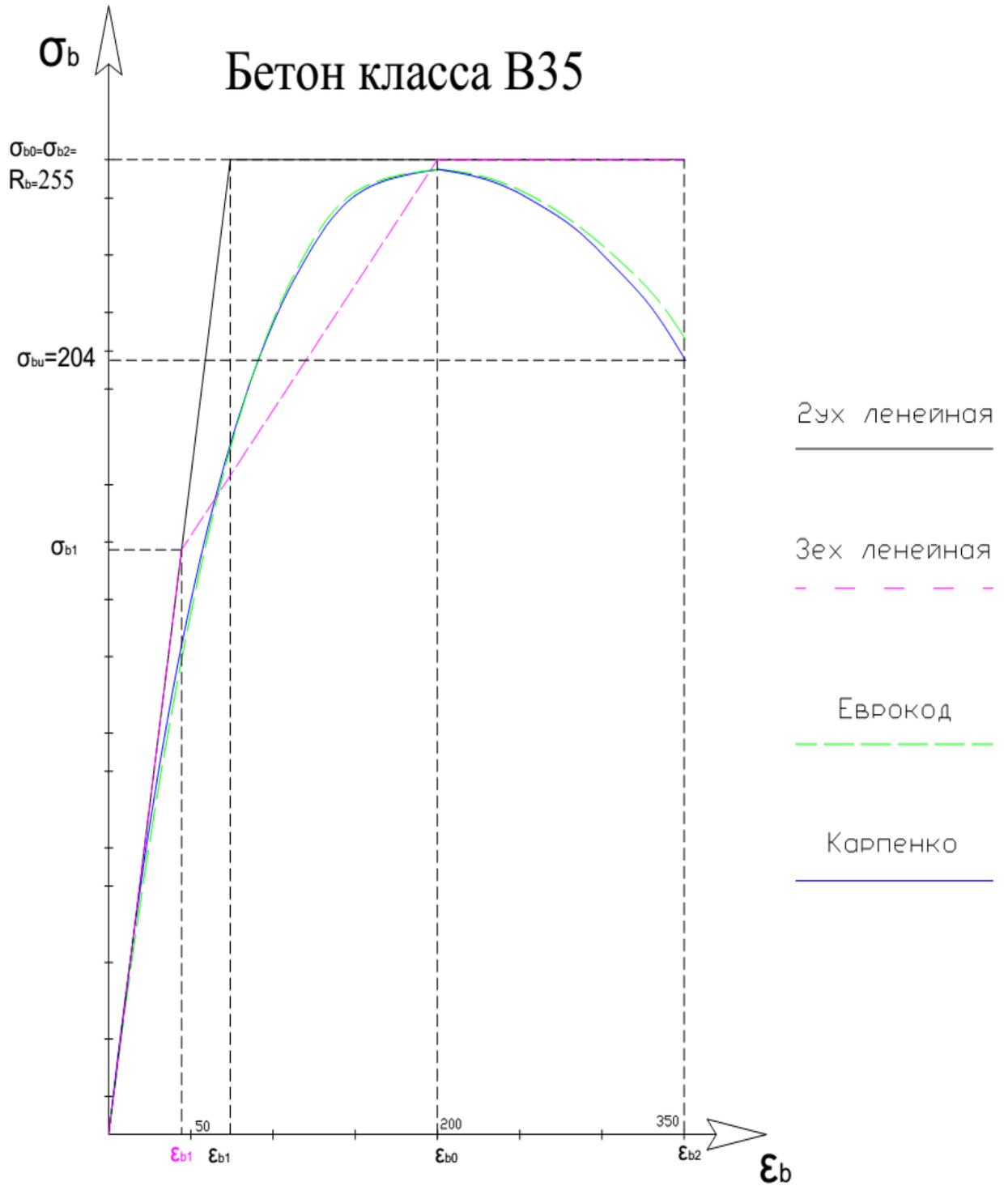


Рисунок Б.6 – Класс В35, диаграммы деформирования бетона

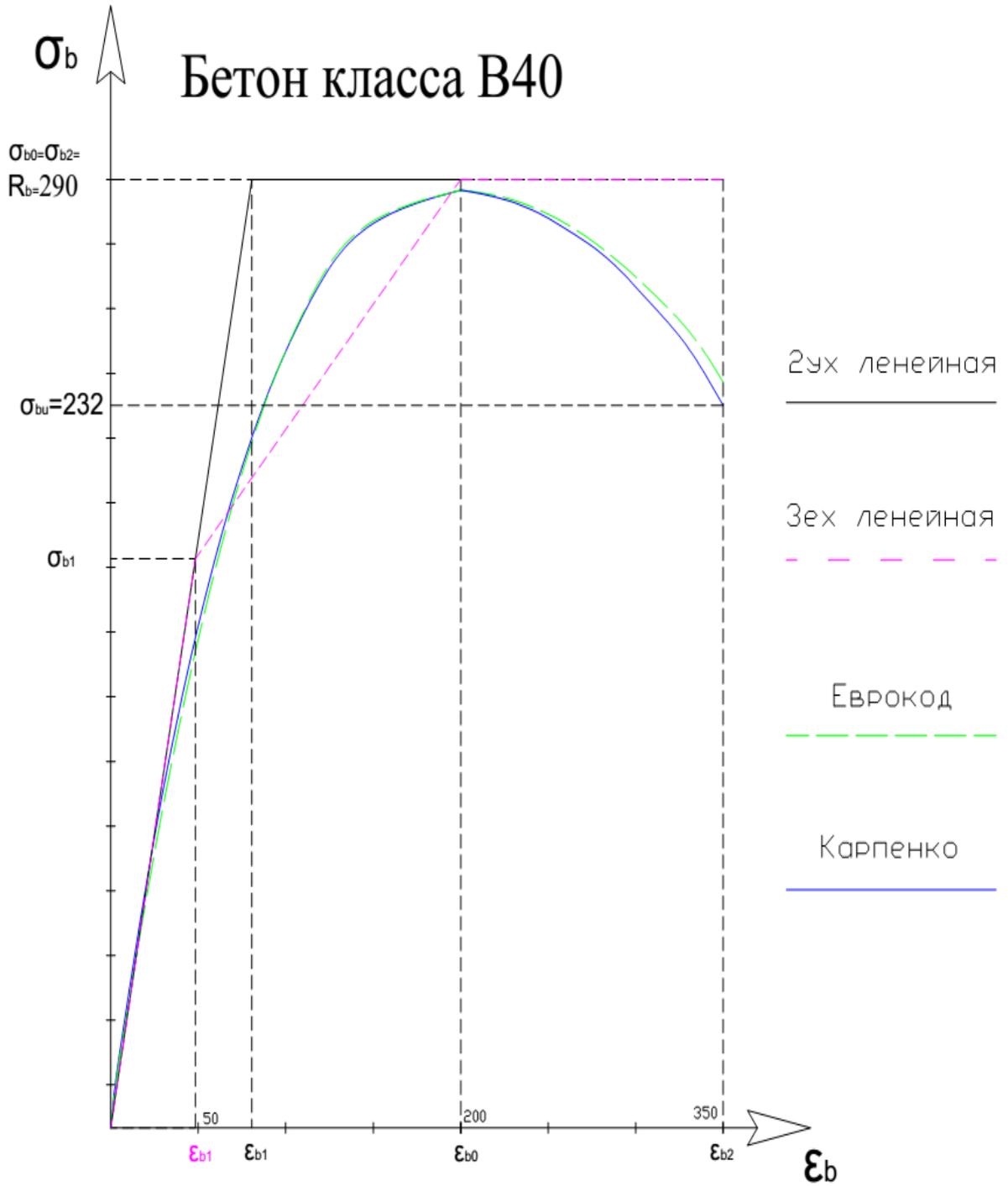


Рисунок Б.7 – Класс В40, диаграммы деформирования бетона

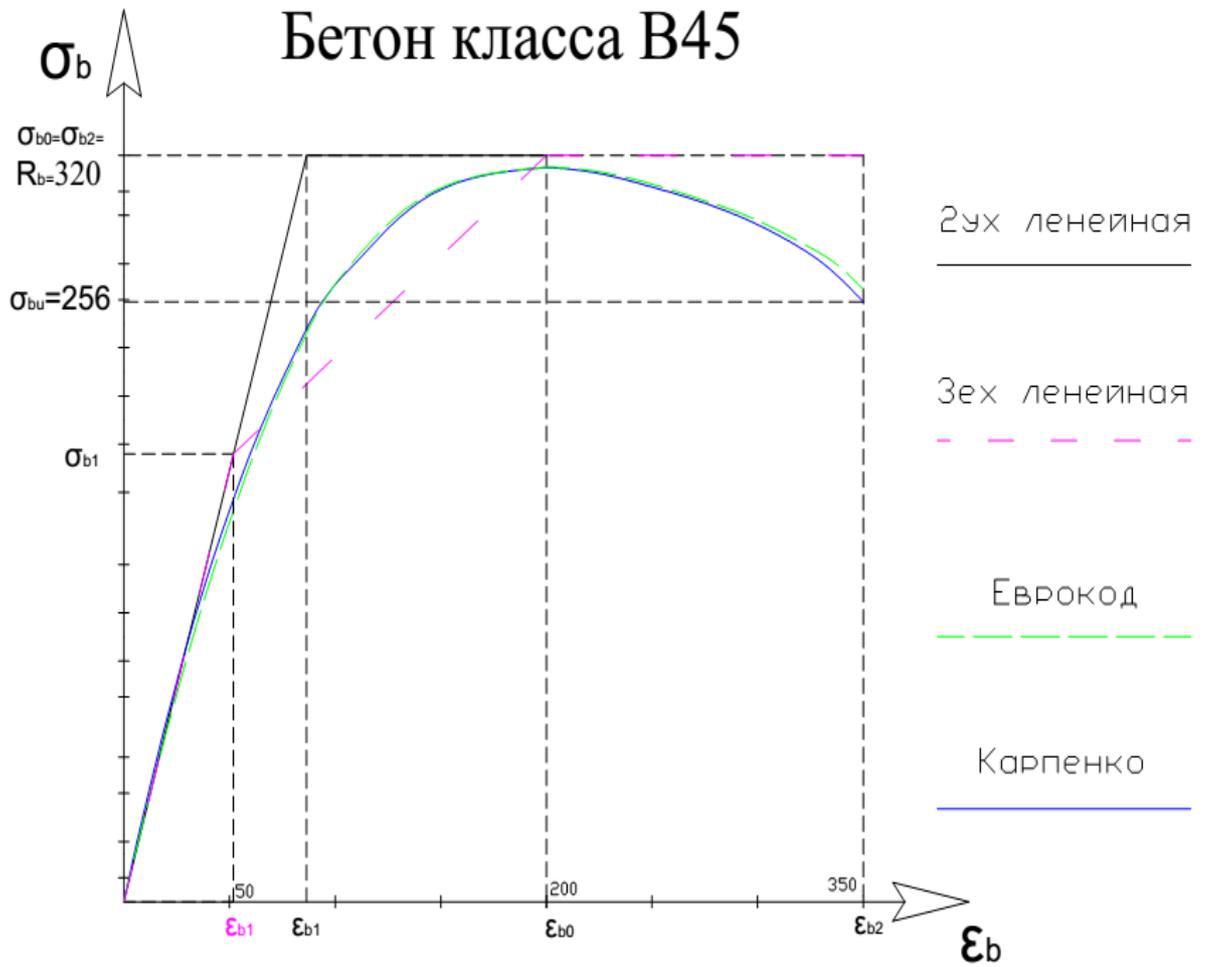


Рисунок Б.8 – Класс В45, диаграммы деформирования бетона

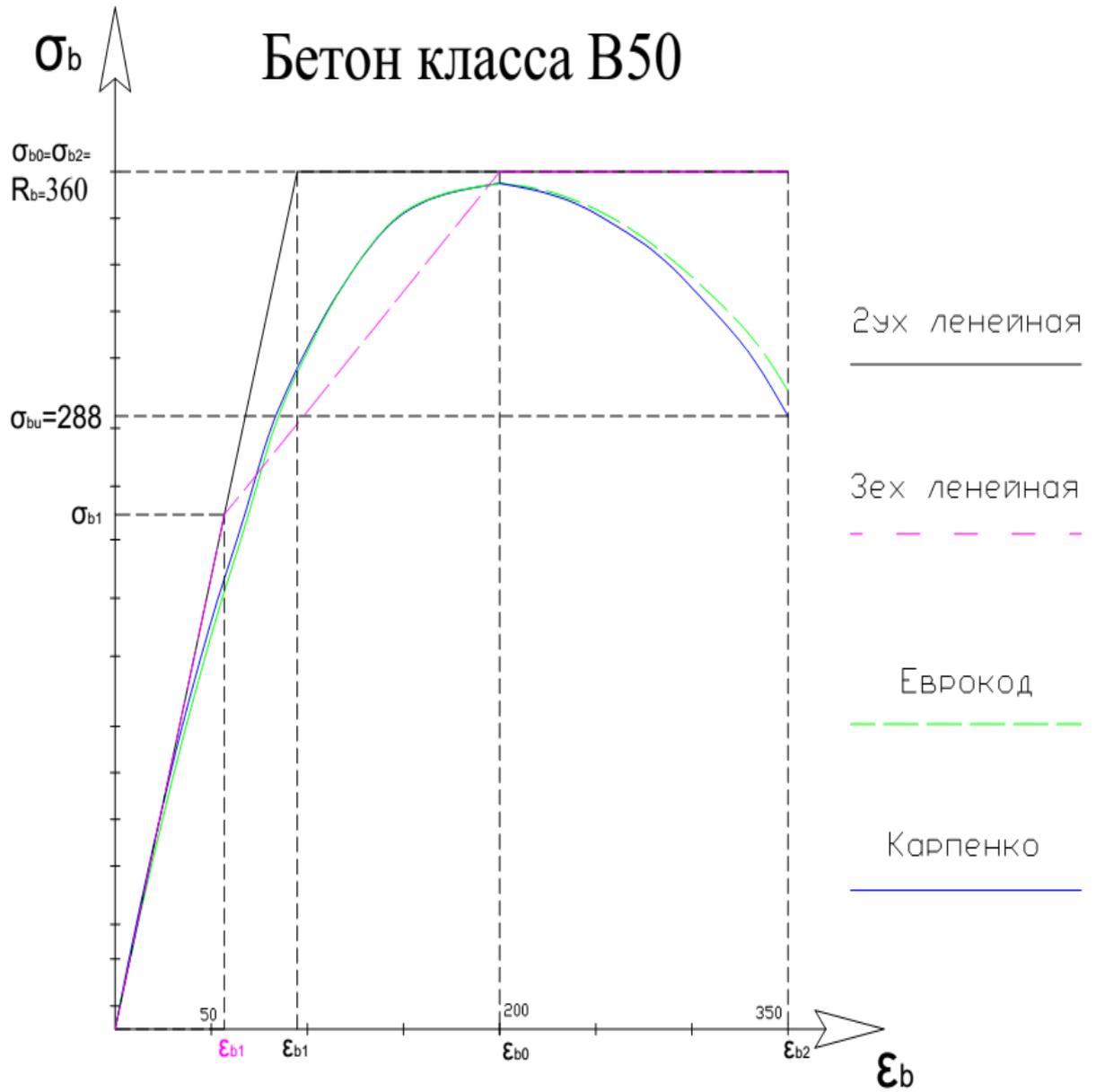


Рисунок Б.9 – Класс В50, диаграммы деформирования бетона

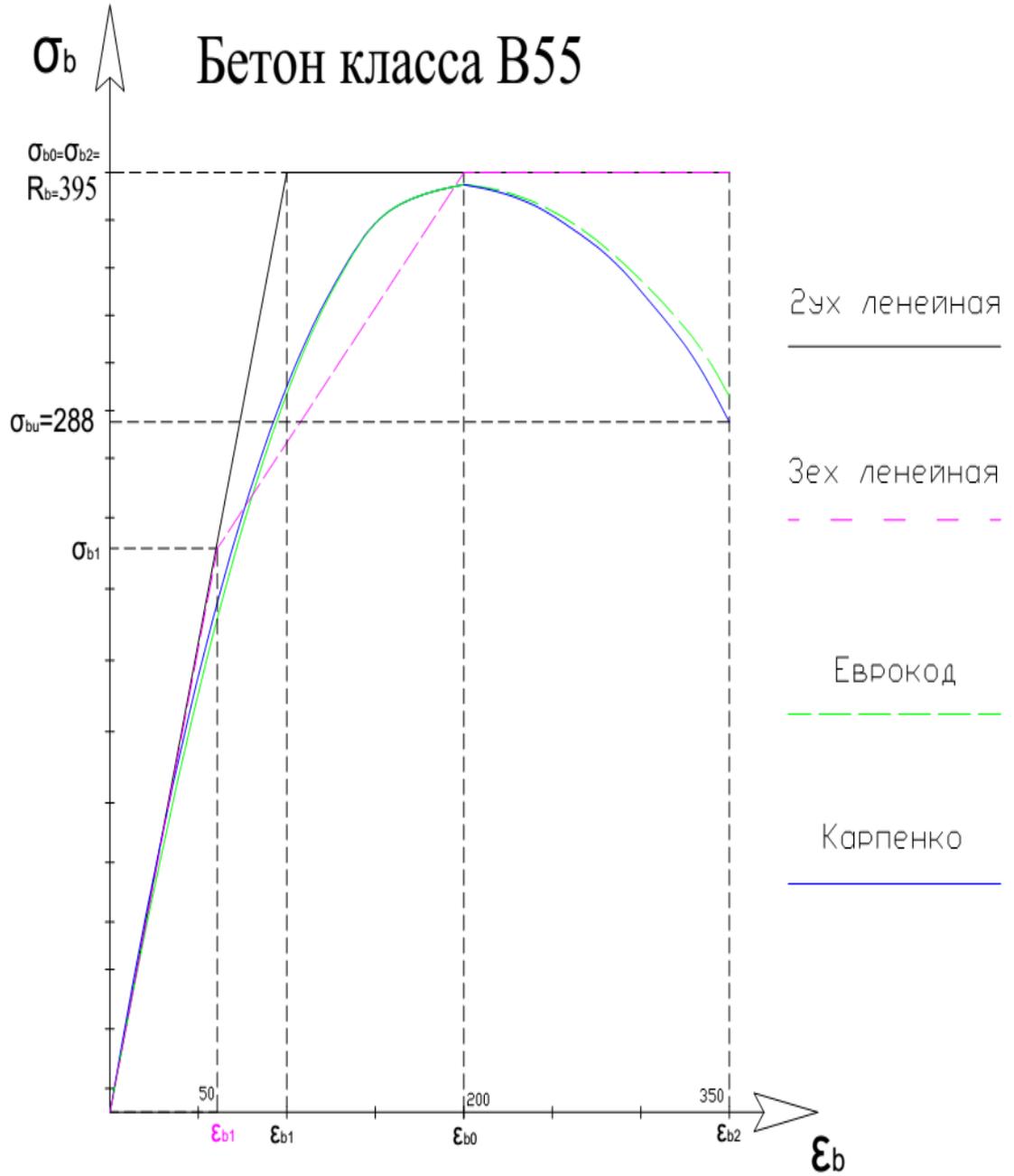


Рисунок Б.10 – Класс В55, диаграммы деформирования бетона

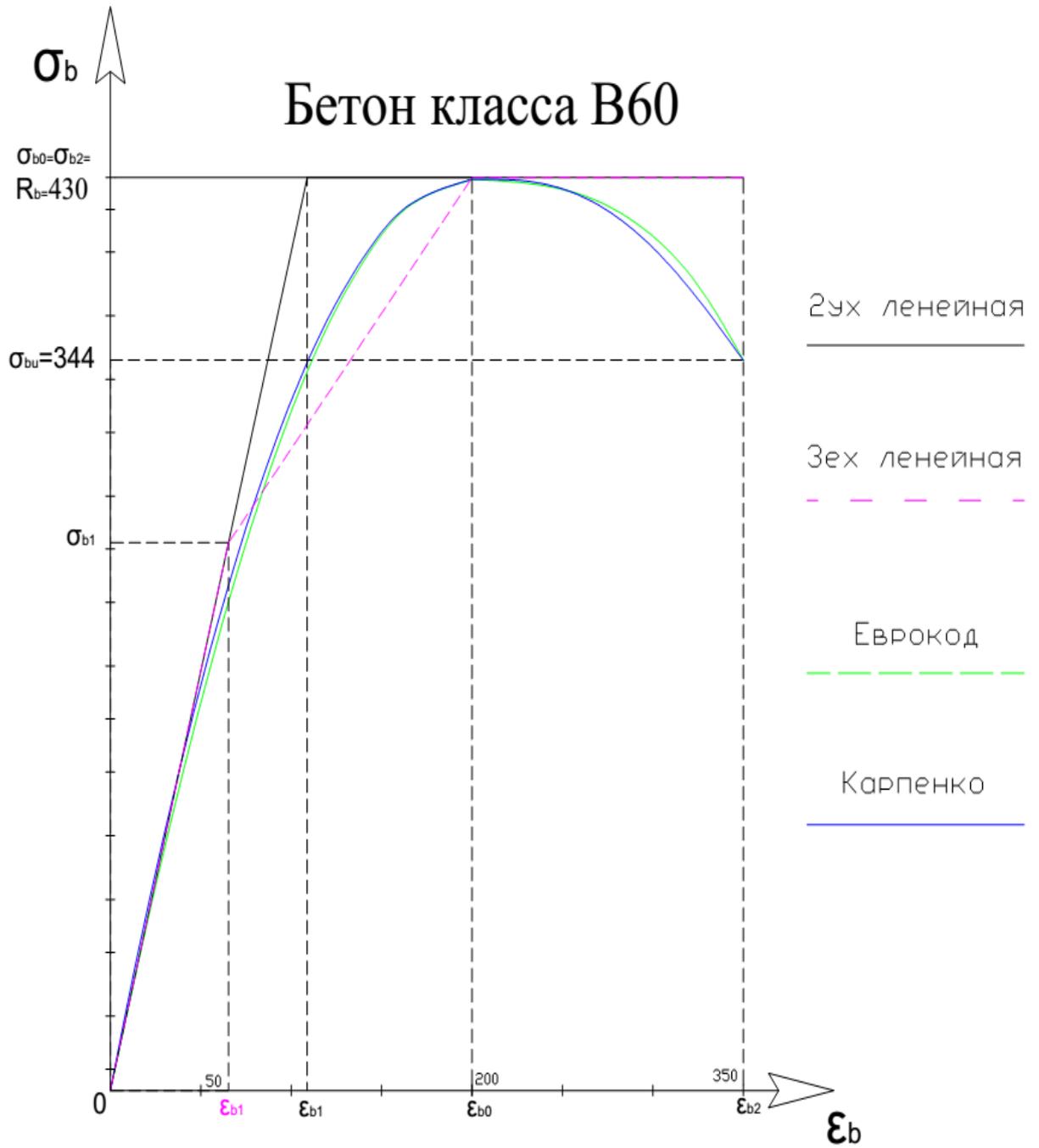


Рисунок Б.11 – Класс В60, диаграммы деформирования бетона

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Расчет прочности изгибаемого элемента

Таблица В.1 Расчет прочности изгибаемого элемента по СП 63.13330.2012

№	$\epsilon_j = \epsilon_i - \epsilon_l/2$	nd'	A	B	C	$\nu_B$	$\Sigma$	Сигма в	Nbd	S	$\epsilon_{bs}$
1	0,000101	0,05	0,056651	0,017678	0,029849	0,898479	0,00	27,2286	0,005501	0,000001	0,000101
2	0,000303	0,15	0,051998	-0,00173	0,029849	0,741169	0,00	67,38387	0,013614	0,000004	0,000303
3	0,000505	0,25	0,042694	-0,02114	0,029849	0,624417	0,00	94,61545	0,019116	0,000010	0,000505
4	0,000707	0,35	0,028737	-0,04055	0,029849	0,533971	0,00	113,2749	0,022885	0,000016	0,000707
5	0,000909	0,45	0,010127	-0,05997	0,029849	0,461753	0,00	125,9417	0,025445	0,000023	0,000909
6	0,001111	0,55	-0,01313	-0,07938	0,029849	0,402898	0,00	134,3091	0,027135	0,000030	0,001111
7	0,001313	0,65	-0,04105	-0,09879	0,029849	0,354313	0,00	139,5881	0,028202	0,000037	0,001313
8	0,001515	0,75	-0,07361	-0,1182	0,029849	0,313894	0,00	142,6897	0,028828	0,000044	0,001515
9	0,001717	0,85	-0,11083	-0,13761	0,029849	0,280097	0,00	144,3028	0,029154	0,000050	0,001717
10	0,001919	0,95	-0,1527	-0,15702	0,029849	0,251711	0,00	144,9348	0,029282	0,000056	0,001919
11	0,002121	1,05	0,103946	0,022177	0,000336	0,227545	0,00	144,8121	0,029257	0,000062	0,002121
12	0,002323	1,15	0,113267	0,021681	0,000336	0,205816	0,00	143,4582	0,028984	0,000067	0,002323
13	0,002525	1,25	0,123436	0,021185	0,000336	0,186233	0,00	141,096	0,028506	0,000072	0,002525
14	0,002727	1,35	0,134452	0,020689	0,000336	0,168681	0,00	138,022	0,027885	0,000076	0,002727
15	0,00293	1,45	0,146316	0,020193	0,000336	0,153008	0,00	134,4717	0,013583987	3,98E-05	0,00293
16	0,003132	1,55	0,159027	0,019697	0,000336	0,139046	0,00	130,6282	0,013195725	4,13E-05	0,003132
17	0,003334	1,65	0,172586	0,019202	0,000336	0,126622	0,00	126,6308	0,012791922	4,26E-05	0,003334
18	0,003401	1,683536	0,177323	0,019035	0,000336	0,12277	0,00	125,2748	0,012654943	4,3E-05	0,003401
								$\Sigma =$	0,396021	0,000715	0,001806

Продолжение приложения В

$N_{\text{б}} n/n$	$\varepsilon_b$	$\varepsilon_s$	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	$\varepsilon_s'$	$A, \text{кг}$	$B, \text{кг}$	$C, \text{кг}$	$\Sigma, \text{кг}$	
	0,00350	0,01366	0,000986	3,55	0,00153	4819,16	3090,84	7910,00	0,00000	
	$N_{b,d}=\Sigma\Delta\varepsilon_i\bar{\sigma}_i$	$S_{b,d}$	$z_b, \text{см}$	$z_s', \text{см}$	$z_s, \text{см}$	$N_b b z_b$	$\bar{\sigma}_s A_s z_s$	$\bar{\sigma}'_s A'_s z'_s$	$Mult$	$f$
	0,396021	0,000715	1,83	1,55	13,85	8823,897	109540,3	10731,5	129095,7509	кг*см 4,10
									12,91	кН*м 41,05

Таблица В.2. Расчет прочности изгибаемого элемента по СНБ 5.03.01-02

$N_{\text{б}} n/n$	$\varepsilon_b$	$\varepsilon_s$	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	$\varepsilon_s'$	$A, \text{кг}$	$B, \text{кг}$	$C, \text{кг}$	$\Sigma, \text{кг}$	
1	0,00350	0,0100	0,000776	4,51	0,00195	6727,08	3935,52	7910,00	2752,60	
2	0,00345	0,0100	0,000773	4,46	0,00190	6752,09	3846,13	7910,00	2688,21	
3	0,00340	0,0100	0,000770	4,41	0,00186	6777,28	3756,74	7910,00	2624,02	
4	0,00335	0,0100	0,000767	4,37	0,00182	6802,66	3667,34	7910,00	2560,01	
5	0,00330	0,0100	0,000764	4,32	0,00177	6828,24	3577,95	7910,00	2496,19	
6	0,00325	0,0100	0,000761	4,27	0,00173	6854,00	3488,56	7910,00	2432,57	
7	0,00320	0,0100	0,000759	4,22	0,00168	6879,97	3399,17	7910,00	2369,14	
8	0,00315	0,0100	0,000756	4,17	0,00164	6906,13	3309,78	7910,00	2305,91	
9	0,00273	0,0100	0,000731	3,73	0,00126	5357,03	2552,97	7910,00	0,0000	
	$N_{b,d}=\Sigma\Delta\varepsilon_i\bar{\sigma}_i$	$S_{b,d}$	$z_b, \text{см}$	$z_s', \text{см}$	$z_s, \text{см}$	$N_b b z_b$	$\bar{\sigma}_s A_s z_s$	$\bar{\sigma}'_s A'_s z'_s$	$Mult$	
	0,326519	0,000508	2,13	1,73	13,67	11394,43	108146	4411,384	123951,8112	кг*см
									12,40	кН*м

Продолжение приложения В

Таблица В.3. Расчет прочности изгибаемого элемента по двух линейной диаграмме деформирования

$N_{\sigma}$	$\varepsilon_{b,max}$	$\varepsilon_{s,max}$	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	$\varepsilon_s'$	$A, \text{кг}$	$B, \text{кг}$	$C, \text{кг}$	$\Sigma, \text{кг}$
1	0,00350	0,0250	0,001638	2,14	0,00022	2921,37	452,76	7910,00	-4535,87
2	0,00350	0,0245	0,001609	2,18	0,00028	2973,54	568,85	7910,00	-4367,61
3	0,00350	0,0240	0,001580	2,21	0,00034	3027,60	684,94	7910,00	-4197,46
4	0,00350	0,0235	0,001552	2,26	0,00040	3083,67	801,03	7910,00	-4025,30
5	0,00350	0,0230	0,001523	2,30	0,00045	3141,85	917,13	7910,00	-3851,02
6	0,00350	0,0225	0,001494	2,34	0,00051	3202,27	1033,22	7910,00	-3674,51
7	0,00350	0,0220	0,001466	2,39	0,00057	3265,06	1149,31	7910,00	-3495,63
8	0,00350	0,0210	0,001408	2,49	0,00068	3398,33	1381,49	7910,00	-3130,18
9	0,00350	0,0200	0,001351	2,59	0,00080	3542,94	1613,68	7910,00	-2753,39
10	0,00350	0,0137	0,000989	3,54	0,00152	4836,76	3073,24	7910,00	0,00000
$N_{b,d}=\Sigma A\varepsilon_{bi}\sigma_{bi}$		$S_{b,d}$	$z_b, \text{см}$	$z_s', \text{см}$	$z_s, \text{см}$	$N_b b z_b$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	$Mult$
0,398750		0,000833	2,11	1,54	13,86	10219,3	109649,5	4726,215	124595,03

Продолжение приложения В

Таблица В.4. Расчет прочности изгибаемого элемента по трёхлинейной диаграмме деформирования

$N_0$	$\varepsilon_{b,max}$	$\varepsilon_{s,max}$	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	$\varepsilon_s'$	$A, \text{кГ}$	$B, \text{кГ}$	$C, \text{кГ}$	$\Sigma, \text{кГ}$
1	0,00350	0,0250	0,001638	2,14	0,00022	3129,49	452,76	7910,0	-4327,75
2	0,00350	0,0239	0,001575	2,22	0,00035	3255,13	708,16	7910,0	-3946,71
3	0,00350	0,0228	0,001511	2,32	0,00048	3391,28	963,56	7910,0	-3555,16
4	0,00350	0,0217	0,001448	2,42	0,00060	3539,31	1218,9	7910,0	-3151,73
5	0,00350	0,0206	0,001385	2,53	0,00073	3700,85	1474,3	7910,0	-2734,78
6	0,00350	0,0195	0,001322	2,65	0,00086	3877,85	1729,7	7910,0	-2302,38
7	0,00350	0,0184	0,001259	2,78	0,00098	4072,63	1985,1	7910,0	-1852,20
8	0,00350	0,0173	0,001195	2,93	0,00111	4288,01	2240,5	7910,0	-1381,42
9	0,00350	0,0162	0,001132	3,09	0,00124	4527,44	2495,9	7910,0	-886,58
10	0,00350	0,0144	0,001027	3,41	0,00145	4990,01	2919,9	7910,0	0,00000
$N_{b,d} = \Sigma \Delta \varepsilon_{bi} \sigma_{bi}$	$S_{b,d}$	$z_b, \text{см}$	$z_s', \text{см}$	$z_s, \text{см}$	$N_b b z_b$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	$M_{ult}$	
0,427158	0,0008	1,92	1,41	13,99	9563,41	110683	4109,1	124355,4	