

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 Расчет нормальных сечений железобетонных стержневых
элементов на основе нелинейной деформационной модели

Студент

А.О. Жемчуев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

д.т.н., доцент, В.А. Ерышев

руководитель

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Диаграммы материалов. Аналитическое описание диаграмм.....	8
1.1 Основные положения деформационного метода расчета бетона и железобетона	8
1.2 Диаграммы деформирования бетона при нагрузке.....	9
1.2.1 Двух- и трехлинейные диаграммы по СП 63.13330.2012	9
1.2.2 Криволинейные диаграммы по СП 63.13330.2012.....	12
1.2.3 Криволинейные диаграммы по СНБ 5.03.01-02	15
1.3 Диаграммы деформирования бетона при нагрузке с новыми интегральными параметрами.....	17
1.3.1 Криволинейные диаграммы по СП 63.13330.2012.....	18
1.3.2 Криволинейные диаграммы по СНБ 5.03.01-02	19
1.4 Описание диаграмм деформирования бетона на ЭВМ.....	20
1.4.1 Описание диаграмм по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-2.....	20
1.4.2 Описание диаграмм с новыми интегральными параметрами	24
Глава 2 Расчет прочности железобетонных изгибаемых элементов по нелинейной деформационной модели	28
2.1 Методика расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели	29
2.2 Методика расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов по методу предельных усилий	36
2.3 Примеры расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели по СП 63.13330.2012, СНБ 5.03.01-02 и методу предельных усилий	37
2.3.1 Расчет с применением двухлинейной диаграммы по СП 63.13330.2012.....	37
2.3.2 Расчет с применением трехлинейной диаграммы по СП 63.13330.2012.....	41
2.3.3 Расчет с применением криволинейной диаграммы по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02	45
2.3.4 Расчет по криволинейным диаграммам по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02 с новыми интегральными параметрами	53
2.3.5 Расчет по методу предельных усилий	60

Глава 3 Расчет прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели	62
3.1 Методика расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели.....	62
3.2 Методика расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов по методу предельных усилий	68
3.3 Примеры расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели по СП 63.13330.2012, СНБ 5.03.01-02 и методу предельных усилий	69
3.3.1 Расчет с применением двухлинейной диаграммы по СП 63.13330.2012.....	69
3.3.2 Расчет с применением трехлинейной диаграммы по СП 63.13330.2012.....	73
3.3.3 Расчет с применением криволинейной диаграммы по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02	76
3.3.4 Расчет по методу предельных усилий	84
Глава 4 Расчет деформаций изгибаемых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели	87
4.1 Методика расчета деформаций до образования трещин с определением M_{cr}	87
4.2 Примеры расчета деформаций до образования трещин	92
4.3 Методика расчета деформаций после образования трещин с определением M_{cr}	96
4.4 Примеры расчета деформаций после образования трещин.....	102
4.5 Расчет момента образования трещин M_{cr} по СП 63.13330.2012	106
4.6 Примеры расчета момента образования трещин M_{cr} по СП 63.13330.2012.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	114
ПРИЛОЖЕНИЕ А	
Графики изменения прогиба от момента M	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	
Сравнение расчетных и опытных данных деформаций.....	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Железобетон является одним из самых распространенных материалов для возведения несущих конструкций зданий и сооружений. Сегодня 80 % зданий и сооружений в стране строится с использованием монолитного бетона. Построенные здания и объекты инфраструктуры составляют более 60 % накопленных основных фондов РФ. Не менее 2/3 этих фондов приходится на здания и сооружения из бетона и железобетона, построенные во второй половине 20 века [1].

При нагружении конструкций используют различные прочностные характеристики материалов – бетона, арматуры путем осевого растяжения или сжатия. Существуют различные типы НДС стержневых железобетонных элементов.

Согласно стандартам Российской Федерации, расчет железобетонных элементов может выполняться традиционными методами [2,3] (метод предельных усилий) или с использованием деформационной модели. Расчетами по деформационной модели занимались Бабич Е.М., Бегенева Г.В., Беккер В.Л., Гордеева Т.Ф., Ерышев В.А., Карпенко Н.И., Кузнецов А.В., Маилян Л.Р., Мурашкин Г.В., Радайкин О.В., Соколов Б.С., Тошин Д.С. [4,5,6,7,8-12,13,15,16,17]. Деформационная модель позволяет рассчитывать железобетонные конструкции по двум группам предельных состояний с одинаковых позиций, что нашло применение в различных программах по расчету конструкций. Деформационная модель берется за основу во многих нормативных документах, в основе которой заложены диаграммы деформирования арматуры и бетона. В соответствии с СП [3] расчет по деформационной модели может выполняться на основе диаграмм: двух-, трехлинейных и криволинейных. Результаты расчетов по 2х-, и 3х- линейным диаграммам показывают расхождения результатов между собой, что оказывает влияние на итоговые результаты расчета железобетонных элементов. Деформационная модель позволяет – оценить конструкционную безопасность и эксплуатационную пригодность на всех этапах работы

конструкции по мере увеличения нагрузки от нуля до разрушения. Исходя из этого разработка и совершенствование методов расчета прочности конструкций по деформационной модели, является актуальной тематикой в настоящее время.

Цель исследований – проведение расчетов прочности изгибаемых железобетонных элементов, описание алгоритма расчета внецентренно сжатых железобетонных элементов на основе деформационной модели и методу предельных усилий, и сравнение полученных данных. Описание алгоритма расчета изгибаемых железобетонных элементов по деформациям и сравнение их с опытными данными.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследование нормированных диаграмм и их описание на ЭВМ;
2. Расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов по деформационной модели;
3. Описание алгоритма расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов по деформационной модели и описание программы на ЭВМ, выполнение расчета на ЭВМ;
4. Описание алгоритма расчета деформаций изгибаемых железобетонных элементов с построением программы для ЭВМ, выполнение расчета на ЭВМ;
5. Сравнить полученные данные в расчетах прочности с данными по СП, сравнить теоретические и опытные данные полученных деформаций стержневых железобетонных элементов.

Предметом исследования - магистерской диссертации являются методы расчета прочности и деформативности по нелинейной деформационной модели и действующим нормативным документам.

Объект исследования - магистерской диссертации стержневые железобетонные элементы.

Методы исследования – теоретические методы исследования в сопоставлении с опытными данными.

Научная новизна диссертационной работы, заключается в следующем:

- Произведено сравнение расчетов прочности изгибаемых железобетонных элементов по деформационной модели и методу предельных усилий;

- Получен алгоритм расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов по деформационной модели. Произведено сравнение расчетов с методом предельных усилий, алгоритм расчета описан на ЭВМ с выполнением расчетов;

- Получен алгоритм расчета по деформациям изгибаемых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели, алгоритм расчета описан на ЭВМ с выполнением расчетов, упрощен метод расчета (переход от итерационного процесса к энергетической модели);

- Произведено сравнение полученных расчетных данных деформаций с расчетами по СП и с опытными данными.

Практическая значимость состоит в том, что полученные методы расчета прочности и по деформациям могут быть применены при выполнении расчетов стержневых железобетонных элементов наравне с методиками по нормативным документам, так как дают близкие значения. В целом как показали расчеты прочности и по деформациям, данные методики расширяют возможности применения деформационной модели и могут быть применимы при составлении специализированных программных комплексов.

Апробация результатов исследования. Результаты работы докладывались и обсуждались:

- Ерышев В.А. Расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов по деформационной модели / Ерышев В.А., Жемчуев А.О. // Интернаука: электронный научный журнал 2018. № 46(80) – с. 8 – 10;

- Жемчуев А.О. Расчет прочности железобетонных элементов на внецентренное сжатие по деформационной модели.: Студенческие дни науки

в ТГУ, Тольятти, 2019: материалы научно – практической конференции: Тольяттинский государственный университет, с. 37-39;

- 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;

- Ерышев В.А. Интегральные параметры диаграмм бетона в расчетах прочности железобетонных элементов по деформационной модели / Ерышев В.А., Карпенко Н.И., Жемчуев А.О. // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – 2020. - № 16(1). – с. 25-37;

- Ерышев В.А., Жемчуев А.О. Методика расчета деформаций железобетонных изгибаемых элементов по нелинейной деформационной модели // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. XXV-XXVI междунар. науч.-практ. конф. № 3-4(20). – Новосибирск: СибАК, 2020. – С. 75-87.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 122 страницах и состоит из введения, 4-х глав, заключения, библиографического списка из 35 отечественных источников и 13 источников на иностранном языке. Включает в себя 37 рисунков, 67 таблиц.

Глава 1 Диаграммы материалов. Аналитическое описание диаграмм

1.1 Основные положения деформационного метода расчета бетона и железобетона

Расчет железобетона по деформационной модели с применением диаграмм деформирования арматуры и бетона в настоящее время приобрел статус актуального, так как дает возможность высоко оценить прочностные и деформационные свойства [19,20]. Помимо деформационного метода расчета в области проектирования и конструирования долгое время удачно используется методика расчета по методу предельных усилий [10]. Деформационный метод расчета прочности железобетона производят на основе диаграмм деформирования растяжения арматуры, осевого сжатия бетона и гипотезы плоских сечений. Связь между деформациями и напряжениями в диаграммах устанавливается по результатам испытаний стандартных образцов бетона (призм, цилиндров) нагрузкой при сжатии, арматуры при растяжении. Стандарты Российской Федерации и зарубежных стран предлагают в качестве расчетных, диаграммы деформирования арматуры, бетона и взаимосвязь между напряжениями и относительными деформациями, разные виды диаграмм (2-х, 3-х линейные, криволинейные), соответствующие механическим свойствам материалов.

Методика расчета основывается к разделению элемента по высоте сечения на простые участки и, применяя аналитические зависимости между деформациями и напряжениями в диаграммах материалов, последовательно для каждого участка вычисляют средние значения напряжений [21,10]. Переход от напряжений к суммарным внутренним усилиям определяют с помощью численного интегрирования напряжений по толщине сечения элемента и после проверки условия равновесия в физических соотношениях определяют внутренние усилия, значения которых не может быть больше

усилий от внешних воздействий [19,20,22]. Нелинейная задача определяется методом последовательных приближений (итераций) или в приращениях [23] до выполнения условия равновесия усилий в сечении с заданной точностью по кривизне элемента, после чего вычисляются фактические деформации бетона и арматуры от внешней нагрузки. Прочность сечения обеспечивается, если максимальные относительные деформации от внешней нагрузки не превышают нормируемых значений предельных относительных деформации бетона на сжатие и арматуры на растяжение. Если величина деформаций больше максимальных значений, то элемент бетона или арматуры выключаются из работы и условие прочности не удовлетворяется.

В практике проектирования выполняются поверочные расчеты, когда при заданных параметрах сечения необходимо определить значения предельных усилий. 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.

1.2 Диаграммы деформирования бетона при нагрузке

В качестве нормированных диаграмм при расчете железобетонных конструкций используют двух-, трехлинейные и криволинейные диаграммы деформирования материалов.

1.2.1 Двух- и трехлинейные диаграммы по СП 63.13330.2012

По СП 63.13330.2012, в качестве диаграмм состояния для различных видов бетонов, демонстрирующих взаимосвязь между деформациями и напряжениями, используют простые 2х линейную в соответствии с рисунком 1 и 3х линейную диаграммы в соответствии с рисунком 2 по типу диаграмм Прандтля.

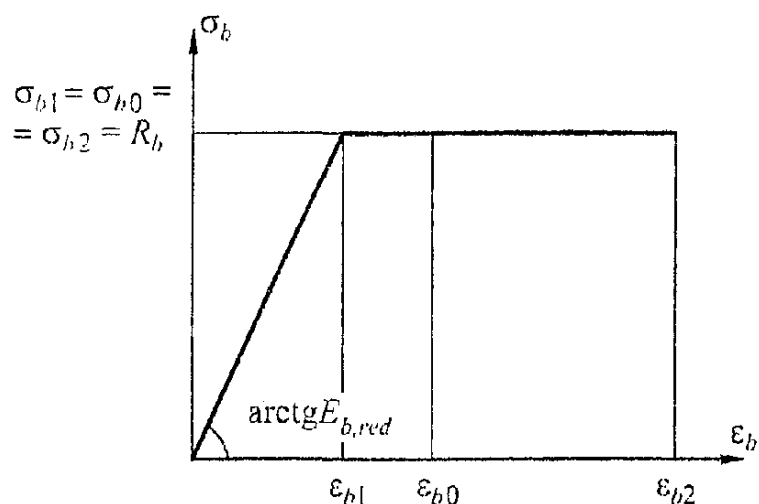


Рисунок 1 – Двухлинейная диаграмма состояния сжатого бетона

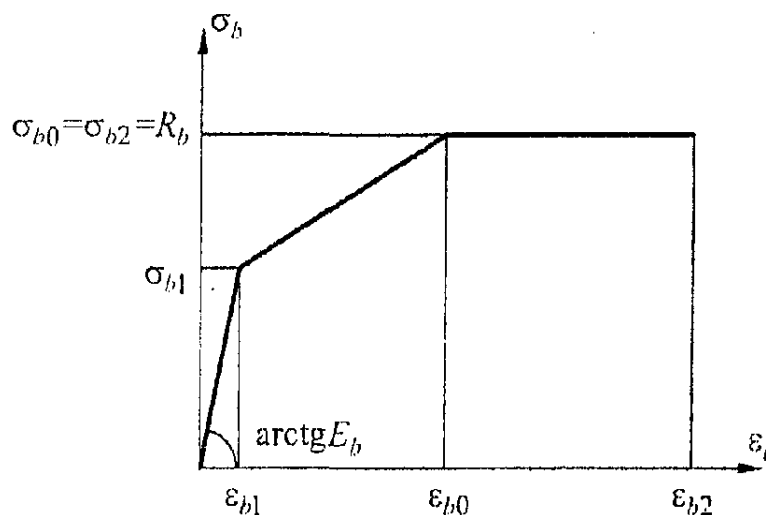


Рисунок 2 – Трехлинейная диаграмма состояния сжатого бетона

При 2х линейной диаграмме в соответствии с рисунком 1 сжимающие напряжения бетона σ_b в зависимости от относительных деформаций ε_b определяют по формулам:

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

где

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

$$\sigma_b = E_{b,red} \cdot \varepsilon_b \tag{1}$$

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

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

Значения приведенного модуля деформации бетона $E_{b,red}$ принимают:

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

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 3х линейной диаграмме в соответствии с рисунком 2 сжимающие напряжения бетона σ_b в зависимости от относительных деформаций укорочения бетона ε_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 $\varepsilon_{b0} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$

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

Значения напряжений σ_{b1} принимают

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

а значения относительных деформаций ε_{b1} принимают

$$\varepsilon_{b1} = \frac{\sigma_{b1}}{E_b} \quad (7)$$

Значения относительных деформаций ε_{b2} 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 ε_{b2} принимается по линейному закону от 0,0033 при В70 до 0,0028 при В100;

1.2.2 Криволинейные диаграммы по СП 63.13330.2012

Зависимость в криволинейных диаграммах деформирования бетона принимают в виде:

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m \cdot \nu_m} d\varepsilon_m = \frac{d\sigma_m}{E_m \cdot \nu_m^k} \quad (8)$$

где ε_m - относительные деформации;

σ_m - напряжения;

E_m - начальный модуль упругости;

d - знак дифференциала;

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

ν_m - коэффициент изменения секущего модуля, определяемый по формуле (9).

$$v_m = \bar{v}_m \pm \left(v_0 - \bar{v}_m \right) \cdot \sqrt{1 - \omega_1 \cdot \eta - \omega_2 \cdot \eta^2} \quad (9)$$

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

v_0 - начальный коэффициент изменения секущего модуля (в начале диаграммы или в начале ее криволинейного отрезка);

ω_1 ω_2 - коэффициенты, характеризующие полноту диаграммы материала, $\omega_2=1-\omega_1$;

η - уровень приращения напряжений, который определяется по формуле (10).

$$\eta = \frac{(\sigma_m - \sigma_{m,el})}{\left(\bar{\sigma}_m - \bar{\sigma}_{m,el} \right)} \quad (10)$$

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

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

v_m^k - коэффициент изменения касательного модуля, связанный с коэффициентом изменения секущего модуля соотношением.

$$\frac{I}{v_m^k} = \frac{I}{v_m} \pm \frac{\sigma_m \left(v_0 - \bar{v}_m \right) \cdot (\omega_1 + 2\omega_2\eta)}{2v_m^2 \left(\bar{\sigma}_m - \bar{\sigma}_{m,el} \right) \sqrt{1 - \omega_1\eta - \omega_2\eta^2}} \quad (11)$$

В формулах (9) и (11) знак + используют для диаграммы деформирования арматуры и для восходящей ветви диаграммы деформирования бетона, а знак - для спадающей ветви диаграммы деформирования бетона. Спадающую 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 в соответствии с рисунком 3 описывается зависимостями (8) - (11), в которых следует принимать:

для обеих ветвей диаграммы

$$\bar{\sigma}_b = -R_{b,ser}; \sigma_{b,el} = 0; \bar{\nu}_b = \frac{\bar{\sigma}}{\left(\bar{\varepsilon}_b \cdot E_b\right)}; \eta = \frac{\sigma_b}{\bar{\sigma}_b}, \quad (12)$$

для восходящей ветви

$$\nu_0 = 1; \omega_l = 2 - 2,5\bar{\nu}_b, \quad (13)$$

для спадающей ветви

$$\nu_0 = 2,05\bar{\nu}_b; \omega_l = 1,95\bar{\nu}_b - 0,138 \quad (14)$$

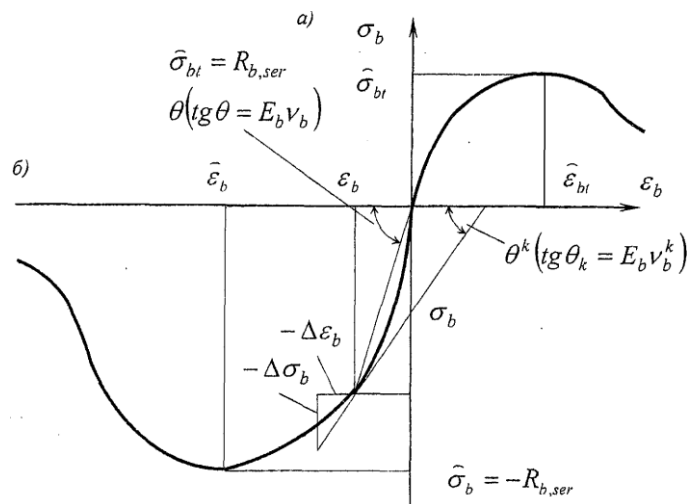


Рисунок 3 – Криволинейная диаграммы деформирования бетона, а) растяжение, б) сжатие

Значение деформаций в вершине диаграммы при осевом сжатия бетона определяют по формуле (15).

$$\varepsilon_b = -\frac{B}{E_b} \cdot \lambda \cdot \frac{1 + 0,75 \cdot \lambda \cdot \frac{B}{60} + 0,2 \cdot \frac{\lambda}{B}}{0,12 + \frac{B}{60} + \frac{0,2}{B}} \quad (15)$$

где В - класс бетона по прочности на сжатие;

λ - безразмерный коэффициент, зависящий от вида бетона и принимаемый равным:

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

для легкого бетона средней плотности D (кг/м³); $\lambda= D/2400$;

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

1.2.3 Криволинейные диаграммы по СНБ 5.03.01-02

Для общих показателей механических свойств бетона при одноосном напряженном состоянии следует использовать диаграмму состояния (деформирования) бетона, определяющую взаимосвязь между напряжениями σ_c и продольными деформациями ε_c бетона подверженного сжатию при не длительном действии однократно приложенной нагрузки вплоть до достижения максимальных значений, отвечающих разрушению бетона при однородном напряженном состоянии.

В общем случае диаграмма деформирования (состояния) бетона при осевом не длительном сжатии имеет криволинейное очертание со спадающей ветвью, в соответствии с рисунком 4.

Для построения полной диаграммы деформирования бетона в условиях осевого не длительного сжатия при выполнении нелинейных расчетов железобетонных элементов, возможно, применять следующую аналитическую зависимость (16).

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \quad (16)$$

где f_{cm} - прочность бетона на осевое сжатие, установленная для проектирования конструкций, принимаемая по таблице 6.1СНБ 5.03.01-02;

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

где ε_{cl} - относительная деформация, соответствующая пиковой точке диаграммы деформирования, значение которой следует принимать по таблице 6.1СНБ.

$$k = \frac{1,1 \cdot E_{cm,n} \cdot |\varepsilon_{cl}|}{f_{cm}} \quad (17)$$

где $E_{cm,n}$ - модуль упругости бетона для нелинейных расчетов конструкций, ГПа, определяемый по формуле (18).

$$E_{cm,n} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (18)$$

Зависимость (16) применима в интервале относительных деформаций $0 \leq |\varepsilon_{cl}| \leq |\varepsilon_{cul}|$,

где ε_{cul} - значение предельных относительных деформаций бетона при сжатии, принимаемое по таблице 6.1 СНБ.

При расчете сечений по предельным состояниям первой группы допускается принимать упрощенные диаграммы состояния для бетона (параболически-линейную, состоящую из отдельных прямолинейных участков, и т. д.), эквивалентные базовой диаграмме.

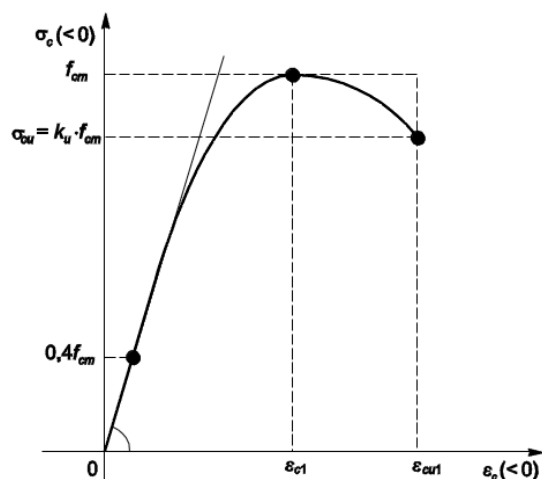


Рисунок 4 – Диаграмма деформирования (состояния) бетона при осевом кратковременном сжатии

При построении нормативных диаграмм деформирования в качестве основной следует принимать базовую точку в вершине диаграммы с напряжениями, равными нормативным значениям сопротивления бетона осевому сжатию f_{ck} .

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 :

Предельные значения относительных деформаций бетона ε_{cu1} , принимаемые в расчетах, не должны превышать значений, приведенных в таблице 6.1 СНБ.

1.3 Диаграммы деформирования бетона при нагрузке с новыми интегральными параметрами

При построении диаграмм по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02 [1,5] по известным зависимостям, полученные значения их деформаций в вершине диаграммы и на спадающей ветви, а также соответствующие им значения напряжений значительно отличаются, что впоследствии влияет на результаты расчетов по деформационной модели. На основании этого Ерышевым В.А.

были выведены новые зависимости, которые значительно уравнивают очертания диаграмм и краевые значения деформаций-напряжений. Соответственно расчеты по этим диаграммам получаются значительно ближе между собой.

1.3.1 Криволинейные диаграммы по СП 63.13330.2012

Аналитическая связь деформаций и напряжений при осевом сжатии бетона в редакции [5,10,17] приведена в формуле (19).

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b} \quad (19)$$

где ν_b - коэффициент секущего модуля, значение которого вычисляется как через относительный уровень напряжений $\eta_n = \sigma_b / R_b$, так и через относительный уровень деформаций $\eta_d = \varepsilon_b / \hat{\varepsilon}_b$. Восходящая ветвь строится по известным зависимостям, в соответствии с формулами (12) и (13).

Деформации в вершине диаграммы $\hat{\varepsilon}_b$, в отличие от [3], назначаются не по таблицам норм, а рассчитываются по формуле, в которой учитывается класс и вид бетона. Ниспадающая ветвь диаграммы ограничивается относительным уровнем напряжения $\eta_n = 0,85$ и $\eta_n = 1$ для высокопрочных бетонов, однако при этом значения максимальных деформаций ε_{bu} при классах бетона могут отличаться от их нормированных величин. Отклонение значений деформаций от их нормированных величин влияет на точность определения усилий в предельном состоянии. Для тяжелого бетона вводятся аналитические зависимости определения деформаций в базовых точках $\hat{\varepsilon}_b$ и ε_{bu} , аппроксимирующих их нормированные значения, в соответствии с формулами (20).

$$\hat{\varepsilon}_b = 1,75 \left(\frac{B}{10 \text{ МПа}} \right)^{0,2} / 1000,$$

$$\varepsilon_{cu1} = \varepsilon_{c1} \left(1 - \frac{f_{cm} - f_{cm}^*}{81 \text{ МПа}} \left(\frac{10 \text{ МПа}}{f_{cm}} \right)^{0,2} \right) \quad (20)$$

1.3.2 Криволинейные диаграммы по СНБ 5.03.01-02

Нормированные значения деформаций в базовых точках ε_{c1} и ε_{cu1} в расчетах напряжений по формуле (16) для классов бетона, усложняет построение автоматизированного нелинейного вычислительного процесса расчета прочности железобетонного элемента по деформационной модели. Табличные значения деформаций в базовых точках в расчетах железобетонных элементов рекомендуется аппроксимировать аналитическими зависимостями, в соответствии с формулами (21)

$$\varepsilon_{c1} = -1,6(f_{cm}/10 \text{ МПа})^{0,25} / 1000;$$

$$\varepsilon_{cu1} = \varepsilon_{c1} \left(1 - \frac{f_{cm} - f_{cm}^*}{81 \text{ МПа}} \left(\frac{10 \text{ МПа}}{f_{cm}} \right)^{0,2} \right) \quad (21)$$

где f_{cm}^* - фиксированное значение средней прочности бетона для класса бетона, при котором ниспадающая ветвь исключается из расчета и выполняются равенства: $|\varepsilon_{c1}| = |\varepsilon_{cu1}|$ и $f_{cd} = f_{cu}$.

Величины деформаций в базовых точках поставлены в зависимость от средних напряжений f_{cm} в соответствии с формулой (21) и класса бетона В – в соответствии с формулой (20). Это означает, что величины деформаций в базовых точках не зависят от значений расчетных сопротивлений бетона и формулы вычисления деформаций в базовых точках могут использоваться в расчетах по предельным состояниям как первой, так и второй группы.

1.4 Описание диаграмм деформирования бетона на ЭВМ

1.4.1 Описание диаграмм по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-2

Двухлинейная и Трехлинейная диаграммы деформирования бетона по СП 63.13330.212, строятся в соответствии с рисунком 5.

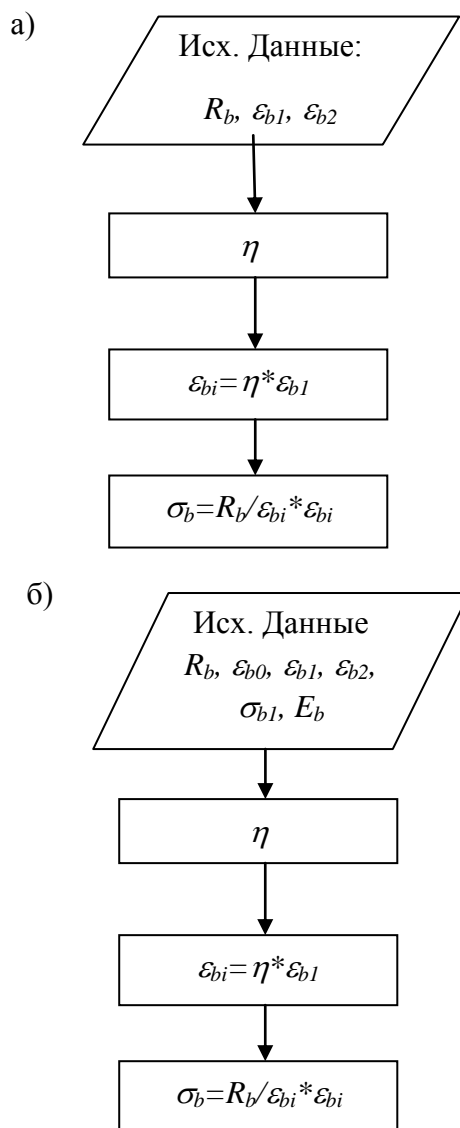


Рисунок 5 – Блок-схема построения а) двухлинейной диаграммы, б) трехлинейной диаграммы

Построение двухлинейной диаграммы для бетона кл. В25, рисунок 6.

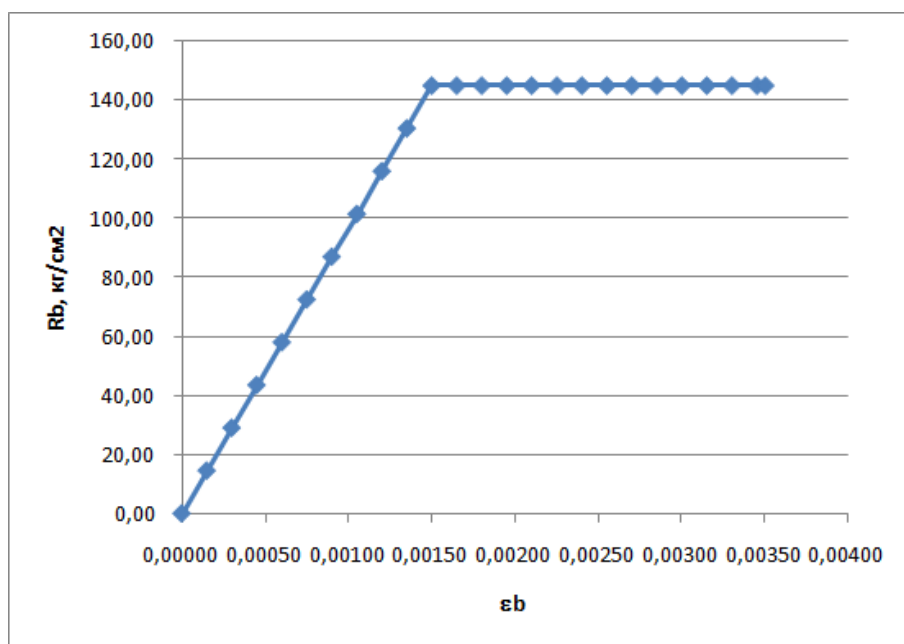


Рисунок 6 – Описание двухлинейной диаграммы на ЭВМ

Построение 3-х линейной диаграммы для бетона кл. В25, рисунок 7.

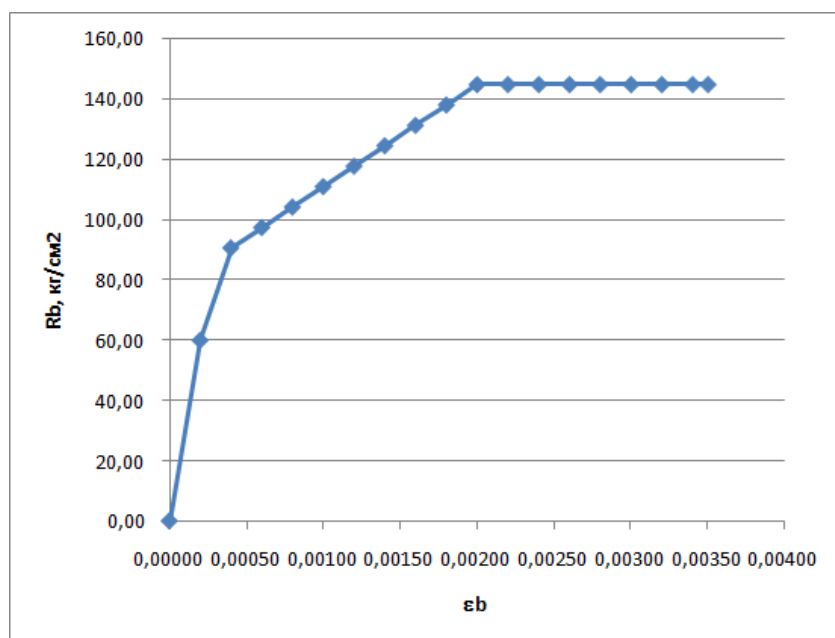


Рисунок 7 – Описание трехлинейной диаграммы на ЭВМ

Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СП 63.13330.212, строится в соответствии с рисунком 8.

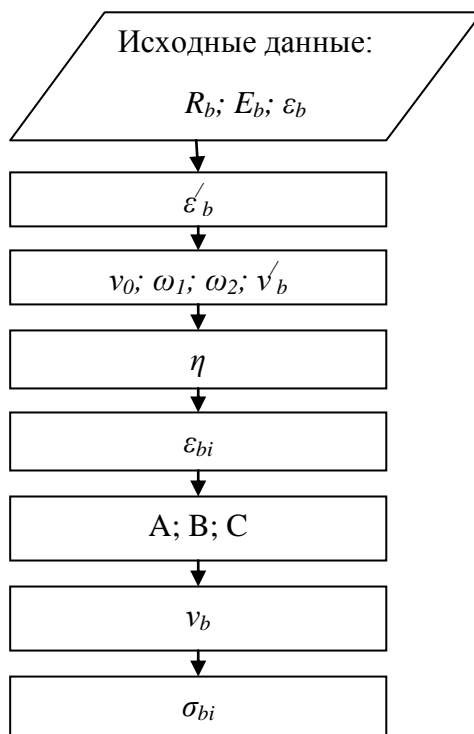


Рисунок 8 – Блок-схема построения криволинейной диаграммы

Построение криволинейной диаграммы для бетона кл. В25, рисунок 9.

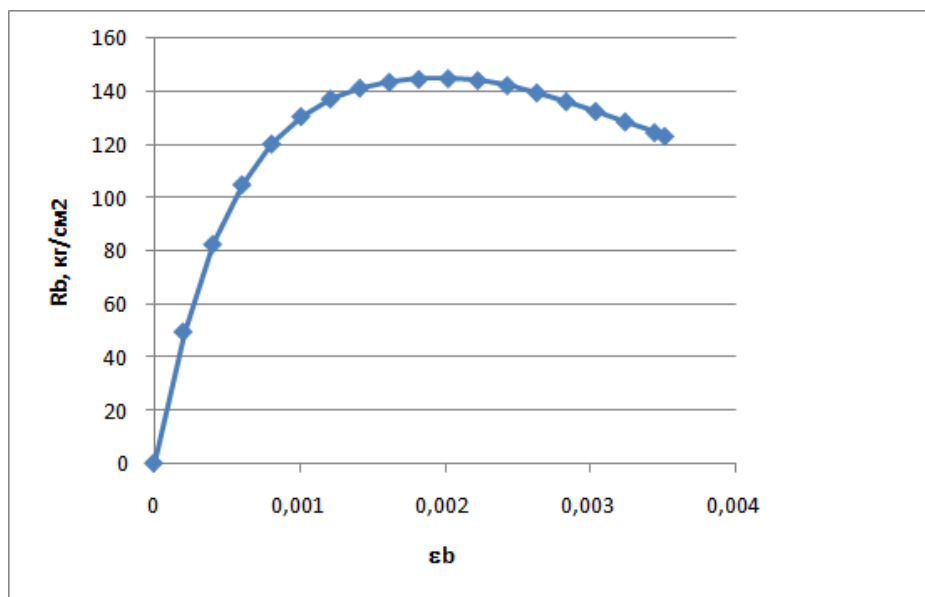


Рисунок 9 – Описание криволинейной диаграммы на ЭВМ по СП

Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СНБ 5.03.01-2, строится в соответствии с рисунком 10.

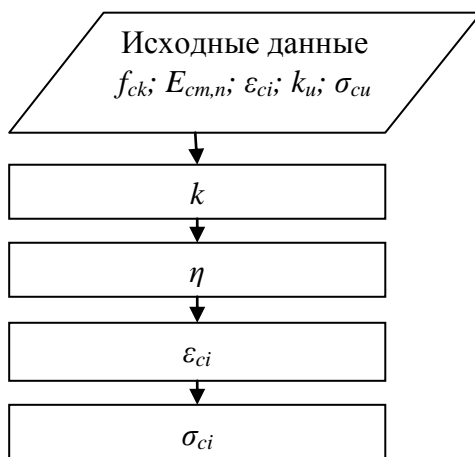


Рисунок 10 – Блок-схема построения криволинейной диаграммы

Построение криволинейной диаграммы для бетона кл. В25, рисунок 11.

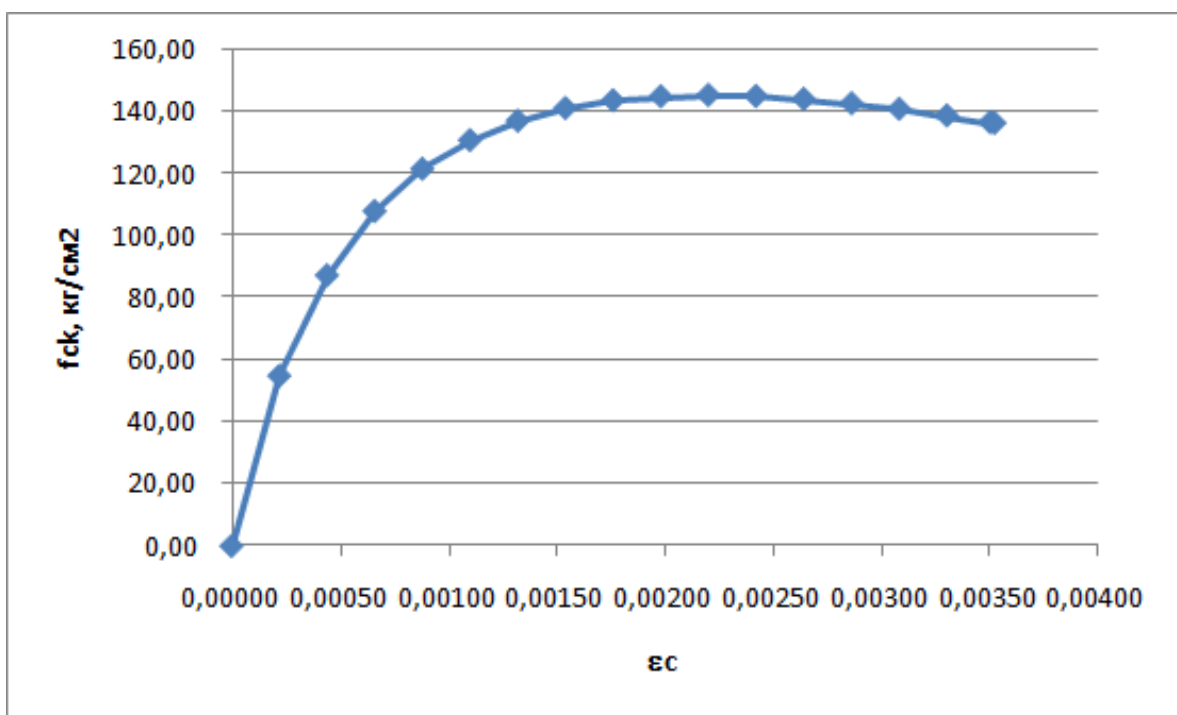
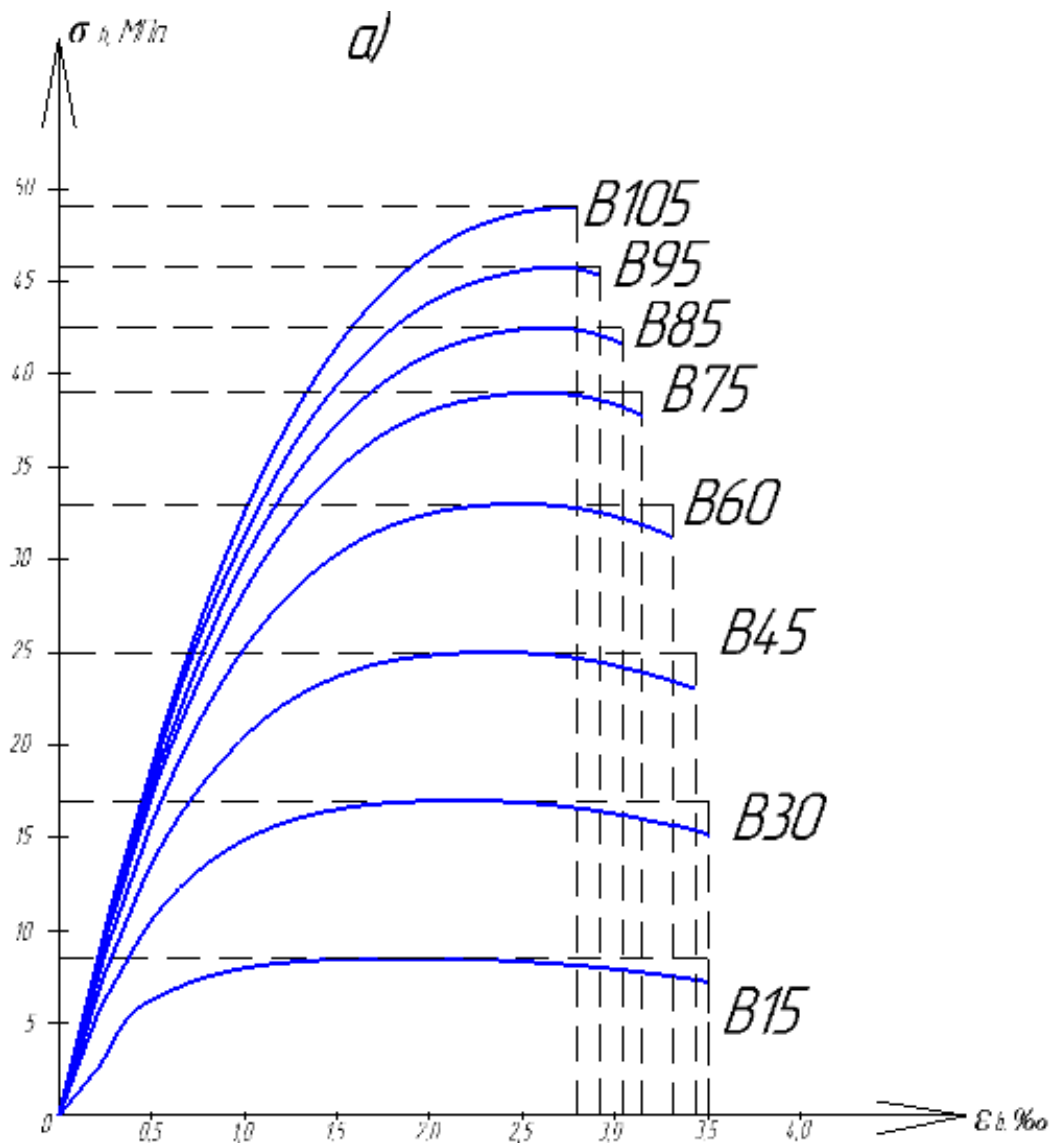


Рисунок 11 – Описание криволинейной диаграммы на ЭВМ по СНБ

1.4.2 Описание диаграмм с новыми интегральными параметрами

Диаграммы по СП 63.13330.2012 и СНБ 05.03.01-2, строятся в соответствии с рисунком 12.



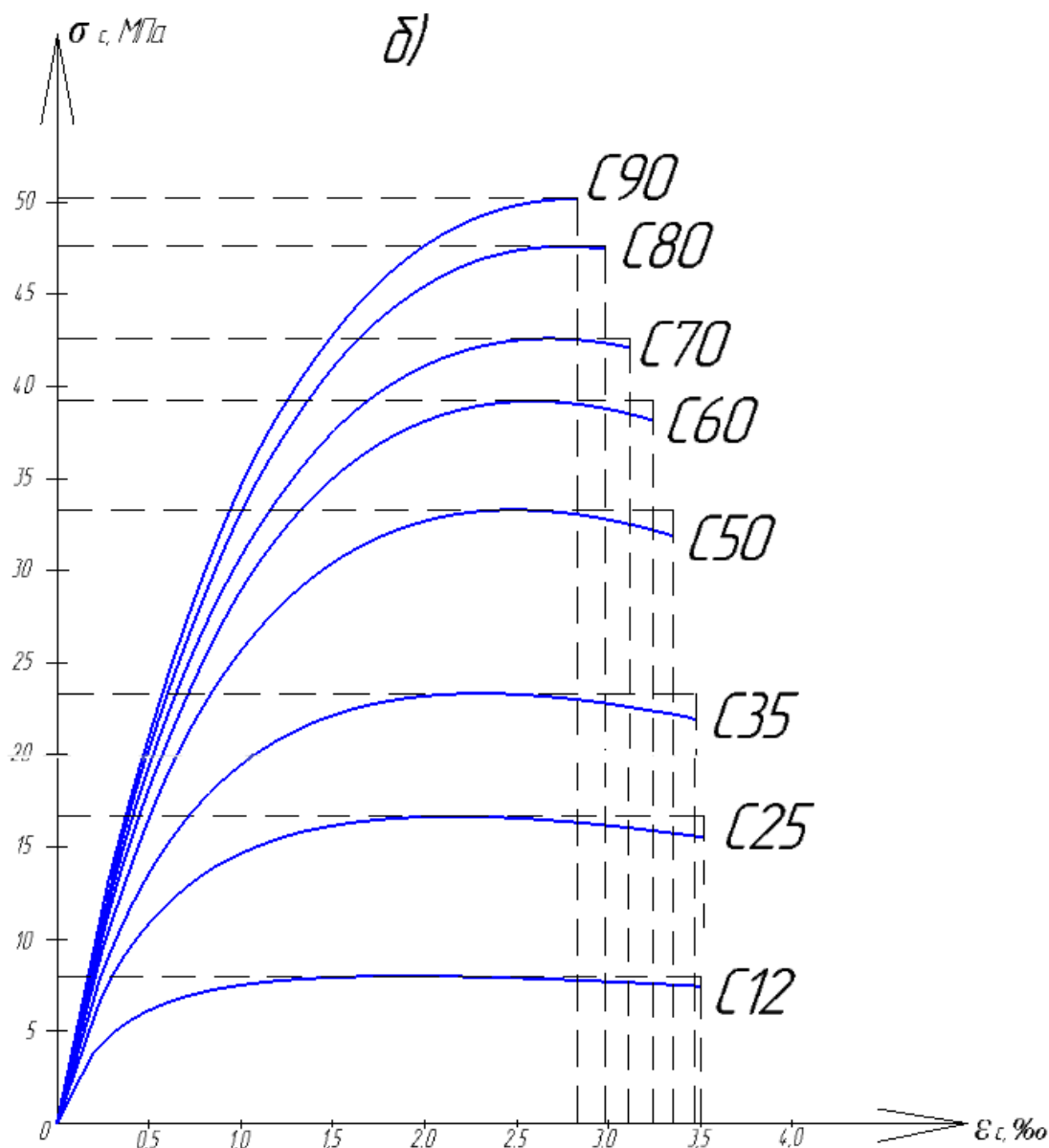


Рисунок 12 – а) Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СП 63.13330.2012,
 б) Криволинейная диаграмма по СНБ 5.03.01-02

На основании выше приведенных формул (19) – (21), были описаны диаграммы и определены значения предельных параметров, ω_d и ω_d^* – коэффициент полноты эпюры, вычисляемый как отношение площади диаграммы к площади прямоугольника, стороны которого проходят через базовые точки диаграммы, результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношение полученных краевых значений деформаций и напряжений

Класс бетона		B15	B30	B45	B60	B75	B85	B95	B105
1		2	3	4	5	6	7	8	9
СП	ε_b^A , [‰]	1,9	2,18	2,36	2,50	2,62	2,68	2,75	2,8
	σ_b^A , МПа	8,5	17,0	25,0	33,0	39,0	42,5	45,75	49,0
	ε_{bu} , [‰]	3,5	3,51	3,44	3,31	3,15	3,04	2,92	2,8
	σ_{bu} , МПа	7,22	16,72	24,8	32,89	38,96	42,48	45,74	49,0
	S, [МПа‰ _o]	25,72	51,32	71,58	87,53	94,98	97,29	97,87	97,33
	ω_d	0,865	0,860	0,832	0,801	0,773	0,753	0,732	0,709
Класс бетона		C12	C25	C35	C50	C60	C70	C80	C90
СНБ	ε_{cl} , [‰]	1,9	2,16	2,30	2,48	2,58	2,67	2,76	2,83
	σ_{cl} , МПа	8,0	16,67	23,33	33,3	39,2	42,6	47,6	50,2
	ε_{cu} , [‰]	3,5	3,52	3,47	3,35	3,24	3,11	2,98	2,83
	σ_{cu} , МПа	7,45	15,53	21,9	31,88	38,15	42,1	47,44	50,2
	S, [МПа‰ _o]	24,95	50,45	67,84	89,74	99,57	101,86	105,56	103,08
	ω_d^*	0,891	0,859	0,838	0,804	0,784	0,768	0,744	0,725
ω_d/ω_d^*		0,97	1,0	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97

Выводы: из полученных значений видно, что значения деформаций, напряжений и площадей диаграмм по СП и СНБ получаются значительно близки, что в свою очередь демонстрирует единообразие диаграмм.

Также видно, что при соотношении найденных коэффициентов полноты эпюры ω и ω_d видно, что значения находятся в пределах единицы, что свидетельствует о единообразии диаграмм и в дальнейшем при расчетах по деформационной модели результаты будут также близки.

Выводы по первой главе

В данной главе были исследованы и описаны диаграммы деформирования бетона на сжатие (двух-, трехлинейные, криволинейные по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02), а также описаны диаграммы по новым интегральным параметрам крайних значений деформаций и напряжений.

Из полученных значений видно, что значения деформаций, напряжений и площадей диаграмм по СП и СНБ получаются значительно близки, что в свою очередь демонстрирует о единообразии диаграмм, что говорит о сходимости отечественных и зарубежных диаграмм, а также о получении близких результатов в дальнейших расчетах. Из найденных коэффициентов полноты эпюры ω и ω_d видно, что соотношение диаграмм с новыми интегральными параметрами находятся в пределах единицы, что свидетельствует о единообразии диаграмм и в дальнейшем при расчетах по деформационной модели результаты будут также близки.

Глава 2 Расчет прочности железобетонных изгибаемых элементов по нелинейной деформационной модели

При расчете железобетона на прочность по сечениям, нормальным к продольной оси, используют два метода [25,5,23,6,7,9,13,26,15,28-30,32-48]. Один из них – упрощенный метод предельных усилий, представленный как в СНиП 2.03.01-84* [2], так и в более поздних СНиП 52-01-2003 [48] стандартах проектирования конструкций. Согласно методу предельных усилий, прочность элемента считается гарантированной, если имеющиеся в его сечениях напряжения не больше максимальных значений, устанавливаемых из гипотезы о равном распространении нормальных напряжений, равных расчетному сопротивлению бетона, по бетону расположенному в сжатой зоне; бетона, расположенный в зоне растяжения, как правило, отбрасывается. Метод является, довольно таки простым способом для оценки при не сложных формах сечения и становится труднее при не простой форме сечения и при косом изгибе. Методика расчета по традиционному методу давно и масштабно применяется в практической деятельности проектирования и конструирования конструкций из железобетона.

В настоящее время получил распространение 2 метод – метод определения НДС поперечных сечений элементов, который основан на деформационной методике расчета и получил известность в русскоязычных источниках под названием «деформационная модель» сечения и включен в Еврокоды (EN) [24,36], стандарты Российской Федерации и зарубежных стран. Данная методика предполагает применение диаграмм деформирования, приближающих нелинейную работу бетона и арматуры, и некоторого закона распространения относительных деформаций по поверхности поперечных сечений элементов; в данном случае используется гипотеза плоских сечений или ее модификация для средних деформаций. В качестве диаграмм деформирования материалов могут применяться

взаимосвязи деформаций-напряжений произвольного вида (2х-, 3х- линейные, криволинейные), построенные с учетом вида НДС и режима нагружения. Деформативный метод расчета по сравнению с традиционным методом, дает возможность дать оценку и провести анализ сечений не только в предельном но в других видах состояния (до предельном, запредельном), в соответствии с рисунком 13.

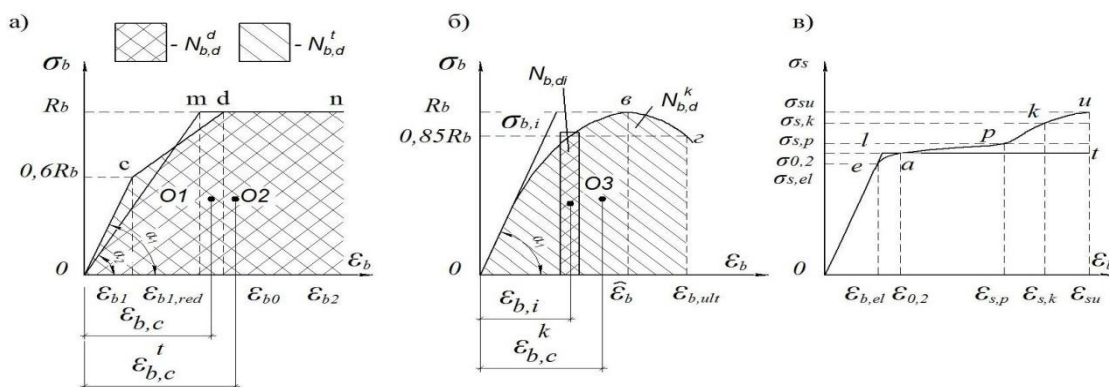


Рисунок 13 – Диаграммы деформирования бетона на сжатие: а) – 2х-линейная и 3х-линейная; б) – криволинейная; в) - арматуры на растяжение

2.1 Методика расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели

Заключается в том что [17], в поперечном прямоугольном сечении изгибаемого железобетонного элемента с арматурой расположенной в растянутой зоне арматурой площадью A_s и в сжатой зоне площадью A'_s расчетная схема усилий в нормальном сечении с трещиной включают в себя: усилие N_s - в продольной арматуре, расположенной в зоне растяжения; усилие N_b - в бетоне зоны сжатия, приложенных в центре тяжести эпюр напряжений; усилие N'_s - в продольной арматуре, расположенной в сжатой зоне, в соответствии с рисунком 14.

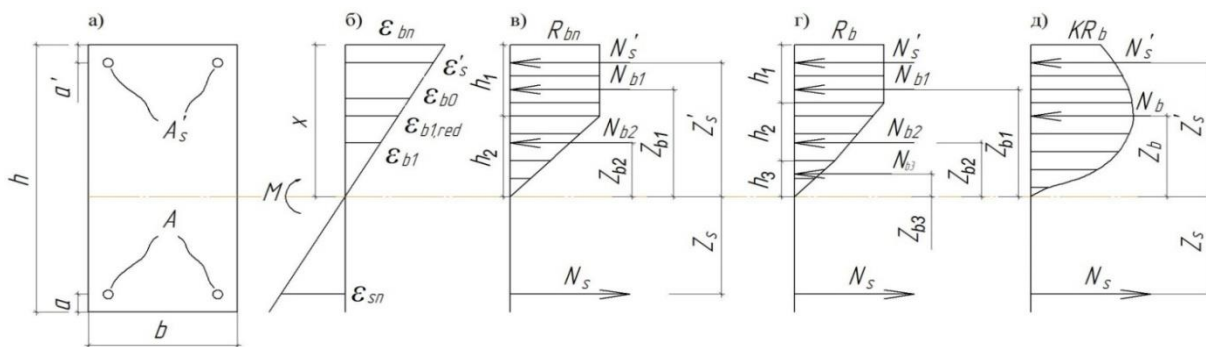


Рисунок 14 – Схемы усилий, напряжений и деформаций в поперечном сечении изгибаемого элемента при расчете на прочность с использованием, в) – 2х-линейных, г) – 3х-линейных и д) - криволинейной диаграмм бетона на сжатие

Для выполнения условия равновесия, приведенного в формуле (22), уравнение записывают в следующем виде:

$$N_b + N'_s - N_s = 0 \quad (22)$$

где N_b - в бетоне зоны сжатия, приложенных в центре тяжести эпюр напряжений;

N'_s - в продольной арматуре, расположенной в сжатой зоне;

N_s - в продольной арматуре, расположенной в зоне растяжения.

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 распространения относительных деформаций по высоте элемента следуют соотношения, в соответствии с формулой (23).

$$\frac{1}{\rho} = \chi = \frac{\varepsilon_{sn}}{h_0 - x} = \frac{\varepsilon_{bn}}{x} = \frac{\varepsilon_{bn} + \varepsilon_{sn}}{h_0} \quad (23)$$

где h_0 – рабочая высота сечения;

x - высота сжатой зоны;

ε_{bn} - относительные деформации на крайнем волокне бетона сжатой зоны;

χ - кривизна элемента;

ρ - радиус кривизны;

ε_{sn} - относительные деформации в растянутой арматуре.

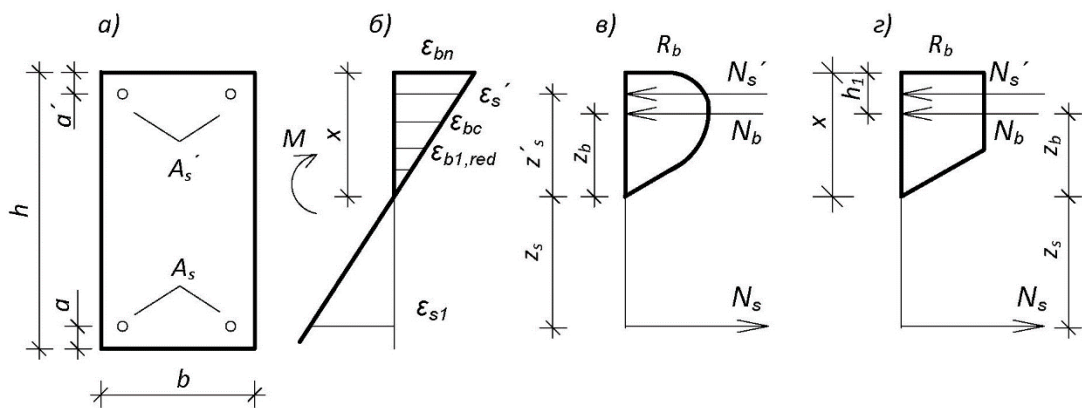


Рисунок 15 – Схемы распределения деформаций (б), напряжений и усилий в поперечном сечении изгибаемого ненапряженного элемента при расчете на прочность с использованием нормируемых диаграмм (в, г)

В области диаграммы, ограниченной максимальными деформациями бетона ε_{bn} (в расчетах на прочность $\varepsilon_{bn} = \varepsilon_{b2}$), при помощи численного моделирования 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 $\sigma_{b,i}$ 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, расположенным в зоне сжатия в предельном состоянии для полоски единичной ширины ($b=1$), определяется путем численного

суммирования усилий, действующих в пределах каждого элементарного участка, в соответствии с формулой (24).

$$N_b = N_{b,d} / \chi \quad (24)$$

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, использованную на деформацию образца при нагрузке до их максимальных значений, она равна сумме площадей участков в области, ограниченной ветвями диаграмм бетона на сжатие и максимальным значением деформаций ε_{bn} . С учетом полученных зависимостей уравнение равновесия (22) для элемента шириной сечения b запишется, в соответствии с формулой (25).

$$\frac{N_{b,d} b}{\chi} + \sigma'_s A'_s - \sigma_s A_s = 0 \quad (25)$$

где σ_s - напряжения в растянутой арматуре;

σ'_s - напряжения в сжатой арматуре;

A_s - площадь растянутой арматуры;

A'_s - площадь сжатой арматуры.

Деформации арматуры вычисляются из выражений, в соответствии с формулой (26):

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{bn} - \chi a', \varepsilon_s = \chi h_0 - \varepsilon_{bn} \quad (26)$$

где ε_s - относительные деформации в растянутой арматуре;

ε'_s - относительные деформации в сжатой арматуре.

Уравнение равновесия определяют (25) методом аппроксимирования. При первом аппроксимировании 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 используемыми в уравнении (25) знаками перед слагаемыми в левой части уравнения по результатам вычисления могут возникнуть два случая: 1 – левая часть уравнения (25) больше нуля, данная ситуация говорит о том, что сечение не до армированное; 2 – левая часть уравнений (25) меньше нуля, в данном случае это будет означать что сечение переармированное.

При реализации первого случая необходимо при постоянных значениях деформаций арматуры ε_{s2} уменьшать деформации бетона 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 (25). Процедура приближения выполняется до тех пор, пока при некотором $\varepsilon_b^{(k)}$ (k -ом приближении) не будет достигнута заданная точность (в соответствии с условием (27), по сумме усилий в левой части уравнения (25):

$$\sum N_{b.s} \leq 0,0001 \quad (27)$$

При возникновении второго случая, т.е. когда левая часть уравнения оказалась меньше нуля, алгоритм проверки уравнения равновесия (25) 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 (27) по $\varepsilon_s^{(k)}$.

Условие прочности сечений элементов подверженных изгибу 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, в соответствии с формулами (28).

$$\begin{aligned} z'_s &= \frac{\varepsilon_b^{(k)} - a' \chi^{(k)}}{\chi^{(k)}}; \\ z_s &= \frac{\chi^{(k)} h_0 - \varepsilon_b^{(k)}}{\chi^{(k)}}; \\ z_b &= \frac{S_{b,d}}{\chi^{(k)} N_{b,d}} = \frac{\varepsilon_{b,c}}{\chi^{(k)}} \end{aligned} \quad (28)$$

где z_b – расстояние от усилия в бетоне до нейтральной оси;

z_s – расстояние от усилия в растянутой арматуре до нейтральной оси;

z'_s – расстояние от усилия в сжатой арматуре до нейтральной оси;

$$S_{b,d} = \sum_{i=1}^n A_{b,i} \varepsilon_{bc,i} = \sum_{i=1}^n \sigma_{b,i} \Delta \varepsilon_{b,i} \varepsilon_{bc,i} - \text{момент, численно равный сумме}$$

произведений площадей элементарных площадок в диаграммах бетона на расстояния их центров тяжести до оси напряжений σ_b ;

$\varepsilon_{b,c} = S_{b,d} / N_{b,d}$ - расстояние от оси напряжений σ_b бетона до центра тяжести диаграммы;

$\chi^{(k)}$ - кривизна элемента после выполнения условия (27) на k -ой итерации.

Уравнение для вычисления предельного изгибающего момента примет вид, в соответствии с формулой (29):

$$M_{ult} = N_b b z_b + \sigma_s A_s z_s + \sigma'_s A'_s z'_s \quad (29)$$

где используются значения: $\varepsilon_{bu} = \varepsilon_b^{(k)}$ - для первого случая, $\varepsilon_{su} = \varepsilon_s^{(k)}$ - для второго случая, $\chi^{(k)}$, полученные на последних циклах итераций, после выполнения условия (27).

В общем случае алгоритм расчета можно представить в виде блок-схемы, в соответствии с рисунком 16.

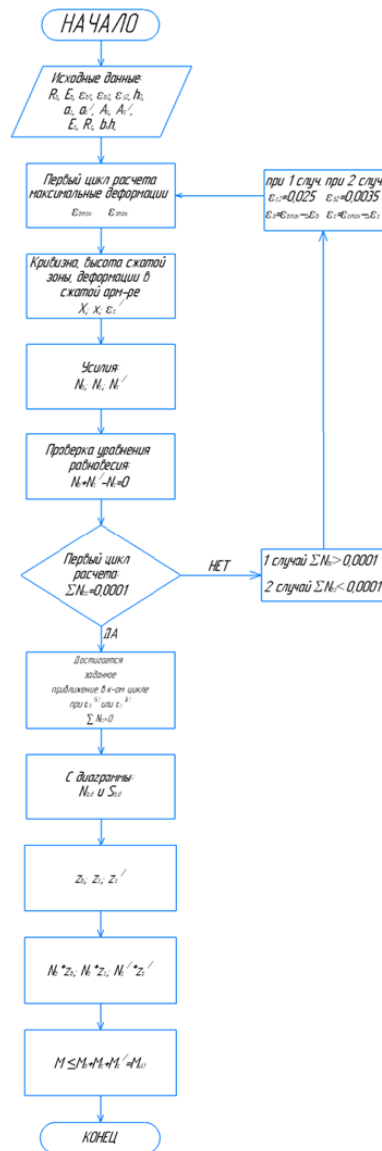


Рисунок 16 – Блок-схема расчета по деформационной модели

2.2 Методика расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов по методу предельных усилий

При выполнении поверочных расчетов прочности сечений изгибаемых элементов по СП 63.13330.2012 [3] производят из условия (30).

$$M < M_{ult} \quad (30)$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки;

M_{ult} – предельный изгибающий момент, который может быть воспринят сечением элемента.

Значение M_{ult} для изгибаемых элементов прямоугольного сечения определяют, в соответствии с формулой (31).

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a') \quad (31)$$

где x – высота сжатой зоны, определяемый в соответствии с формулой (32).

$$x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b} \quad (32)$$

Если армирование сжатой зоны отсутствует ($A'_s = 0$), то формула вычисления высоты сжатой зоны прямоугольного сечения упрощается.

2.3 Примеры расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели по СП 63.13330.2012, СНБ 5.03.01-02 и методу предельных усилий

2.3.1 Расчет с применением двухлинейной диаграммы по СП 63.13330.2012

Требуется выполнить поверочный расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента из бетона кл. В25, арматура А400, диаметром 12 мм, используем для этого MS Excel, построение диаграммы отображено в таблице 2.

Таблица 2 – Двухлинейная диаграмма деформирования бетона

Исходные данные:							
R_b	145 кг/см ²	$E_{b,red}$	96666,67	$\epsilon_{b1,red}$	0,00150	ϵ_{b1}	0,00150
ϵ_{b2}	0,00350						
Построение диаграммы							
$\eta = \epsilon_b / \epsilon_{b1}$	ϵ_{bi}	$\Delta \epsilon_{bi}$	σ_b	$\Delta \sigma_{bi}$	$N_{b,d}$	ϵ_{bi}	$S_{b,d}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00000	0,00015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,00015	0,00015	14,5	7,25	0,001088	0,00008	0,000000
0,2	0,00030	0,00015	29,0	21,75	0,003263	0,00023	0,000001
0,3	0,00045	0,00015	43,5	36,25	0,005438	0,00038	0,000002
0,4	0,00060	0,00015	58,0	50,75	0,007613	0,00053	0,000004
0,5	0,00075	0,00015	72,5	65,25	0,009788	0,00068	0,000007
0,6	0,00090	0,00015	87,0	79,75	0,011963	0,00083	0,000010
0,7	0,00105	0,00015	101,5	94,25	0,014138	0,00098	0,000014
0,8	0,00120	0,00015	116,0	108,75	0,016313	0,00113	0,000018
0,9	0,00135	0,00015	130,5	123,25	0,018488	0,00128	0,000024
1,0	0,00150	0,00015	145,0	137,75	0,020663	0,00143	0,000029
1,1	0,00165	0,00015	145,0	145,00	0,021750	0,00158	0,000034

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
1,2	0,00180	0,00015	145,0	145,00	0,021750	0,00173	0,000038
1,3	0,00195	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00188	0,000041
1,4	0,00210	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00203	0,000044
1,5	0,00225	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00218	0,000047
1,6	0,00240	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00233	0,000051
1,7	0,00255	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00248	0,000054
1,8	0,00270	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00263	0,000057
1,9	0,00285	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00278	0,000060
2,0	0,00300	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00293	0,000064
2,1	0,00315	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00308	0,000067
2,2	0,00330	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00323	0,000070
2,3	0,00345	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00338	0,000073
2,33	0,00350	0,00015	145,0	145,0	0,007250	0,00348	0,000025
					0,39875		0,000833

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 17.

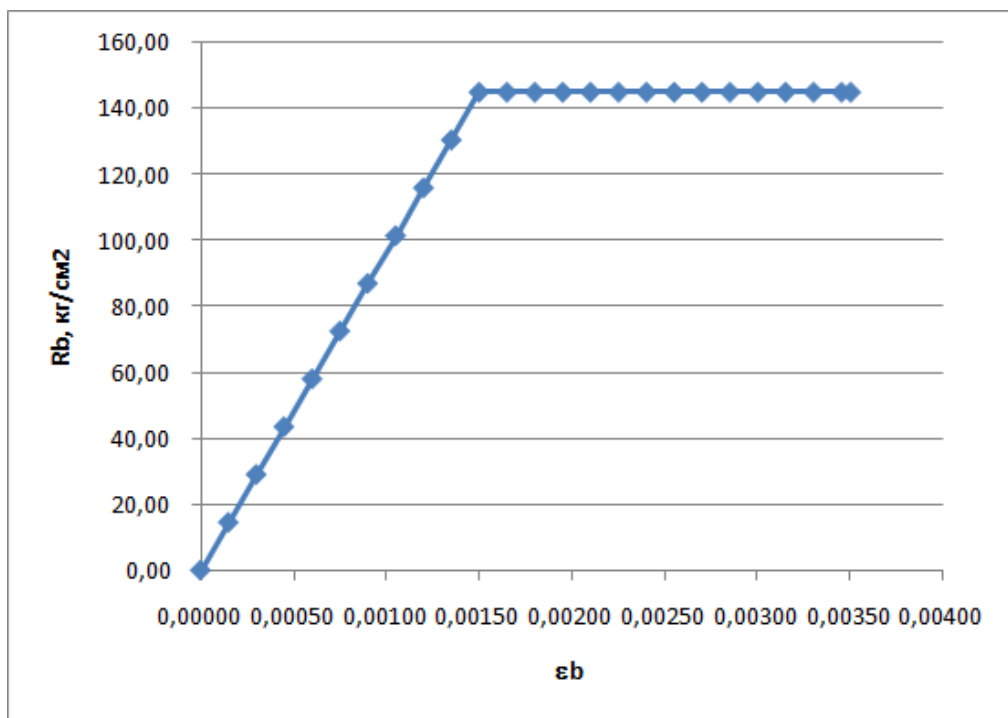


Рисунок 17 – Двухлинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности изгибаемого элемента, расчетные характеристики для выполнения поверочного расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для расчета

Исходные данные:								
Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	18,0	см	A_s	2,16	см ²	R_b	145	кг/см ²
b	12,0	см	A_s'	2,16	см ²	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	210,0	см	\bar{B}_s	3500	кг/см ²	E_b	300000	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	ε_{b1}	0,00150	
			ε_{s2}	0,025		ε_{b2}	0,00350	
			R_s	3500	кг/см ²	h_0	16,00	см
			ε_{s0}	0,00175		a_s, a_s'	2,00	см
						$\varepsilon_{b1,red}$	0,00150	
						$E_{b,red}$	96666,67	кг/см ²

Далее выполняем условие равновесия с применением итерационного процесса (метода приближения), пример итерационного процесса выполнен по формулам главы 2 и представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Итерационный процесс

$\varepsilon_{b,max}$	$\varepsilon_{s,max}$	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	ε_s'	A, кг	B, кг	C, кг	$\Sigma, \text{кг}$
2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,0035	0,0250	0,00178	1,96	-0,00006	2686,3	-270	7560,0	-5143,6
0,0035	0,0245	0,00175	2,00	0,00000	2734,2	0,00	7560,0	-4825,7
0,0035	0,0240	0,00171	2,04	0,00006	2784,0	270	7560,0	-4506,0
0,0035	0,0235	0,00168	2,07	0,00013	2835,5	540	7560,0	-4184,4
0,0035	0,0230	0,00165	2,11	0,00019	2889,0	810	7560,0	-3860,9
0,0035	0,0225	0,00162	2,15	0,00025	2944,6	1080	7560,0	-3535,3
0,0035	0,0220	0,00159	2,20	0,00031	3002,3	1350	7560,0	-3207,6
0,0035	0,0210	0,00153	2,29	0,00044	3124,9	1890	7560,0	-2545,1
0,0035	0,0200	0,00146	2,38	0,00056	3257,8	2430	7560,0	-1872,1
0,0035	0,0173	0,00130	2,69	0,00090	3678,6	3881	7560,0	0,00000

Условие равновесия выполнено на 10й итерации, далее выполняем расчет прочности по формулам главы 2 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет прочности изгибаемого железобетонного элемента

$N_{b,d}=\Sigma\Delta\varepsilon_{bi}\sigma_{bi}$	$S_{b,d}$	z_b , см	z_s' , см	z_s , см	$N_b b z_b$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,398750	0,000833	1,61	0,69	13,31	5911,233	100618,1	2680,977	109210,3 кг*см
								10,92 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 6.

Таблица 6 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	85	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	10,77	10,85	10,92	10,98	11,04	11,1	11,17

Кл. В	50	55	60	70	80	90	100
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	275	300	330	370	410	440	475
M_{ult}	11,22	11,28	11,34	11,42	11,49	11,54	11,6

Расчеты показывают значительно близкие результаты, что свидетельствует о целесообразности применения данных методик расчета по нелинейной деформационной модели в сравнении с традиционными методами.

2.3.2 Расчет с применением трехлинейной диаграммы по СП 63.13330.2012

Требуется выполнить поверочный расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента из бетона кл. В25, арматура А400, диаметром 12 мм, используем для этого MS Excel, построение диаграммы отображено в таблице 7.

Таблица 7 – Трехлинейная диаграмма деформирования бетона

Исходные данные:								
R_b	145 кг/см ²	E_b	300000,0	ε_{b0}	0,002	ε_{b1}	0,00029	
ε_{b2}	0,00350	σ_{b1}	87					
Построение диаграммы								
№ п/п	$\eta = \varepsilon_b / \varepsilon_{b1}$	ε_{bi}	$\Delta \varepsilon_{bi}$	σ_b	$\Delta \sigma_{bi}$	$N_{b,d}$	ε_{bi}	$S_{b,d}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,006000	0,00010	0,000001
0,1	0,00020	0,00020	0,00020	60,00	30,00	0,015073	0,00030	0,000005
0,2	0,00040	0,00040	0,00020	90,73	75,37	0,018825	0,00050	0,000009
0,3	0,00060	0,00060	0,00020	97,51	94,12	0,020181	0,00070	0,000014
0,4	0,00080	0,00080	0,00020	104,30	100,91	0,021538	0,00090	0,000019
0,5	0,00100	0,00100	0,00020	111,08	107,69	0,022895	0,00110	0,000025
0,6	0,00120	0,00120	0,00020	117,87	114,47	0,024251	0,00130	0,000032
0,7	0,00140	0,00140	0,00020	124,65	121,26	0,025608	0,00150	0,000038
0,8	0,00160	0,00160	0,00020	131,43	128,04	0,026965	0,00170	0,000046
0,9	0,00180	0,00180	0,00020	138,22	134,82	0,028322	0,00190	0,000054
1,0	0,00200	0,00200	0,00020	145,00	141,61	0,029000	0,00210	0,000061
1,1	0,00220	0,00220	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00230	0,000067
1,2	0,00240	0,00240	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00250	0,000073
1,3	0,00260	0,00260	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00270	0,000078
1,4	0,00280	0,00280	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00290	0,000084

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8
1,5	0,00300	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00310	0,000090
1,6	0,00320	0,00020	145,00	145,00	0,006000	0,00010	0,000001
1,7	0,00340	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00330	0,000096
1,75	0,00350	0,00010	145,00	145,00	0,014500	0,00345	0,000050
					0,427158		0,000841

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 18.

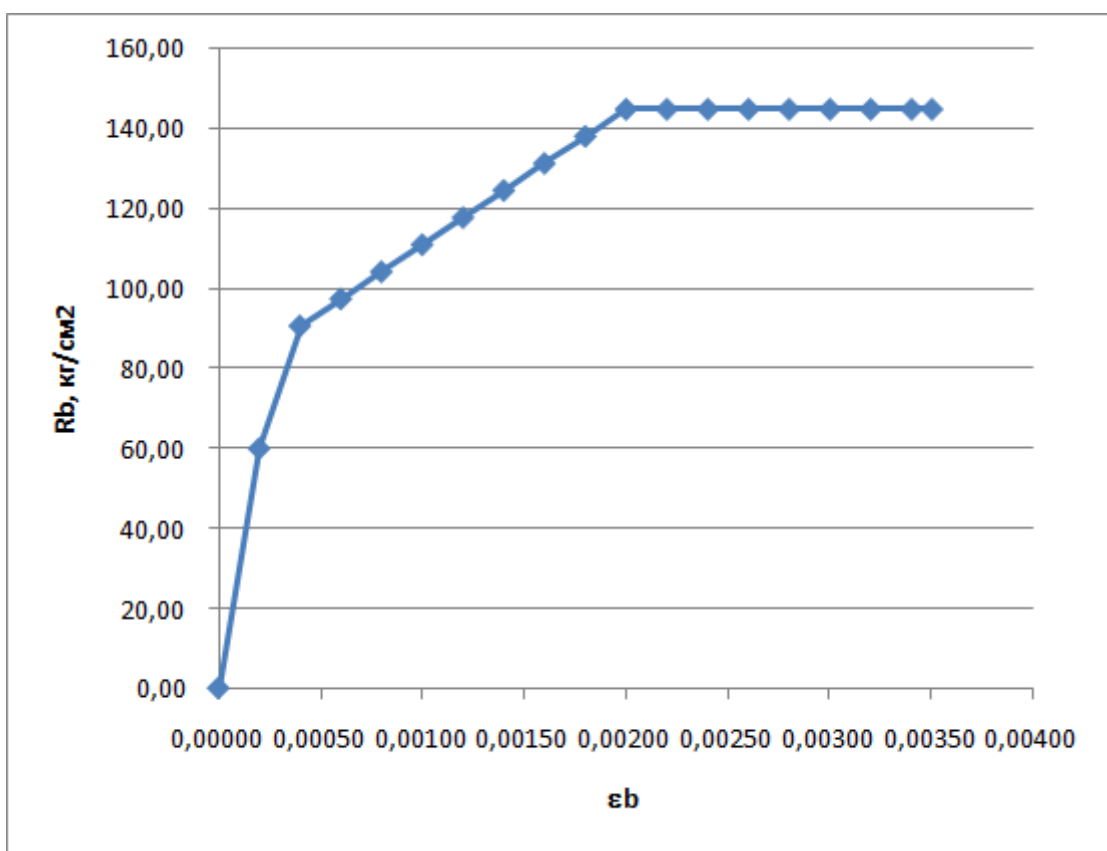


Рисунок 18 – Трехлинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности изгибаемого элемента, расчетные характеристики для выполнения поверочного расчета представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Исходные данные для расчета

Исходные данные:								
Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	18,0	см	A_s	2,16	см ²	R_b	145	кг/см ²
b	12,0	см	A_s'	2,16	см ²	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	210,0	см	σ_s	3500	кг/см ²	E_b	300000	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	ϵ_{b0}	0,00200	
			ϵ_s	0,01		ϵ_{b2}	0,00350	
			R_s	3500	кг/см ²	h_0	16,00	см
						a_s, a_s'	2,00	см
						ϵ_{b1}	0,00029	
						σ_{b1}	87	кг/см ²

Далее выполняем условие равновесия с применением итерационного процесса (метода приближения), пример итерационного процесса выполнен по формулам главы 2 и представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Итерационный процесс

$\epsilon_{b,max}$	$\epsilon_{s,max}$	$\chi, \text{см}^{-1}$	x, см	ϵ_s'	A, кг	B, кг	C, кг	$\Sigma, \text{кг}$
2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,0035	0,0250	0,00178	1,96	-0,00006	2877,7	-270	7560,0	-4952,30
0,0035	0,0245	0,00175	2,00	0,00000	2929,0	0,00	7560,0	-4630,92
0,0035	0,0240	0,00171	2,04	0,00006	2982,3	270	7560,0	-4307,66
0,0035	0,0235	0,00168	2,07	0,00013	3037,5	540	7560,0	-3982,43
0,0035	0,0230	0,00165	2,11	0,00019	3094,8	810	7560,0	-3655,12
0,0035	0,0225	0,00162	2,15	0,00025	3154,4	1080	7560,0	-3325,60
0,0035	0,0220	0,00159	2,20	0,00031	3216,2	1350	7560,0	-2993,75
0,0035	0,0215	0,00156	2,24	0,00038	3280,5	1620	7560,0	-2659,43
0,0035	0,0210	0,00153	2,29	0,00044	3347,5	1890	7560,0	-2322,48
0,0035	0,0177	0,00132	2,64	0,00085	3873,5	3686	7560,0	0,00000

Условие равновесия выполнено на 10й итерации, далее выполняем расчет прочности по формулам главы 2 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Расчет прочности изгибаемого железобетонного элемента

$N_{b,d} = \sum \Delta \varepsilon_{bi}$ σ_{bi}	$S_{b,d}$	z_b , см	z_s' , см	z_s , см	$N_b b z_b$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,427158	0,00084	1,4	0,6	13,3	5762,58	100964	2377,26	109104,72 кг*см
								10,91 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 11.

Таблица 11 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	85	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	10,76	10,84	10,91	10,98	11,03	11,09	11,16

Кл. В	50	55	60	70	80	90	100
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	275	300	330	370	410	440	475
M_{ult}	11,22	11,27	11,34	11,41	11,49	11,53	11,58

Расчет с применением трехлинейной диаграммы дает значения разрушающего момента выше чем по двухлинейной диаграмме. Что свидетельствует о целесообразности применения трехлинейной диаграммы по сравнению с двухлинейной, и в целом дает более точные значения разрушающего момента.

2.3.3 Расчет с применением криволинейной диаграммы по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02

- Криволинейная диаграмма по СП 63.13330.2012:

Требуется выполнить поверочный расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента из бетона кл. В25, арматура А400, диаметром 12 мм, используем для этого MS Excel, исходные данные для построения диаграммы и для расчета отображены в таблице 12.

Таблица 12 – Исходные данные для построения диаграммы и для расчета

Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	18	см	A_s	2,16	см	R_b	145	кг/см ²
b	12	см	A_s'	2,16	см	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	210	см	σ_s	3500	кг/см ²	ϵ_{bt1}	0,00008	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	ϵ_{bt0}	0,0001	
			ϵ_{s1}	0,00175		ϵ_{bt2}	0,00015	
			ϵ_{s2}	0,025		ϵ_b	0,00015	
						E_b	300000	кг/см ²
						h_0	16	см
						a_{3c}	2	см
						a_{3c}'	2	см
						$\epsilon_{b1, red}$	0,0015	
						v_0	1	0,48822
						w_1	1,404609	0,326405
						w_2	-0,40461	0,673595
						$\epsilon^{\wedge}_B = \epsilon R$	0,00203	
						λ	1	
						v^{\wedge}_B	0,238156	
						η_d	0,073911	
						k	0,85	
						$\sigma_{b,max}$	123,25	

Продолжение таблицы 12

1	2	3	4	5	6	7	8	9
						ε_{b2}	0,00352	
				$v_{B,max}^{\wedge}$	0,116706	n	0,85	

Далее строим криволинейную диаграмму, построение диаграммы отобразено в таблице 13.

Таблица 13 – Построение криволинейной диаграммы по СП 63.13330.2012

η_d	ε_b	A	B	C	v_b	Σ	σ_b
2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0,00	0
0,1	0,00020	0,05437	0,0076	0,029703	0,812316	0,00	49,45735
0,2	0,00041	0,047325	-0,01182	0,029703	0,677176	0,00	82,45885
0,3	0,00061	0,035583	-0,03123	0,029703	0,574727	0,00	104,9757
0,4	0,00081	0,019144	-0,05065	0,029703	0,494165	0,00	120,3477
0,5	0,00101	-0,00199	-0,07006	0,029703	0,429184	0,00	130,6529
0,6	0,00122	-0,02782	-0,08948	0,029703	0,375893	0,00	137,3163
0,7	0,00142	-0,05835	-0,10889	0,029703	0,331744	0,00	141,3861
0,8	0,00162	-0,09358	-0,12831	0,029703	0,294935	0,00	143,6557
0,9	0,00183	-0,1335	-0,14772	0,029703	0,264103	0,00	144,7179
1,0	0,00203	-0,17812	-0,16714	0,029703	0,238156	0,00	145
1,1	0,00223	0,107685	0,021669	0,00033	0,215436	0,00	144,2833
1,2	0,00244	0,117373	0,021183	0,00033	0,194887	0,00	142,387
1,3	0,00264	0,127903	0,020696	0,00033	0,176426	0,00	139,6405
1,4	0,00284	0,139276	0,02021	0,00033	0,159915	0,00	136,3085
1,5	0,00304	0,151491	0,019724	0,00033	0,145192	0,00	132,5989
1,6	0,00325	0,164549	0,019238	0,00033	0,132086	0,00	128,6714
1,7	0,00345	0,178449	0,018752	0,00033	0,120427	0,00	124,6466
1,73456	0,00352	0,183449	0,018584	0,00033	0,116706	0,00	123,25

Построение диаграммы с учетом восходящей и нисходящей ветви, выполнено исходя из того, что задаемся уровнем деформаций η_d , исходя из которого определяем деформации, из квадратного уравнения вычисляем коэффициент изменения текущего модуля и вычисляем напряжения.

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 19.

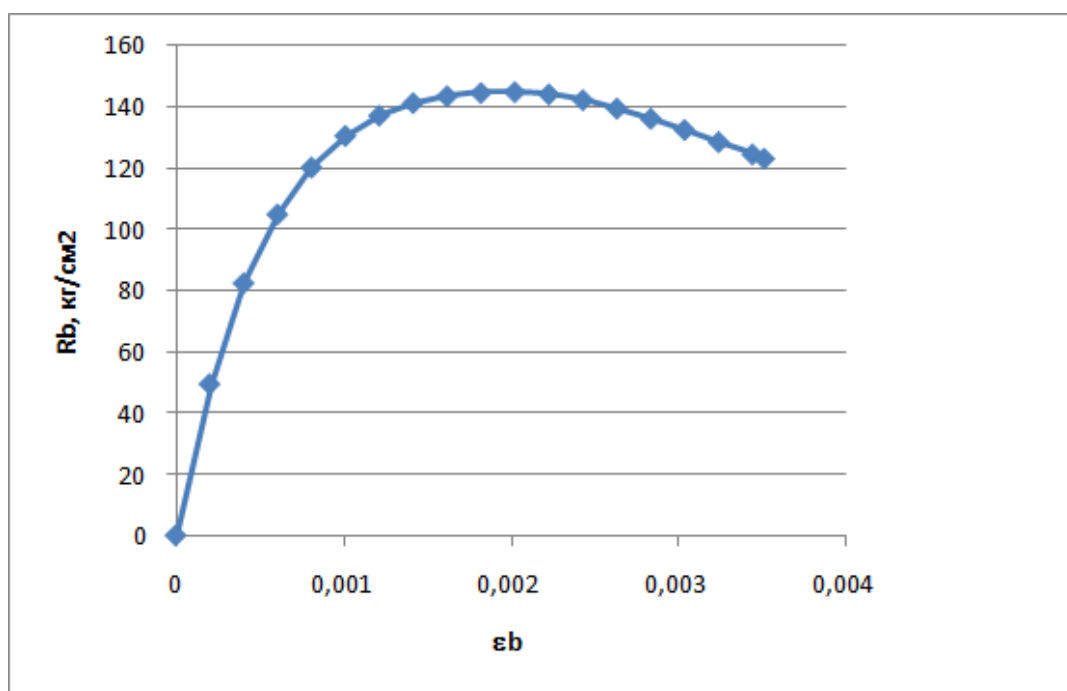


Рисунок 19 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности изгибаемого элемента, расчет площадей представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет площадей диаграммы

$\varepsilon_j = \varepsilon_i - \varepsilon_{1/2}$	A	B	C	v_B	Σ	σ_B	N_{bd}	S_{bd}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00010	0,0561	0,017308	0,029703	0,897769	0	27,33006	0,00554	0,000001
0,00030	0,0514	-0,00211	0,029703	0,739713	0	67,55543	0,01371	0,000004
0,00050	0,0420	-0,02152	0,029703	0,622681	0	94,77892	0,01923	0,000010
0,00071	0,0279	-0,04094	0,029703	0,532178	0	113,4047	0,02301	0,000016
0,00091	0,0091	-0,06035	0,029703	0,460011	0	126,0336	0,02557	0,000023
0,00111	-0,0143	-0,07977	0,029703	0,401259	0	134,3674	0,02727	0,000030
0,00131	-0,0425	-0,09919	0,029703	0,352801	0	139,6206	0,02833	0,000037
0,00152	-0,0753	-0,1186	0,029703	0,312515	0	142,7046	0,02896	0,000044
0,00172	-0,1129	-0,13802	0,029703	0,278846	0	144,3075	0,02928	0,000051
0,00192	-0,1552	-0,15743	0,029703	0,250579	0	144,9353	0,02941	0,000057
0,00213	0,10315	0,021912	0,00033	0,226522	0	144,8124	0,02938	0,000063
0,00233	0,11242	0,021426	0,00033	0,204894	0	143,4605	0,02911	0,000068

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00253	0,1225	0,02094	0,00033	0,185403	0	141,1021	0,0286	0,000073
0,00274	0,1334	0,020453	0,00033	0,167936	0	138,0335	0,0280	0,000077
0,00294	0,1452	0,019967	0,00033	0,152341	0	134,4899	0,0136	4,02E-05
0,0031	0,1579	0,019481	0,00033	0,138448	0	130,65	0,0132	4,17E-05
0,0033	0,1713	0,018995	0,00033	0,126086	0	126,66	0,0128	4,3E-05
0,0034	0,1762	0,018827	0,00033	0,12214	0	125,27	0,0127	4,35E-05
0,0021	0,0561	0,017308	0,02970	0,897769	0	27,330	0,0055	0,000001
							0,3979	0,000722

Далее выполняем итерационный процесс, условие равновесия выполняется на 9й итерации, пример последней итерации представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Итерационный процесс

ε_b	ε_s	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	ε_s'	A, кг	B, кг	C, кг	$\Sigma, \text{кг}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00352	0,01740	0,001308	2,69	0,00090	3651,77	3908,23	7560,00	0,00000

Далее выполняем расчет прочности по формулам главы 2 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет прочности изгибаемого железобетонного элемента

$N_{b,d} = \Sigma \Delta \varepsilon_i \bar{\sigma}_i$	$S_{b,d}$	$z_b, \text{см}$	$z_s', \text{см}$	$z_s, \text{см}$	$N_b b z_b$	$\bar{\sigma}_s A_s z_s$	$\bar{\sigma}'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,397978	0,000722	1,39	0,69	13,31	5063,514	100610,2	2703,579	108377,3405 кг*см
								10,83 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 17.

Таблица 17 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	85	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	10,7	10,76	10,84	10,9	10,96	11,02	11,1

Кл. В	50	55	60	70	80	90	100
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	275	300	330	370	410	440	475
M_{ult}	11,16	11,23	11,3	11,39	11,49	11,5	11,56

- Криволинейная диаграмма по СНБ 05.03.01-02:

Требуется выполнить поверочный расчет прочности железобетонного изгибаемого элемента из бетона кл. В25, арматура А400, диаметром 12 мм, используем для этого MS Excel, построение диаграммы отображено в таблице 18.

Таблица 18 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02

Исходные данные:							
f_{ck}	145 кг/см ²	$E_{cm,n}$	300000,0 кг/см ²	k_u	0,8	ϵ_{c1}	0,0022 0
ϵ_{cu}	0,00350	σ_{cu}	116 кг/см ²	$0,4f_{ck}$	58 кг/см ²	k	5,0069
Построение диаграммы							
$\eta=\epsilon_c/\epsilon_{c1}$	ϵ_c	$\Delta\epsilon_c$	σ_c	$\Delta\sigma_{ci}$	$N_{c,d}$	ϵ_{ci}	$S_{c,d}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00000	0	0,00	0	0	0	0
0,1	0,00022	0,00022	54,70	27,35	0,006017	0,00011	0,000001
0,2	0,00044	0,00022	87,05	70,88	0,015593	0,00033	0,000005
0,3	0,00066	0,00022	107,65	97,35	0,021417	0,00055	0,000012

Продолжение таблицы 18

1	2	3	4	5	6	7	8
0,4	0,00088	0,00022	121,30	114,47	0,025184	0,00077	0,000019
0,5	0,00110	0,00022	130,52	125,91	0,027700	0,00099	0,000027
0,6	0,00132	0,00022	136,73	133,62	0,029397	0,00121	0,000036
0,7	0,00154	0,00022	140,80	138,76	0,030528	0,00143	0,000044
0,8	0,00176	0,00022	143,30	142,05	0,031250	0,00165	0,000052
0,9	0,00198	0,00022	144,61	143,95	0,031670	0,00187	0,000059
1	0,00220	0,00022	145,00	144,80	0,031857	0,00209	0,000067
1,0556	0,00232	0,00012	144,89	144,95	0,017741	0,00226	0,000040
					0,268354		0,000361

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 20.

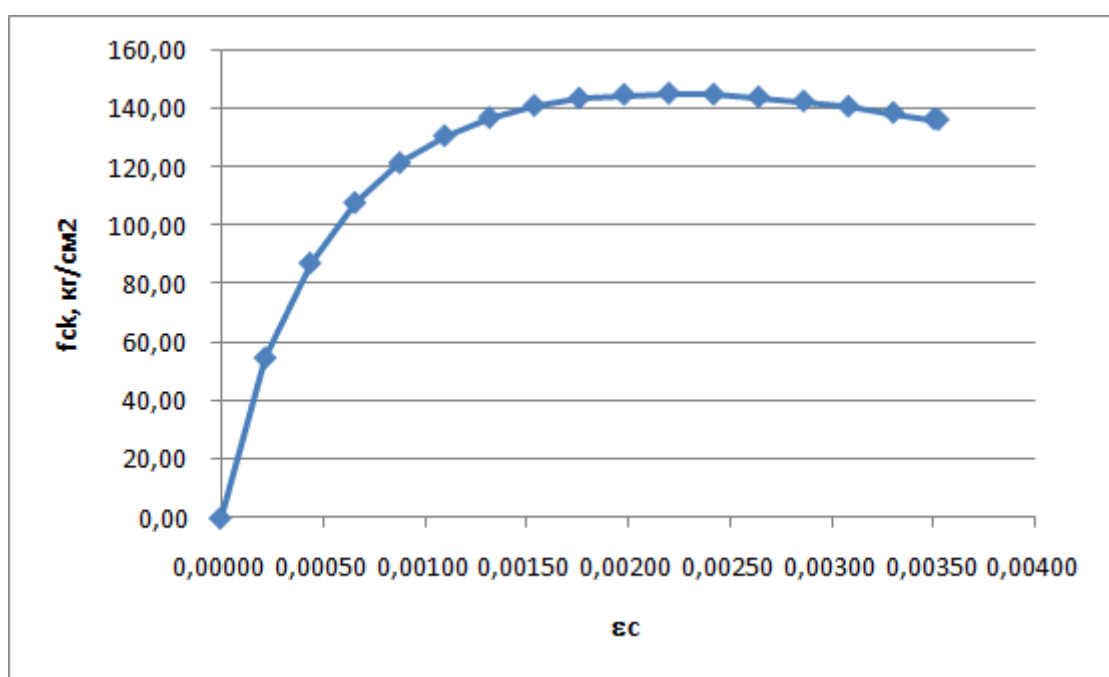


Рисунок 20 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности изгибаемого элемента, расчетные характеристики для выполнения поверочного расчета представлены в таблице 19.

Расчет ведется с применением итерационного процесса, до получения равновесия.

Таблица 19 – Исходные данные для расчета

Исходные данные:								
Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	18,0	см	A_s	2,16	см ²	R_b	145	кг/см ²
b	12,0	см	A_s'	2,16	см ²	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	210,0	см	σ_s	3500	кг/см ²	$E_{cm,n}$	300000	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	E_{cl}	0,00200	
			ε_s	0,01		E_{cu}	0,00350	
			R_s	3500	кг/см ²	h_0	16,00	см
						a_s, a_s'	2,00	см

Далее выполняем условие равновесия с применением итерационного процесса (метода приближения), пример итерационного процесса выполнен по формулам главы 2 и представлен в таблице 20.

Таблица 20 – Итерационный процесс

ε_c	ε_s	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	ε_s'	A, кг	B, кг	C, кг	$\Sigma, \text{кг}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00350	0,0100	0,00084	4,15	0,00181	6185,8	7830	7560,0	6455,82
0,00345	0,0100	0,00084	4,10	0,00177	6208,8	7641	7560,0	6289,81
0,00340	0,0100	0,00083	4,06	0,00173	6231,9	7452	7560,0	6123,98
0,00335	0,0100	0,00083	4,01	0,00168	6255,3	7263	7560,0	5958,32
0,00330	0,0100	0,00083	3,97	0,00164	6278,8	7074	7560,0	5792,84
0,00325	0,0100	0,00082	3,92	0,00159	6302,5	6885	7560,0	5627,53
0,00320	0,0100	0,00082	3,88	0,00155	6326,4	6696	7560,0	5462,41
0,00315	0,0100	0,00082	3,83	0,00151	6350,4	6507	7560,0	5297,46
0,00232	0,0100	0,00077	3,02	0,00078	4181,3	3378	7560,0	0,000

Условие равновесия выполнено на 9й итерации, далее выполняем расчет прочности по формулам главы 2 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 21.

Таблица 21 – Расчет прочности изгибаемого железобетонного элемента

$N_{c,d} = \sum \Delta \varepsilon_{ci}$ σ_{ci}	$S_{c,d}$	z_c , см	z_s' , см	z_s , см	$N_{cb} z_c$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,268354	0,000361	1,75	1,02	12,98	7305,84	98162,7	3431,09	108899,632 3 кг*см
								10,89 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 22.

Таблица 22 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7
R_b	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	10,82	10,89	10,95	11,01	11,06	11,12

Кл. В	50	55	70	80	90	100
-	8	9	10	11	12	13
R_b	275	300	370	410	440	475
M_{ult}	11,17	11,21	11,31	11,36	11,39	11,42

В целом можно заметить, что результаты расчетов с использованием различных диаграмм дают вполне близкие результаты, что также свидетельствует о целесообразности применения различных диаграмм материалов наравне с традиционным методом расчета. Предложенные методики могут быть в дальнейшем реализованы при проведении поверочных расчетов изгибаемых железобетонных элементов.

2.3.4 Расчет по криволинейным диаграммам по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02 с новыми интегральными параметрами

- Криволинейная диаграмма по СП 63.13330.2012:

Требуется выполнить поверочный расчет прочности ж/б изгибаемого элемента из бетона кл. В25, арматура А400, диаметром 12 мм, используем для этого MS Excel, исходные данные для построения диаграммы и для расчета отображены в таблице 23.

Таблица 23 – Исходные данные для построения диаграммы и для расчета

Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	18	см	A_s	2,16	см	R_b	145	кг/см ²
b	12	см	A_s'	2,16	см	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	210	см	σ_s	3500	кг/см ²	ε_{bt1}	0,00008	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	ε_{bt0}	0,0001	
			ε_{s1}	0,00175		ε_{bt2}	0,00015	
			ε_{s2}	0,025		ε_b	0,00015	
						E_b	300000	кг/см ²
						h_0	16	см
						a_{3c}	2	см
						a_{3c}'	2	см
						$\varepsilon_{b1, red}$	0,0015	
						v_0	1	0,471384
						w_1	1,425142	0,310389
						w_2	-0,42514	0,689611
						$\varepsilon^{\wedge}_B = \varepsilon R$	0,00210	
						λ	1	
						v^{\wedge}_B	0,229943	
				ε_{b2}	0,00353	η_d	0,071362	
				$v^{\wedge}_{B, max}$	0,112174	k	0,85	
				n	0,85	$\sigma_{b, max}$	127,15	

Далее строим криволинейную диаграмму, построение диаграммы отображено в таблице 24.

Таблица 24 – Построение криволинейной диаграммы по СП 63.13330.2012 (с новыми параметрами)

η_d	ε_b	A	B	C	ν_b	Σ	σ_b
1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	0,00021	0,05035	0,00488	0,02855	0,80315178	0,0	50,6459744
0,2	0,00042	0,04279	-0,01455	0,02855	0,66444546	0,0	83,7985762
0,3	0,00063	0,03018	-0,03398	0,02855	0,56092486	0,0	106,114138
0,4	0,00084	0,01253	-0,05341	0,02855	0,48047320	0,0	121,192702
0,5	0,00105	-0,01015	-0,07285	0,02855	0,41617154	0,0	131,216874
0,6	0,00126	-0,03788	-0,09228	0,02855	0,36381748	0,0	137,651872
0,7	0,00147	-0,07066	-0,11171	0,02855	0,32069148	0,0	141,557462
0,8	0,00168	-0,10847	-0,13114	0,02855	0,28489901	0,0	143,723649
0,9	0,00189	-0,15133	-0,15057	0,02855	0,25502177	0,0	144,732838
1,0	0,00210	-0,19923	-0,17001	0,02855	0,22994326	0,0	145,0
1,1	0,00231	0,99733					144,613639
1,2	0,00252	0,98934					143,454557
1,3	0,00273	0,97601					141,522754
1,4	0,00294	0,95736					138,818230
1,5	0,00315	0,93338					135,340985
1,6	0,00336	0,90407					131,091019
1,6796	0,00353	0,87692					127,153846

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 21.

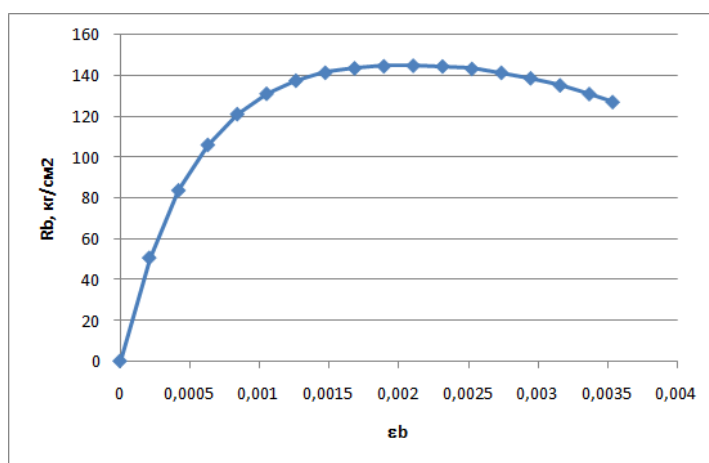


Рисунок 21 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности изгибаемого элемента, расчет площадей представлен в таблице 25.

Таблица 25 – Расчет площадей диаграммы

$\varepsilon_j = \varepsilon_i - \varepsilon_{1/2}$	A	B	C	v_B	Σ	σ_B	N_{bd}	S_{bd}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,000105	0,05224	0,014	0,0285	0,8921600	0	28,129375	0,00591	0,000001
0,000315	0,04720	-0,004	0,0285	0,7283235	0	68,891067	0,01448	0,000005
0,000525	0,03711	-0,024	0,0285	0,6092090	0	96,040335	0,02018	0,000011
0,000736	0,02199	-0,043	0,0285	0,5183319	0	114,39927	0,02404	0,000018
0,000946	0,00182	-0,063	0,0285	0,4466116	0	126,73305	0,02663	0,000025
0,001156	-0,0233	-0,082	0,0285	0,38869614	0	134,80941	0,02833	0,00003
0,001366	-0,0536	-0,101	0,0285	0,34123352	0	139,86606	0,02939	0,00004
0,001576	-0,0889	-0,121	0,0285	0,30197570	0	142,81722	0,03002	0,00004
0,001787	-0,1292	-0,140	0,0285	0,26929657	0	144,34344	0,03034	0,00005
0,001997	-0,1746	-0,160	0,0285	0,2419433	0	144,9387	0,03046	0,00006
0,002207	0,99933					144,90340	0,03045	0,00006
0,002417	0,99400					144,13068	0,03029	0,00007
0,002627	0,98334					142,58524	0,02997	0,00007
0,002838	0,96735					140,26708	0,02948	0,00008
0,003048	0,94604					137,17619	0,02883	0,00008
0,003258	0,91939					133,31259	0,02802	0,00009
0,003447	0,890922					129,18368	0,02162	0,00007
							0,438517	0,000851

Далее выполняем итерационный процесс, условие равновесия выполняется на 9й итерации, пример последней итерации представлен в таблице 26.

Таблица 26 – Итерационный процесс

ε_b	ε_s	$\chi, \text{см}^{-1}$	x, см	ε_s'	A, кг	B, кг	C, кг	Σ , кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00353	0,00482	0,00052	6,76	0,00249	10082,04	10742,39	20824,42	0,000

При достижении равновесия итерации прекращаются, получаются фактические деформации и значения усилий в бетоне и арматуре.

Далее выполняем расчет прочности по формулам главы 2 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 27.

Таблица 27 – Расчет прочности изгибаемого железобетонного элемента

$N_{b,d}=\Sigma\Delta\varepsilon_i\sigma_i$	$S_{b,d}$	$z_b,$ см	$z_s',$ см	$z_s,$ см	$N_b b z_b$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,438517	0,000851	3,72	4,76	9,24	37467,055	70819,4	51179,826	159466,31 кг*см
								15,95 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 28.

Таблица 28 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	85	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	15,05	15,41	15,95	16,15	16,68	16,98	17,19

Кл. В	50	55	60	70	80	90	100
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	275	300	330	370	410	440	475
M_{ult}	17,83	18,01	18,54	18,93	19,1	19,51	19,95

- Криволинейная диаграмма по СНБ 05.03.01-02:

Требуется выполнить поверочный расчет прочности ж/б изгибаемого элемента из бетона кл. В25, арматура А400, диаметром 12 мм, используем для этого MS Excel, построение диаграммы отображено в таблице 29.

Таблица 29 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02

Исходные данные:							
f_{ck}	133,3 кг/см ²	$E_{cm,n}$	320000,0 кг/см ²	k_u	0,8	ϵ_{c1}	0,00207
ϵ_{cu}	0,00353	σ_{cu}	106,64 кг/см ²	$0,4f_{ck}$	53,32 кг/см ²	k	5,4654
f_{ct}	98						
Построение диаграммы							
$\eta=\epsilon_c/\epsilon_{c1}$	ϵ_c	$\Delta\epsilon_c$	σ_c	$\Delta\sigma_{ci}$	$N_{c,d}$	ϵ_{ci}	$S_{c,d}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00000	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,00021	0,00021	53,11	26,56	0,005497	0,00010	0,000001
0,2	0,00041	0,00021	82,91	68,01	0,014077	0,00031	0,000004
0,3	0,00062	0,00021	101,28	92,09	0,019061	0,00052	0,000010
0,4	0,00083	0,00021	113,19	107,23	0,022194	0,00072	0,000016
0,5	0,00103	0,00021	121,11	117,15	0,024246	0,00093	0,000023
0,6	0,00124	0,00021	126,37	123,74	0,025610	0,00114	0,000029
0,7	0,00145	0,00021	129,80	128,09	0,026510	0,00135	0,000036
0,8	0,00166	0,00021	131,89	130,84	0,027081	0,00155	0,000042
0,9	0,00186	0,00021	132,98	132,43	0,027409	0,00176	0,000048
1	0,00207	0,00021	133,30	133,14	0,027556	0,00197	0,000054
1,1	0,00228	0,00021	133,02	133,16	0,027561	0,00217	0,000060
1,2	0,00248	0,00021	132,27	132,64	0,027454	0,00238	0,000065
1,3	0,00269	0,00021	131,12	131,69	0,027257	0,00259	0,000071
1,4	0,00290	0,00021	129,66	130,39	0,026987	0,00279	0,000075
1,5	0,00310	0,00021	127,92	128,79	0,026656	0,00300	0,000080
1,6	0,00331	0,00021	125,97	126,95	0,026274	0,00321	0,000084
1,7	0,00352	0,00021	123,82	124,89	0,025850	0,00342	0,000088
1,8	0,00373	0,00021	121,51	122,67	0,025389	0,00362	0,000092
					0,408139		0,000789

Построение диаграммы с учетом восходящей и нисходящей ветви, выполнено исходя из того, что задаемся уровнем деформаций ηd , исходя из которого определяем деформации, из квадратного уравнения вычисляем коэффициент изменения секущего модуля и вычисляем напряжения.

И строим диаграмму в соответствии с рисунком 22.

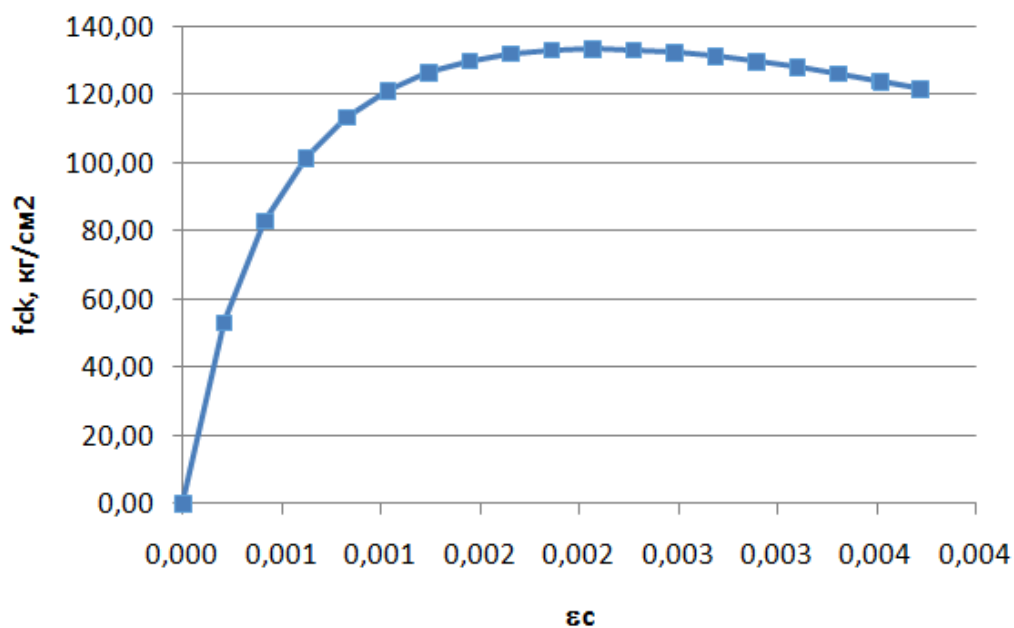


Рисунок 22 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности изгибаемого элемента, расчетные характеристики для выполнения поверочного расчета представлены в таблице 30.

Таблица 30 – Исходные данные для расчета

Исходные данные:								
Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	18,0	см	A_s	2,16	см ²	R_b	145	кг/см ²
b	12,0	см	A_s'	2,16	см ²	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	210,0	см	σ_s	3500	кг/см ²	$E_{cm,n}$	300000	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	E_{cl}	0,00200	
			ϵ_s	0,01		E_{cu}	0,00350	
			R_s	3500	кг/см ²	h_0	16,00	см
						a_s, a_s'	2,00	см
						f_{cm}	28	МПа

Далее выполняем условие равновесия с применением итерационного процесса (метода приближения), пример итерационного процесса выполнен по формулам главы 2 и представлен в таблице 31.

Таблица 31 – Итерационный процесс

ε_c	ε_s	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	ε_s'	A, кг	B, кг	C, кг	$\Sigma, \text{кг}$
2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,00350	0,0100	0,000844	4,15	0,00181	3541,4	7830	7560,0	3811,47
0,00345	0,0100	0,000841	4,10	0,00177	3554,6	7641	7560,0	3635,64
0,00340	0,0100	0,000838	4,06	0,00173	3567,9	7452	7560,0	3459,90
0,00335	0,0100	0,000834	4,01	0,00168	3581,2	7263	7560,0	3284,27
0,00330	0,0100	0,000831	3,97	0,00164	3594,7	7074	7560,0	3108,73
0,00325	0,0100	0,000828	3,92	0,00159	3608,3	6885	7560,0	2933,30
0,00320	0,0100	0,000825	3,88	0,00155	3621,9	6696	7560,0	2757,96
0,00315	0,0100	0,000822	3,83	0,00151	3635,7	6507	7560,0	2582,73
0,00241	0,0100	0,000776	3,11	0,00086	3852,7	3707	7560,0	0,00000

Условие равновесия выполнено на 9й итерации, далее выполняем расчет прочности по формулам главы 2 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 32.

Таблица 32 – Расчет прочности изгибаемого железобетонного элемента

$N_{c,d} = \Sigma \Delta \varepsilon_{ci}$ σ_{ci}	$S_{c,d}$	$z_c, \text{см}$	$z_s', \text{см}$	$z_s, \text{см}$	$N_{cb} z_c$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,249010	0,000470	2,43	1,11	12,89	9372,46	97475,0	4101,98	110949,512 кг*см
								11,09 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 33, и демонстрирует изменение разрушающего момента.

Таблица 33 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	80	106,7	133,3	166,7	186,7	213,3	233,3
M_{ult}	10,02	10,82	11,09	11,82	12,33	13,21	13,95

Кл. В	50	55	60	75	85	95	105
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	266,7	300	333	392	426	476	502
M_{ult}	14,36	14,8	15,48	16,04	16,91	17,53	18,58

2.3.5 Расчет по методу предельных усилий

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 34.

Таблица 34 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	85	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	12,1	12,1	12,1	12,21	12,39	12,53	12,66

Кл. В	50	55	60	70	80	90	100
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	275	300	330	370	410	440	475
M_{ult}	12,74	12,81	12,89	12,96	13,03	13,07	13,11

Значения разрушающего момента получаются близкими, что свидетельствует о целесообразности применяемых методик.

Выводы по второй главе

В данной главе были произведены расчеты изгибаемых железобетонных элементов по нормированным диаграммам и по уточненным диаграммам (по отечественным и зарубежным нормам). Выполнен расчет по методу предельных усилий. Исходя из выполненных расчетов можно судить о целесообразности применения диаграмм и расчетов по деформационной модели, т.к. полученные результаты расчетов близки к данным полученным в результате расчетов по традиционному методу (метод предельных усилий).

Также можно сказать что выполненные расчеты прочности по предложенной методике с применением нелинейной деформационной модели значительно проще и точнее в сравнении с традиционным методом расчета, так как традиционный метод расчета прибегает к упрощенной (прямоугольной) эпюре, которая не точно отражает работу материала. В отличии от применения в качестве эпюр очертание диаграмм.

Глава 3 Расчет прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели

При расчете внецентренно сжатых элементов может возникнуть 2 случая, в соответствии с рисунком 23. Случай 1. Когда $N < N_b$, этот случай возникает при больших эксцентриситетах и Случай 2. Когда $N > N_b$, данный случай возникает при малых эксцентриситетах.

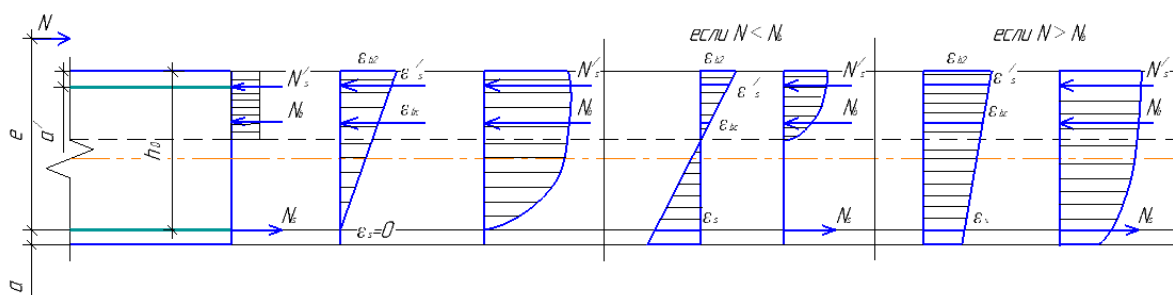


Рисунок 23 – Расчетная схема внецентренно сжатого железобетонного элемента

3.1 Методика расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели

Заключается в том что [17], в поперечном прямоугольном сечении внецентренно сжатого железобетонного элемента с арматурой расположенной в растянутой зоне арматурой площадью A_s и в сжатой зоне площадью A'_s расчетная схема усилий в нормальном сечении с трещиной включают в себя: усилие N_s - в продольной арматуре, расположенной в зоне растяжения; усилие N_b - в бетоне зоны сжатия, приложенных в центре тяжести эпюр напряжений; усилие N'_s - в продольной арматуре, расположенной в сжатой зоне и N – продольная сила. Для выполнения условия равновесия, уравнение записывают, в соответствии с формулой (33):

$$N_b + N_s' - N_s - N = 0 \quad (33)$$

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 распространения относительных деформаций по высоте элемента следуют соотношения, в соответствии с формулой (34).

$$\frac{1}{\rho} = \chi = \frac{\varepsilon_{sn}}{h_0 - x} = \frac{\varepsilon_{bn}}{x} = \frac{\varepsilon_{bn} + \varepsilon_{sn}}{h_0} \quad (34)$$

где h_0 – рабочая высота сечения;

x - высота сжатой зоны;

ε_{bn} - относительные деформации на крайнем волокне бетона сжатой зоны;

χ - кривизна элемента;

ρ - радиус кривизны;

ε_{sn} - относительные деформации в растянутой арматуре.

В области диаграммы, ограниченной максимальными деформациями бетона ε_{bn} (в расчетах на прочность $\varepsilon_{bn} = \varepsilon_{b2}$), при помощи численного моделирования 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 $\sigma_{b,i}$ 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 расположенным в зоне сжатия в предельном состоянии для полоски единичной ширины ($b=1$), определяется путем численного суммирования усилий, действующих в пределах каждого элементарного участка, в соответствии с формулой (35).

$$N_b = N_{b,d} / \chi \quad (35)$$

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, использованную на деформацию образца при нагрузке до их максимальных значений, она равна сумме площадей участков в области, ограниченной ветвями диаграмм бетона на сжатие и максимальным значением деформаций ε_{bn} . С учетом полученных зависимостей уравнение равновесия для элемента шириной сечения b запишется, в соответствии с формулой (36).

$$\frac{N_{b,d} b}{\chi} + \sigma'_s A'_s - \sigma_s A_s - N = 0 \quad (36)$$

Деформации арматуры вычисляются, в соответствии с формулой (37):

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{bn} - \chi a', \varepsilon_s = \chi h_0 - \varepsilon_{bn} \quad (37)$$

Уравнение равновесия определяют (36) методом аппроксимирования. При первом аппроксимировании 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 используемыми в уравнении (36) знаками перед слагаемыми в левой части уравнения по результатам вычисления могут возникнуть два случая: 1 – левая часть уравнения (36) больше нуля, данная ситуация говорит о том что сечение не до

армированное; 2 – левая часть уравнений (36) меньше нуля, в данном случае это будет означать что сечение пере армированное.

При реализации первого случая необходимо при постоянных значениях деформаций арматуры ε_{s2} уменьшать деформации бетона 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 (33). 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 (33):

$$\sum N_{b.s} \leq 0,0001 \quad (38)$$

При возникновении второго случая, т.е. когда левая часть уравнения оказалась меньше нуля, алгоритм проверки уравнения равновесия (38) 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 (38) по $\varepsilon_s^{(k)}$.

Условие прочности сечений элементов подверженных внецентренному сжатию записывается в виде $N \cdot e \leq M_{ult}$, где $N \cdot e$ – изгибающий момент от продольной силы; 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, в соответствии с формулами (39)

$$\begin{aligned}
z_s' &= \frac{\varepsilon_b^{(k)} - a' \chi^{(k)}}{\chi^{(k)}}; \\
z_s &= \frac{\chi^{(k)} h_0 - \varepsilon_b^{(k)}}{\chi^{(k)}}; \\
z_b &= \frac{S_{b,d}}{\chi^{(k)} N_{b,d}} = \frac{\varepsilon_{b,c}}{\chi^{(k)}}
\end{aligned} \tag{39}$$

где z_s – расстояние от усилия в растянутой арматуре до нейтральной оси;

z_s' – расстояние от усилия в сжатой арматуре до нейтральной оси;

z_b – расстояние от усилия в бетоне до нейтральной оси.

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 σ_b ;

$\varepsilon_{b,c} = S_{b,d} / N_{b,d}$ – расстояние от оси напряжений σ_b бетона до центра тяжести диаграммы;

$\chi^{(k)}$ – кривизна элемента после выполнения условия (38) на k -ой итерации.

Уравнение для вычисления предельного изгибающего момента примет вид, в соответствии с формулой (40):

$$M_{ult} = N_b \cdot z_b + N_s \cdot z_s + N_s' \cdot z_s' - N \cdot e \tag{40}$$

где используются значения: $\varepsilon_{bu} = \varepsilon_b^{(k)}$ – для первого случая, $\varepsilon_{su} = \varepsilon_s^{(k)}$ – для второго случая, $\chi^{(k)}$, полученные на последних циклах итераций, после выполнения условия (38).

В общем виде расчет, можно представить в виде блок-схемы, в соответствии с рисунком 24.

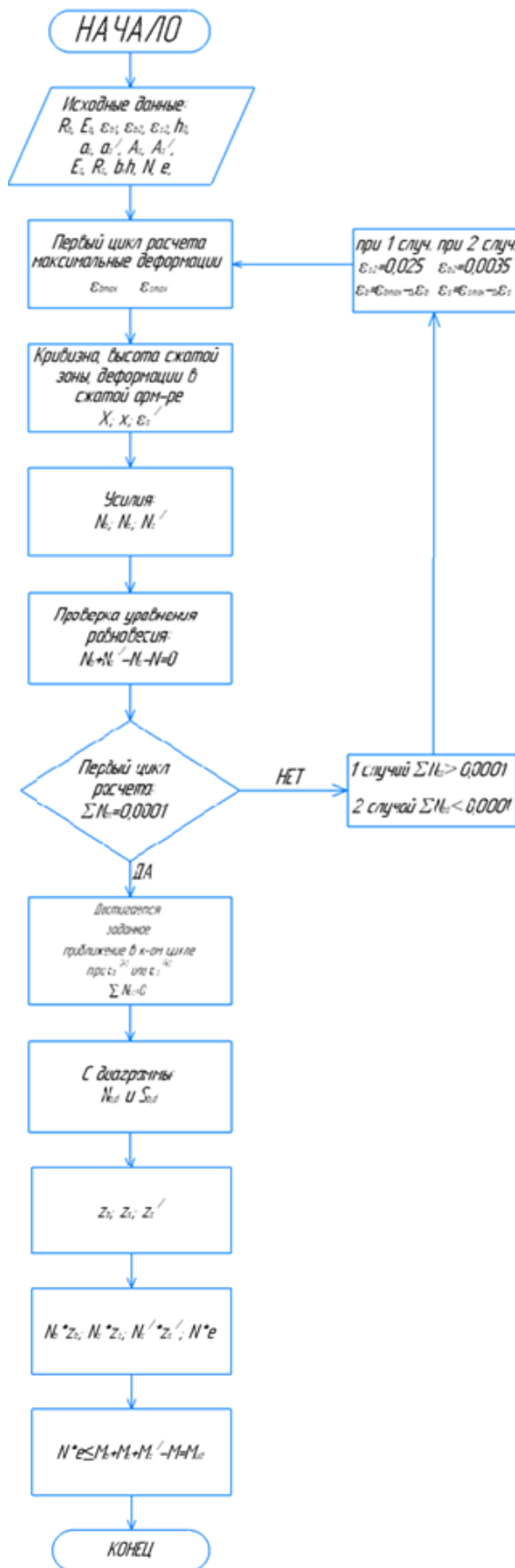


Рисунок 24 – Блок-схема расчета внецентренно сжатого железобетонного элемента по деформационной модели

3.2 Методика расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов по методу предельных усилий

При выполнении поверочных расчетов прочности сечений внецентренно сжатых элементов по СП 63.13330.2012 [5] производят, в соответствии с формулой (41).

$$N \cdot e < R_b \cdot b \cdot x(h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_s(h_0 - a') \quad (41)$$

где N – продольная сила от внешней нагрузки;

e - расстояние от точки приложения продольной силы N до центра тяжести сечения растянутой арматуры.

при этом высоту сжатой зоны x определяют, в соответствии с формулой (42).

$$x = \frac{N + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b} \quad (42)$$

В целом предложенная методика расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов не значительно отличается от расчета изгибаемых элементов, в большей части все отличие в учете продольной силы и эксцентриситета приложения нагрузки. Сама методика расчета по деформационной модели значительно проще чем расчет по традиционному методу расчета.

3.3 Примеры расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели по СП 63.13330.2012, СНБ 5.03.01-02 и методу предельных усилий

3.3.1 Расчет с применением двухлинейной диаграммы по СП 63.13330.2012

Требуется выполнить поверочный расчет прочности железобетонного внецентренно сжатого элемента из бетона кл. В25, арматура А400, диаметром 25 мм, используем для этого MS Excel, построение диаграммы отображено в таблице 35.

Таблица 35 – Двухлинейная диаграмма деформирования бетона

Исходные данные:							
R_b	145 кг/см ²	$E_{b,red}$	96666,67	$\varepsilon_{b1,red}$	0,00150	ε_{b1}	0,00150
ε_{b2}	0,00350						
Построение диаграммы							
$\eta = \varepsilon_b / \varepsilon_{b1}$	ε_{bi}	$\Delta \varepsilon_{bi}$	σ_b	$\Delta \sigma_{bi}$	$N_{b,d}$	ε_{bi}	$S_{b,d}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00000	0,00015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,00015	0,00015	14,5	7,25	0,001088	0,00008	0,000000
0,2	0,00030	0,00015	29,0	21,75	0,003263	0,00023	0,000001
0,3	0,00045	0,00015	43,5	36,25	0,005438	0,00038	0,000002
0,4	0,00060	0,00015	58,0	50,75	0,007613	0,00053	0,000004
0,5	0,00075	0,00015	72,5	65,25	0,009788	0,00068	0,000007
0,6	0,00090	0,00015	87,0	79,75	0,011963	0,00083	0,000010
0,7	0,00105	0,00015	101,5	94,25	0,014138	0,00098	0,000014
0,8	0,00120	0,00015	116,0	108,75	0,016313	0,00113	0,000018
0,9	0,00135	0,00015	130,5	123,25	0,018488	0,00128	0,000024
1,0	0,00150	0,00015	145,0	137,75	0,020663	0,00143	0,000029

Продолжение таблицы 35

1	2	3	4	5	6	7	8
1,1	0,00165	0,00015	145,0	145,00	0,021750	0,00158	0,000034
1,2	0,00180	0,00015	145,0	145,00	0,021750	0,00173	0,000038
1,3	0,00195	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00188	0,000041
1,4	0,00210	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00203	0,000044
1,5	0,00225	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00218	0,000047
1,6	0,00240	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00233	0,000051
1,7	0,00255	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00248	0,000054
1,8	0,00270	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00263	0,000057
1,9	0,00285	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00278	0,000060
2,0	0,00300	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00293	0,000064
2,1	0,00315	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00308	0,000067
2,2	0,00330	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00323	0,000070
2,3	0,00345	0,00015	145,0	145,0	0,021750	0,00338	0,000073
2,33	0,00350	0,00015	145,0	145,0	0,007250	0,00348	0,000025
					0,39875		0,000833

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 24.

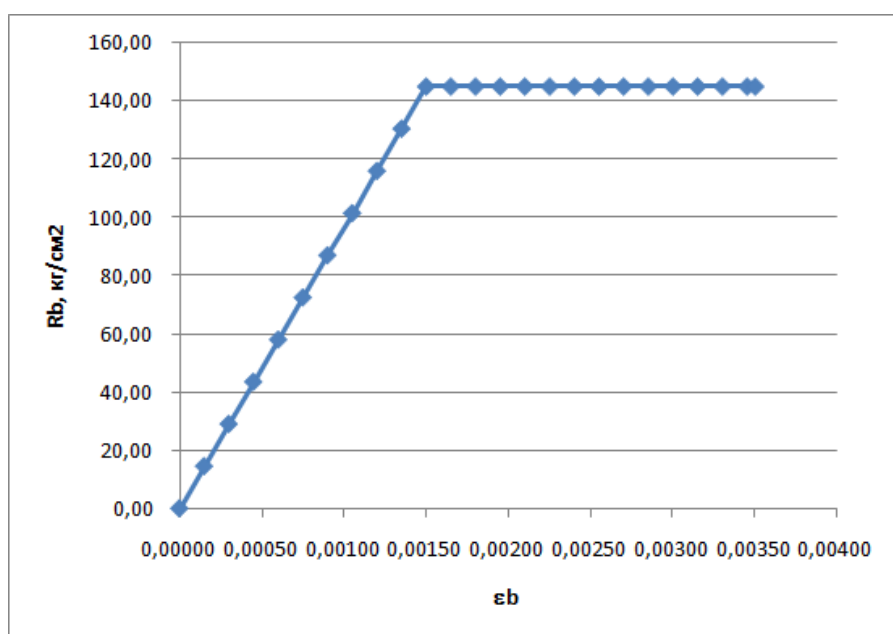


Рисунок 24 – Двухлинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности внецентренно сжатого элемента, расчетные характеристики для выполнения поверочного расчета представлены в таблице 36.

Таблица 36 – Исходные данные для расчета

Исходные данные:								
Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	60,0	см	A_s	9,82	см ²	R_b	145	кг/см ²
b	30,0	см	A_s'	9,82	см ²	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	360,0	см	σ_s	3500	кг/см ²	E_b	300000	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	ϵ_{b1}	0,00150	
			ϵ_{s2}	0,025		ϵ_{b2}	0,00350	
			R_s	3500	кг/см ²	h_0	16,00	см
			ϵ_{s0}	0,00175		a_s, a_s'	2,00	см
						$\epsilon_{b1,red}$	0,00150	
						$E_{b,red}$	96666,67	кг/см ²
						N	30000	кг/см ²
						e	18,35	см
						$N*e$	550500	кг*см
						M	55,05	кН*м

Далее выполняем условие равновесия с применением итерационного процесса (метода приближения), пример итерационного процесса выполнен по формулам главы 3 и представлен в таблице 37.

Таблица 37 – Итерационный процесс

$\epsilon_{b,max}$	$\epsilon_{s,max}$	$\chi, \text{см}^{-1}$	x, см	ϵ_s'	A, кг	B, кг	C, кг	$\Sigma, \text{кг}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0035	0,0250	0,00050	6,88	0,00146	23505	2875	34370	-12106,1
0,0035	0,0245	0,00050	7,00	0,00150	23925	2946	34370	-10985,0
0,0035	0,0240	0,00049	7,13	0,00154	24360	3016	34370	-9848,57

Продолжение таблицы 37

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0035	0,0235	0,00048	7,26	0,00157	24811	3086	34370	-8696,03
0,0035	0,0230	0,00047	7,40	0,00161	25279	3156	34370	-7526,47
0,0035	0,0225	0,00046	7,54	0,00164	25765	3226	34370	-6338,90
0,0035	0,0220	0,00045	7,69	0,00168	26270	3296	34370	-5132,2
0,0035	0,0210	0,00043	8,00	0,00175	27342	3437	34370	-2657,1
0,0035	0,0200	0,00042	8,34	0,00182	28506	3577	34370	-90,76
0,0035	0,0200	0,00041	8,35	0,00182	28548	3582	34370	0,00

Условие равновесия выполнено на 10й итерации, далее выполняем расчет прочности по формулам главы 3 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 38.

Таблица 38 – Расчет прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента

$N_{b,d} = \Sigma \Delta \varepsilon_{bi} \sigma_{bi}$	$S_{b,d}$	z_b , см	z'_s , см	z_s , см	$N_b b z_b$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,398750	0,000833	4,99	4,35	47,65	142409,2	1637636	155922	1385467 кг*см
								138,55 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 39.

Таблица 39 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	85	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	136,1	137,36	138,55	139,43	140,31	141,14	142,29

Кл. В	50	55	60	70	80	90	100
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	275	300	330	370	410	440	475
M_{ult}	143,15	144,23	145,31	146,45	147,63	148,22	149,53

3.3.2 Расчет с применением трехлинейной диаграммы по СП 63.13330.2012

Требуется выполнить поверочный расчет прочности железобетонного внецентренно сжатого элемента из бетона кл. В25, арматура А400, диаметром 25 мм, используем для этого MS Excel, построение диаграммы отображено в таблице 40.

Таблица 40 – Трехлинейная диаграмма деформирования бетона

Исходные данные:								
R_b	145 кг/см ²	E_b	300000,0	ε_{b0}	0,002	ε_{b1}	0,00029	
ε_{b2}	0,00350	σ_{b1}	87					
Построение диаграммы								
$\eta = \varepsilon_b / \varepsilon_{b1}$	ε_{bi}	$\Delta \varepsilon_{bi}$	σ_b	$\Delta \sigma_{bi}$	$N_{b,d}$	ε_{bi}	$S_{b,d}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	
0	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,006000	0,00010	0,000001	
0,1	0,00020	0,00020	60,00	30,00	0,015073	0,00030	0,000005	
0,2	0,00040	0,00020	90,73	75,37	0,018825	0,00050	0,000009	
0,3	0,00060	0,00020	97,51	94,12	0,020181	0,00070	0,000014	
0,4	0,00080	0,00020	104,30	100,91	0,021538	0,00090	0,000019	
0,5	0,00100	0,00020	111,08	107,69	0,022895	0,00110	0,000025	
0,6	0,00120	0,00020	117,87	114,47	0,024251	0,00130	0,000032	
0,7	0,00140	0,00020	124,65	121,26	0,025608	0,00150	0,000038	
0,8	0,00160	0,00020	131,43	128,04	0,026965	0,00170	0,000046	
0,9	0,00180	0,00020	138,22	134,82	0,028322	0,00190	0,000054	
1,0	0,00200	0,00020	145,00	141,61	0,029000	0,00210	0,000061	
1,1	0,00220	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00230	0,000067	
1,2	0,00240	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00250	0,000073	
1,3	0,00260	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00270	0,000078	
1,4	0,00280	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00290	0,000084	
1,5	0,00300	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00310	0,000090	

Продолжение таблицы 40

1	2	3	4	5	6	7	8
1,6	0,00320	0,00020	145,00	145,00	0,006000	0,00010	0,000001
1,7	0,00340	0,00020	145,00	145,00	0,029000	0,00330	0,000096
1,75	0,00350	0,00010	145,00	145,00	0,014500	0,00345	0,000050
					0,427158		0,000841

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 25.

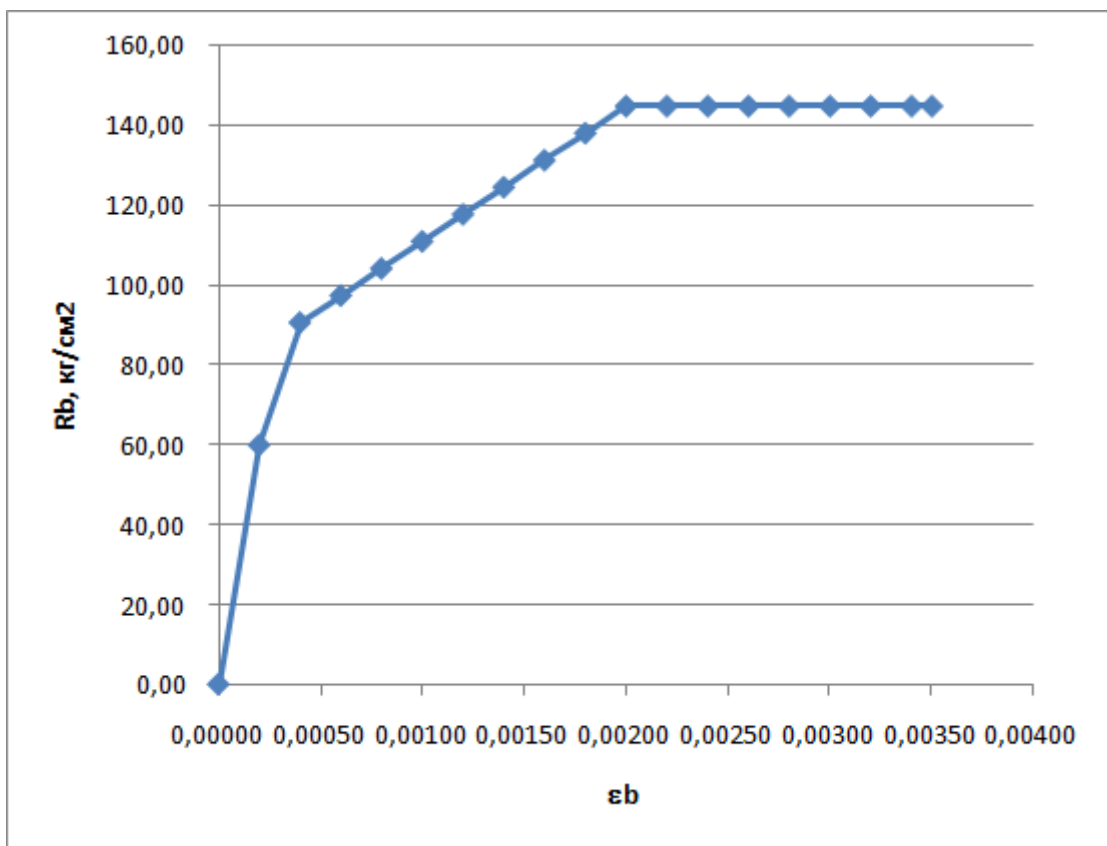


Рисунок 25 – Трехлинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности внецентренно сжатого элемента, расчетные характеристики для выполнения поверочного расчета представлены в таблице 41.

Таблица 41 – Исходные данные для расчета

Исходные данные:								
Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	60,0	см	A_s	9,82	см ²	R_b	145	кг/см ²
b	30,0	см	A_s'	9,82	см ²	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	360,0	см	σ_s	3500	кг/см ²	E_b	300000	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	ϵ_{b0}	0,00200	
			ϵ_s	0,01		ϵ_{b2}	0,00350	
			R_s	3500	кг/см ²	h_0	16,00	см
						a_s, a_s'	2,00	см
						ϵ_{b1}	0,00029	
						σ_{b1}	87	кг/см ²
						N	30000	кг/см ²
						e	18,09	см
						$N \cdot e$	542689,675	кг*см
						M	54,2689675	кН*м

Далее выполняем условие равновесия с применением итерационного процесса (метода приближения), пример итерационного процесса выполнен по формулам главы 3 и представлен в таблице 42.

Таблица 42 – Итерационный процесс

$\epsilon_{b,max}$	$\epsilon_{s,max}$	$\chi, \text{см}^{-1}$	x, см	ϵ_s'	A, кг	B, кг	C, кг	$\Sigma, \text{кг}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0035	0,0250	0,00050	6,88	0,00146	25179	2875	34370	-10431,5
0,0035	0,0245	0,00050	7,00	0,00150	25629	2946	34370	-9280,53
0,0035	0,0240	0,00049	7,13	0,00154	26095	3016	34370	-8113,11
0,0035	0,0235	0,00048	7,26	0,00157	26578	3086	34370	-6928,43
0,0035	0,0230	0,00047	7,40	0,00161	27080	3156	34370	-5725,52
0,0035	0,0225	0,00046	7,54	0,00164	27600	3226	34370	-4503,31
0,0035	0,0220	0,00045	7,69	0,00168	28142	3296	34370	-3260,69
0,0035	0,0215	0,00044	7,84	0,00171	28705	3366	34370	-1996,42
0,0035	0,0210	0,00043	8,00	0,00175	29290	3437	34370	-709,17
0,0035	0,0207	0,00043	8,09	0,00177	29619	3475	34370	0,00

Условие равновесия выполнено на 10й итерации, далее выполняем расчет прочности по формулам главы 3 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 43.

Таблица 43 – Расчет прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента

$N_{b,d} = \sum \Delta \varepsilon_b \sigma_{bi}$	$S_{b,d}$	z_b , см	z_s' , см	z_s , см	$N_b z_b$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,427158	0,000841	4,55	4,09	47,91	134776,1	1646679	142119	1380884,25 3 кг*см
								138,09 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 44.

Таблица 44 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	85	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	135, 48	136,84	138,09	139,23	139,94	141,52	142,35

Кл. В	50	55	60	70	80	90	100
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	275	300	330	370	410	440	475
M_{ult}	143,6	144,91	145,64	146,62	147,53	148,49	149,84

3.3.3 Расчет с применением криволинейной диаграммы по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02

- Криволинейная диаграмма по СП 63.13330.2012:

Требуется выполнить поверочный расчет прочности железобетонного внецентренно сжатого элемента из бетона кл. В25, арматура А400,

диаметром 25 мм, используем для этого MS Excel, исходные данные для построения диаграммы и для расчета отображены в таблице 45.

Таблица 45 – Исходные данные для построения диаграммы и для расчета

Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	60	см	A_s	9,82	см	R_b	145	кг/см ²
b	30	см	A_s'	9,82	см	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	360	см	σ_s	3500	кг/см ²	ε_{bt1}	0,00008	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	ε_{bt0}	0,0001	
			ε_{s1}	0,00175		ε_{bt2}	0,00015	
			ε_{s2}	0,025		ε_b	0,00015	
						E_b	300000	кг/см ²
						h_0	16	см
						$a_{зс}$	2	см
						$a_{зс}'$	2	см
						$\varepsilon_{b1, red}$	0,0015	
						v_0	1	0,471384
						w_1	1,425142	0,310389
			N	30000	кг/см ²	w_2	-0,42514	0,689611
			e	17,99	см	$\varepsilon^{\wedge}_B = \varepsilon R$	0,00210	
			N*e	539592,8	кг*см	λ	1	
			M	53,95928	кН*м	v^{\wedge}_B	0,229943	
				ε_{b2}	0,00353	η_d	0,071362	
				$v^{\wedge}_{B,max}$	0,112174	k	0,85	
				n	0,85	$\sigma_{b,max}$	127,15	

Далее строим криволинейную диаграмму, построение диаграммы отображено в таблице 46.

Диаграмма строится исходя из модуля деформаций, с определением коэффициента изменения секущего модуля, напряжения.

Таблица 46 – Построение криволинейной диаграммы по СП 63.13330.2012 (с новыми параметрами)

η_d	ε_b	A	B	C	ν_b	Σ	σ_b
2	3	4	5	6	7	8	9
0,1	0,00021	0,05035	0,00488	0,02855	0,80315178	0,0	50,6459744
0,2	0,00042	0,04279	-0,01455	0,02855	0,66444546	0,0	83,7985762
0,3	0,00063	0,03018	-0,03398	0,02855	0,56092486	0,0	106,114138
0,4	0,00084	0,01253	-0,05341	0,02855	0,48047320	0,0	121,192702
0,5	0,00105	-0,01015	-0,07285	0,02855	0,41617154	0,0	131,216874
0,6	0,00126	-0,03788	-0,09228	0,02855	0,36381748	0,0	137,651872
0,7	0,00147	-0,07066	-0,11171	0,02855	0,32069148	0,0	141,557462
0,8	0,00168	-0,10847	-0,13114	0,02855	0,28489901	0,0	143,723649
0,9	0,00189	-0,15133	-0,15057	0,02855	0,25502177	0,0	144,732838
1,0	0,00210	-0,19923	-0,17001	0,02855	0,22994326	0,0	145,0
1,1	0,00231	0,99733					144,613639
1,2	0,00252	0,98934					143,454557
1,3	0,00273	0,97601					141,522754
1,4	0,00294	0,95736					138,818230
1,5	0,00315	0,93338					135,340985
1,6	0,00336	0,90407					131,091019
1,6796	0,00353	0,87692					127,153846

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 26.

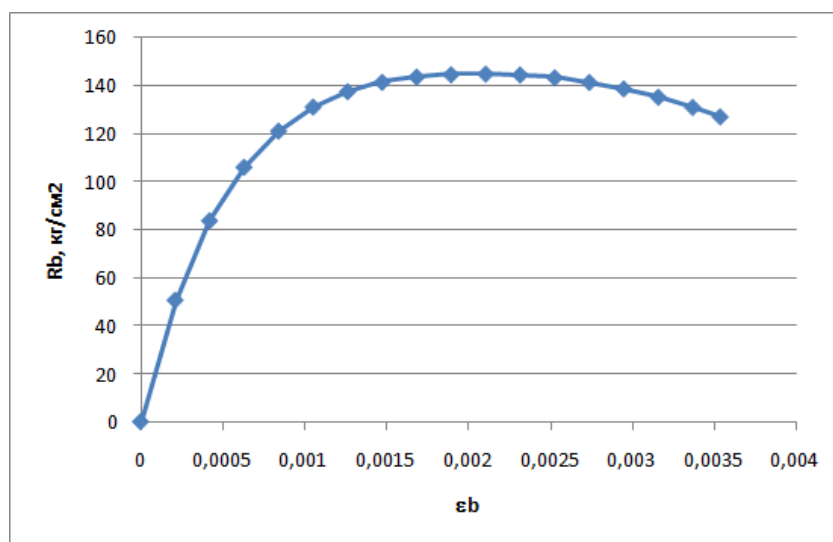


Рисунок 26 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности внецентренно сжатого элемента, расчет площадей представлен в таблице 47.

Таблица 47 – Расчет площадей диаграммы

$\varepsilon_j = \varepsilon_i - \varepsilon_{1/2}$	A	B	C	v_B	Σ	σ_B	N_{bd}	S_{bd}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,000105	0,05224	0,014	0,0285	0,8921600	0	28,129375	0,00591	0,000001
0,000315	0,04720	-0,004	0,0285	0,7283235	0	68,891067	0,01448	0,000005
0,000525	0,03711	-0,024	0,0285	0,6092090	0	96,040335	0,02018	0,000011
0,000736	0,02199	-0,043	0,0285	0,5183319	0	114,39927	0,02404	0,000018
0,000946	0,00182	-0,063	0,0285	0,4466116	0	126,73305	0,02663	0,000025
0,001156	-0,0233	-0,082	0,0285	0,38869614	0	134,80941	0,02833	0,00003
0,001366	-0,0536	-0,101	0,0285	0,34123352	0	139,86606	0,02939	0,00004
0,001576	-0,0889	-0,121	0,0285	0,30197570	0	142,81722	0,03002	0,00004
0,001787	-0,1292	-0,140	0,0285	0,26929657	0	144,34344	0,03034	0,00005
0,001997	-0,1746	-0,160	0,0285	0,2419433	0	144,9387	0,03046	0,00006
0,002207	0,99933					144,90340	0,03045	0,00006
0,002417	0,99400					144,13068	0,03029	0,00007
0,002627	0,98334					142,58524	0,02997	0,00007
0,002838	0,96735					140,26708	0,02948	0,00008
0,003048	0,94604					137,17619	0,02883	0,00008
0,003258	0,91939					133,31259	0,02802	0,00009
0,003447	0,890922					129,18368	0,02162	0,00007
							0,438517	0,000851

Далее выполняем итерационный процесс, условие равновесия выполняется на 9й итерации, пример последней итерации представлен в таблице 48.

Таблица 48 – Итерационный процесс

ε_b	ε_s	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	ε_s'	A, кг	B, кг	C, кг	$\Sigma, \text{кг}$
2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,00353	0,02123	0,000442	7,99	0,00176	29759,03	34610,9	34370	0,00

Далее выполняем расчет прочности по формулам главы 3 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 49.

Таблица 49 – Расчет прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента

$N_{b,d} = \Sigma \Delta \varepsilon_i \bar{\sigma}_i$	$S_{b,d}$	$Z_b, \text{см}$	$Z_s', \text{см}$	$Z_s, \text{см}$	$N_b z_b$	$\bar{\sigma}_s A_s z_s$	$\bar{\sigma}'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,438517	0,000851	4,39	3,99	48,01	130572,0933	165022	137974,13	1379179

Продолжение таблицы 49

1	2	3	4	5	6	7	8	9
								кГ*см
								137,92 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 50.

Таблица 50 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	85	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	135,14	136,62	137,92	138,9	139,82	141,2	143,75

Кл. В	50	55	60	70	80	90	100
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	275	300	330	370	410	440	475
M_{ult}	146,0	148,34	151,34	155,73	156,86	157,0	159,35

- Криволинейная диаграмма по СНБ 5.03.01-02:

Требуется выполнить поверочный расчет прочности железобетонного внецентренно сжатого элемента из бетона кл. В25, арматура А400, диаметром 25 мм, используем для этого MS Excel, построение диаграммы отображено в таблице 51.

Диаграмма строится исходя из модуля напряжений с вычислением деформаций, коэффициента изменения секущего модуля и напряжений. По полученным данным строится диаграмма.

Таблица 51 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона по СНБ 5.03.01-02

Исходные данные:							
f_{ck}	133,3 кг/см ²	$E_{cm,n}$	320000,0 кг/см ²	k_u	0,8	ϵ_{c1}	0,00207
ϵ_{cu}	0,00353	σ_{cu}	106,64 кг/см ²	$0,4f_{ck}$	53,32 кг/см ²	k	5,4654
f_{ct}	98						
Построение диаграммы							
$\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1}$	ϵ_c	$\Delta \epsilon_c$	σ_c	$\Delta \sigma_{ci}$	$N_{c,d}$	ϵ_{ci}	$S_{c,d}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00000	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,00021	0,00021	53,11	26,56	0,005497	0,00010	0,000001
0,2	0,00041	0,00021	82,91	68,01	0,014077	0,00031	0,000004
0,3	0,00062	0,00021	101,28	92,09	0,019061	0,00052	0,000010
0,4	0,00083	0,00021	113,19	107,23	0,022194	0,00072	0,000016
0,5	0,00103	0,00021	121,11	117,15	0,024246	0,00093	0,000023
0,6	0,00124	0,00021	126,37	123,74	0,025610	0,00114	0,000029
0,7	0,00145	0,00021	129,80	128,09	0,026510	0,00135	0,000036
0,8	0,00166	0,00021	131,89	130,84	0,027081	0,00155	0,000042
0,9	0,00186	0,00021	132,98	132,43	0,027409	0,00176	0,000048
1	0,00207	0,00021	133,30	133,14	0,027556	0,00197	0,000054
1,1	0,00228	1,1	133,02	133,16	0,027561	0,00217	0,000060
1,2	0,00248	1,2	132,27	132,64	0,027454	0,00238	0,000065
1,3	0,00269	1,3	131,12	131,69	0,027257	0,00259	0,000071
1,4	0,00290	1,4	129,66	130,39	0,026987	0,00279	0,000075
1,5	0,00310	1,5	127,92	128,79	0,026656	0,00300	0,000080
1,6	0,00331	1,6	125,97	126,95	0,026274	0,00321	0,000084
1,7	0,00352	1,7	123,82	124,89	0,025850	0,00342	0,000088
1,8	0,00373	1,8	121,51	122,67	0,025389	0,00362	0,000092
					0,408139		0,000789

Диаграмма построена по полученным значениям деформаций и напряжений, с дальнейшим вычислением площадей участков диаграммы и момента, численно равному площади умноженная на центр тяжести.

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 27.

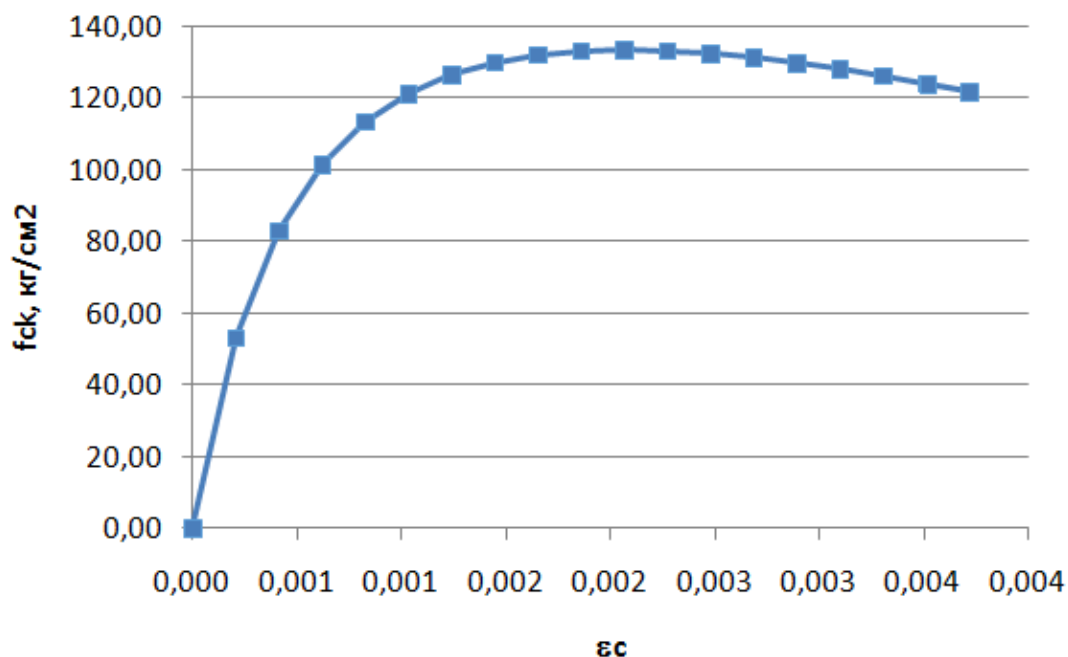


Рисунок 27 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности внецентренно сжатого элемента, расчетные характеристики для выполнения поверочного расчета представлены в таблице 52.

Таблица 52 – Исходные данные для расчета

Исходные данные:								
Геометрические размеры			Арматура А400			Бетон В25		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
h	60	см	A_s	9,82	см ²	R_b	145	кг/см ²
b	30,0	см	A_s'	9,82	см ²	R_{bt}	10,5	кг/см ²
l	360,0	см	σ_s	3500	кг/см ²	$E_{cm,n}$	300000	кг/см ²
			E_s	2000000	кг/см ²	E_{cl}	0,00200	
			ϵ_s	0,01		E_{cu}	0,00350	
			R_s	3500	кг/см ²	h_0	16,00	см
						a_s, a_s'	2,00	см
						f_{cm}	28	МПа

Продолжение таблицы 52

1	2	3	4	5	6	7	8	9
						N	30000	кг/см ²
						e	18,26	см
						N*e	547691,1	кг*см
						M	54,76911	кН*м

Далее выполняем условие равновесия с применением итерационного процесса (метода приближения), пример итерационного процесса выполнен по формулам главы 3 и представлен в таблице 53.

Таблица 53 – Итерационный процесс

ε_c	ε_s	$\chi, \text{см}^{-1}$	x, см	ε_s'	A, кг	B, кг	C, кг	$\Sigma, \text{кг}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00353	0,0250	0,000509	6,92	0,00149	24037	2922	34370	-11109,6
0,00353	0,0245	0,000500	7,04	0,00152	24466	2992	34370	-9979,34
0,00353	0,0240	0,000492	7,17	0,00156	24910	3062	34370	-8833,49
0,00353	0,0235	0,000483	7,31	0,00160	25371	3132	34370	-7671,19
0,00353	0,0230	0,000474	7,44	0,00163	25849	3202	34370	-6491,52
0,00353	0,0225	0,000465	7,59	0,00167	26346	3273	34370	-5293,46
0,00353	0,0220	0,000456	7,73	0,00170	26862	3343	34370	-4075,96
0,00353	0,0215	0,000447	7,89	0,00174	27399	3413	34370	-2837,83
0,00353	0,0204	0,000427	8,26	0,00182	28674	3569	34370	0,00

Условие равновесия выполнено на 9й итерации, далее выполняем расчет прочности по формулам главы 3 с определением разрушающего момента M_{ult} , расчет представлен в таблице 54.

Таблица 54 – Расчет прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента

$N_{c,d} = \Sigma \Delta \varepsilon_{ci}$ σ_{ci}	$S_{c,d}$	$z_c,$ см	$z_s',$ см	$z_s,$ см	$N_c b z_c$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	M_{ult}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,408139	0,000789	4,53	4,26	47,74	129897	1640949	151931	137,51 кН*м

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 55.

Таблица 55 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	80	106,7	133,3	166,7	186,7	213,3	233,3
M_{ult}	135,0	136,33	137,51	138,83	139,57	140,3	140,63

Кл. В	50	55	60	75	85	95	105
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	266,7	300	333	392	426	476	502
M_{ult}	141,05	141,27	141,67	143,76	144,53	145,56	145,75

3.3.4 Расчет по методу предельных усилий

Изменение разрушающего момента M_{ult} в зависимости от класса бетона отображено в таблице 56.

Таблица 56 – Разрушающий момент M_{ult} в зависимости от класса бетона

Кл. В	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8
R_b	85	115	145	170	195	220	250
M_{ult}	131,08	135,69	138,37	139,9	141,04	141,91	146,16

Кл. В	50	55	60	70	80	90	100
-	9	10	11	12	13	14	15
R_b	275	300	330	370	410	440	475
M_{ult}	147,99	148,33	149,35	154,78	156,54	157,96	159,14

В целом можно заметить, что результаты расчетов с использованием различных диаграмм дают вполне близкие результаты, что также свидетельствует о целесообразности применения различных диаграмм материалов наравне с традиционным методом расчета. Предложенные методики могут быть в дальнейшем реализованы при проведении поверочных расчетов внецентренно сжатых железобетонных элементов.

Также можно сказать что выполненные расчеты прочности по предложенной методике с применением нелинейной деформационной модели значительно проще и точнее в сравнении с традиционным методом расчета, так как традиционный метод расчета прибегает к упрощенной (прямоугольной) эпюре, которая не точно отражает работу материала. В отличии от применения в качестве эпюр очертание диаграмм.

Сами полученные значения расчетов в сравнении с традиционными методами позволяют экономить материал, что влияет на стоимость конструкции и здания в целом, а также экономия ресурсов на производство конструкций и строительства в целом.

Из этого следует, что разработка методов расчета по нелинейной деформационной модели с применением энергетических законов механики деформируемого твердого тела, являются очень перспективным направлением и при учете сложных экономических ситуаций в стране и в целом в мире позволяет экономить ресурсы.

Выводы по третьей главе

В данной главе были произведены расчеты железобетонных элементов на внецентренное сжатие по нормируемым 2х- 3х – линейным и криволинейным диаграммам, а также по уточненным диаграммам. Выполнен расчет по методу предельных усилий. Исходя из выполненных расчетов можно судить о целесообразности применения диаграмм и расчетов по деформационной модели, т.к. полученные результаты расчетов близки к данным полученным в результате расчетов по традиционному методу (метод предельных усилий).

Также можно сказать что выполненные расчеты прочности по предложенной методике с применением нелинейной деформационной модели значительно проще и точнее в сравнении с традиционным методом расчета, так как традиционный метод расчета прибегает к упрощенной (прямоугольной) эпюре, которая не точно отражает работу материала. В отличии от применения в качестве эпюр очертание диаграмм.

Глава 4 Расчет деформаций изгибаемых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели

4.1 Методика расчета деформаций до образования трещин с определением M_{cr}

В соответствии с СП 63.13330.2012 [3] расчет элементов из железобетона по образованию трещин на основе деформационной модели производят на основе диаграмм состояния бетона (сжатого, растянутого), арматуры и гипотезы плоских сечений. Показателем образования трещин является достижение предельных деформаций в бетоне растянутой зоны [3].

Расчет железобетонных стержневых элементов по деформациям определяют из условия, при котором деформации или прогибы f от действия нагрузок не должны превышать предельно допустимых значений деформаций или прогибов f_{ult} [3], в соответствии с условием (43).

$$f \leq f_{ult} \quad (43)$$

Распределение деформаций и напряжений изображено, в соответствии с рисунком 28.

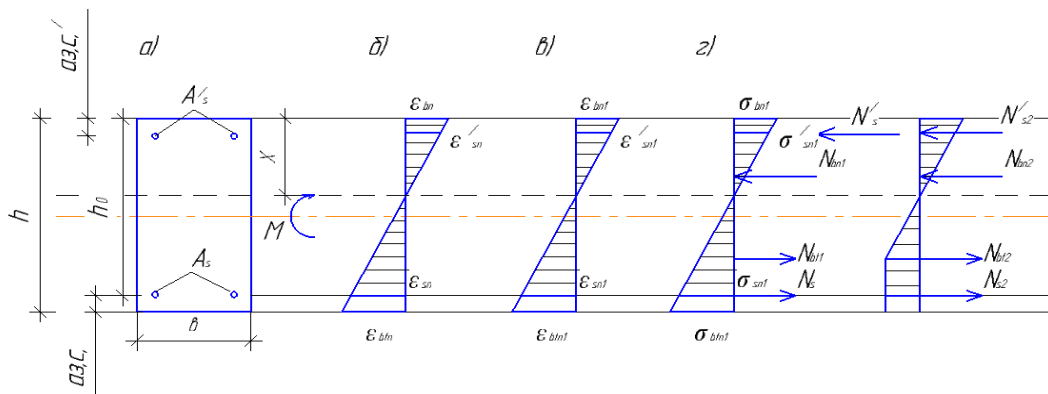


Рисунок 28 – Распределение деформаций и напряжений до образования трещин

Используем двухлинейные диаграммы бетона на сжатие, растяжение и арматуры, в соответствии с рисунком 29.

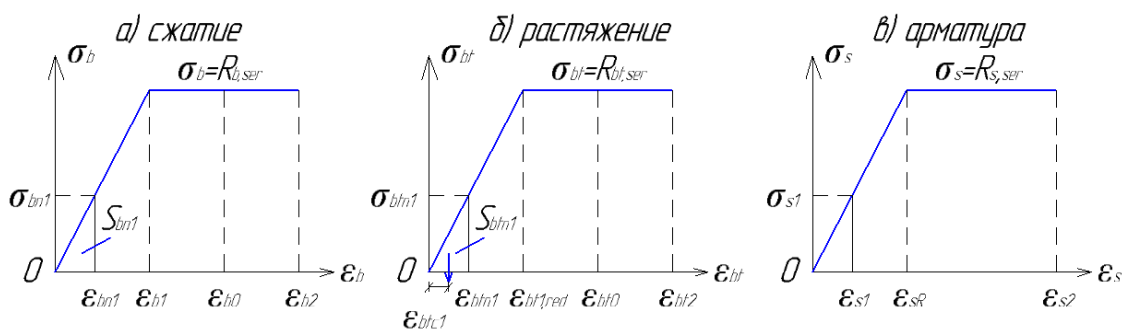


Рисунок 29 - Диаграммы деформирования бетона и арматуры

Кривизна элемента $1/r$ при линейном распределении деформаций по высоте сечения определяется из выражений (44).

$$\frac{1}{r} = \chi = \frac{\varepsilon_{bn}}{x} = \frac{\varepsilon_{bm}}{h-x} = \frac{\varepsilon_{sn}}{h_0-x} = \frac{\varepsilon_{bn} + \varepsilon_{sn}}{h_0} = \frac{\varepsilon_{bn} + \varepsilon_{bm}}{h} \quad (44)$$

Задаемся деформациями на крайнем волокне растянутой зоны: ε_{bml} изображено на рисунке 29б, которым на диаграмме растяжения соответствует напряжение $\sigma_{bml} = E_{b,red} \cdot \varepsilon_{bml}$,

$$\text{где } E_{b,red} = \frac{R_{bt,ser}}{\varepsilon_{bt1,red}},$$

$$\varepsilon_{bt1,red} = 8 \cdot 10^{-5}.$$

Распределение деформаций изображено в соответствии с рисунком 28в, распределение напряжений изображено в соответствии с рисунком 28г. Определяем площадь участка диаграммы S_{bml} и центр тяжести ε_{btcl} .

Записываем уравнение равновесия, в соответствии с формулой (45).

$$N_s + N_{bt1} - N_{bn1} + N'_s = 0 \quad (45)$$

где

$$\begin{aligned} N_s &= \varepsilon_{s1} \cdot E_s \cdot A_s, \\ N'_s &= \varepsilon'_{s1} \cdot E_s \cdot A'_s \end{aligned} \quad (46)$$

где N_s – усилие в сжатой арматуре;

N'_s - усилие в растянутой арматуре.

Выразим деформации в арматуре ε_s и ε'_s и на крайнем волокне бетона сжатой зоны ε_{bn1} , в соответствии с формулами (47) и (48), через назначение деформаций $\varepsilon_{bt1,red}$

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_b}{x} &= \frac{\varepsilon_{bt}}{h-x} \Rightarrow \varepsilon_b = \frac{\varepsilon_{bt} \cdot x}{h-x}; \frac{\varepsilon_{bn1}}{h-x} = \frac{\varepsilon_{sn1}}{h-x-a_{3.c.}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \varepsilon_{sn1} &= \frac{\varepsilon_{bn1} \cdot (h-x-a_{3.c.})}{h-x}, \end{aligned} \quad (47)$$

$$\frac{\varepsilon'_{sn1}}{x-a_{3.c.}} = \frac{\varepsilon_{bn1}}{h-x} \Rightarrow \varepsilon'_{sn1} = \frac{\varepsilon_{bn1} \cdot (x-a'_{3.c.})}{h-x} \quad (48)$$

Допустим деформации ε_{bn1} находятся на участке $o - \varepsilon_{bt1}$, диаграммы рисунок 29а, тогда площадь участка определяется в соответствии с формулами (49) и (50).

$$S_{bn1} = \varepsilon_{bn1} \cdot \frac{\sigma_{bn1}}{2} = \frac{\varepsilon_{bn1}}{2} \cdot \frac{\varepsilon_{bn1} \cdot x}{h-x} \cdot E_{b,red} = \left(\frac{\varepsilon_{bn1} \cdot x}{h-x} \right) \cdot \frac{E_{b,red}}{2} \quad (49)$$

$$S_{bn1} = \varepsilon_{bt1,red} \cdot \frac{\sigma_{bn1}}{2} = \varepsilon_{bt1,red}^2 \cdot \frac{E_{bt,red}}{2} \quad (50)$$

Уравнение равновесия запишется в соответствии с формулой (51).

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon_{bt1} \cdot (h - x - a_{3.c.})}{h - x} \cdot E_s \cdot A_s + \frac{\varepsilon_{bt1,red}^2 \cdot E_{bt,red} \cdot b}{2 \cdot \chi} - \left(\frac{\varepsilon_{bt1} \cdot x}{h - x} \right)^2 \cdot \\ & \cdot \frac{E_{b,red} \cdot b}{2 \cdot \chi} - \frac{\varepsilon_{bt1} \cdot (x - a'_{3.c.})}{h - x} \cdot E_s \cdot A'_s = 0 \end{aligned} \quad (51)$$

при $0 < \varepsilon_{bt} < \varepsilon_{bt1,red}$, площадь запишем $S_{bt} = \varepsilon_{bt} \cdot \varepsilon_{bn} \cdot E_{b,red} / 2$;

при $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{bt1,red}$, площадь запишем $S_{bt} = \varepsilon_{bt1,red} \cdot R_{bt} / 2$;

при $\varepsilon_{bt1,red} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{bt2}$, площадь запишем $S_{bt} = R_{bt} \cdot \varepsilon_{bt} + \frac{R_{bt} \cdot \varepsilon_{bt1,red}}{2}$.

После преобразований уравнение равновесия запишется в соответствии с формулами (52), (53) и (54).

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon_{bt} \cdot (h - x - a_{3.c.})}{h - x} \cdot E_s \cdot A_s + \frac{S_{bt} \cdot b}{\chi} - \frac{b \cdot \varepsilon_{bt} \cdot x}{h - x} \cdot \frac{\varepsilon_{bt} \cdot x}{h - x} \cdot \frac{E_{b,red}}{\chi \cdot 2} - \\ & - \frac{\varepsilon_{bt} \cdot (x - a'_{3.c.})}{h - x} \cdot E_s \cdot A'_s = 0, \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon_{bt} \cdot (h - x - a_{3.c.})}{h - x} \cdot E_s \cdot A_s + \frac{S_{bt} \cdot b}{\chi} - \frac{\varepsilon_{bt} \cdot b \cdot x^2 \cdot R_{b,ser}}{2 \cdot (h - x) \cdot \varepsilon_{bt1,red}} - \\ & - \frac{\varepsilon_{bt} \cdot (x - a'_{3.c.})}{h - x} \cdot E_s \cdot A'_s = 0, \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon_{bt} \cdot (h - x - a_{3.c.})}{h - x} \cdot E_s \cdot A_s + \frac{S_{bt} \cdot b \cdot (h - x)}{\varepsilon_{bt}} - \frac{\varepsilon_{bt} \cdot b \cdot R_{b,ser} \cdot x^2}{2 \cdot (h - x) \cdot \varepsilon_{bt1,red}} - \\ & - \frac{\varepsilon_{bt} \cdot (x - a'_{3.c.})}{h - x} \cdot E_s \cdot A'_s = 0 \end{aligned} \quad (54)$$

где ε_{bt} – деформации растянутого бетона;

S_{bt} – площадь растянутого бетона.

В общем виде расчет, можно представить в виде блок-схемы в соответствии с рисунком 30.

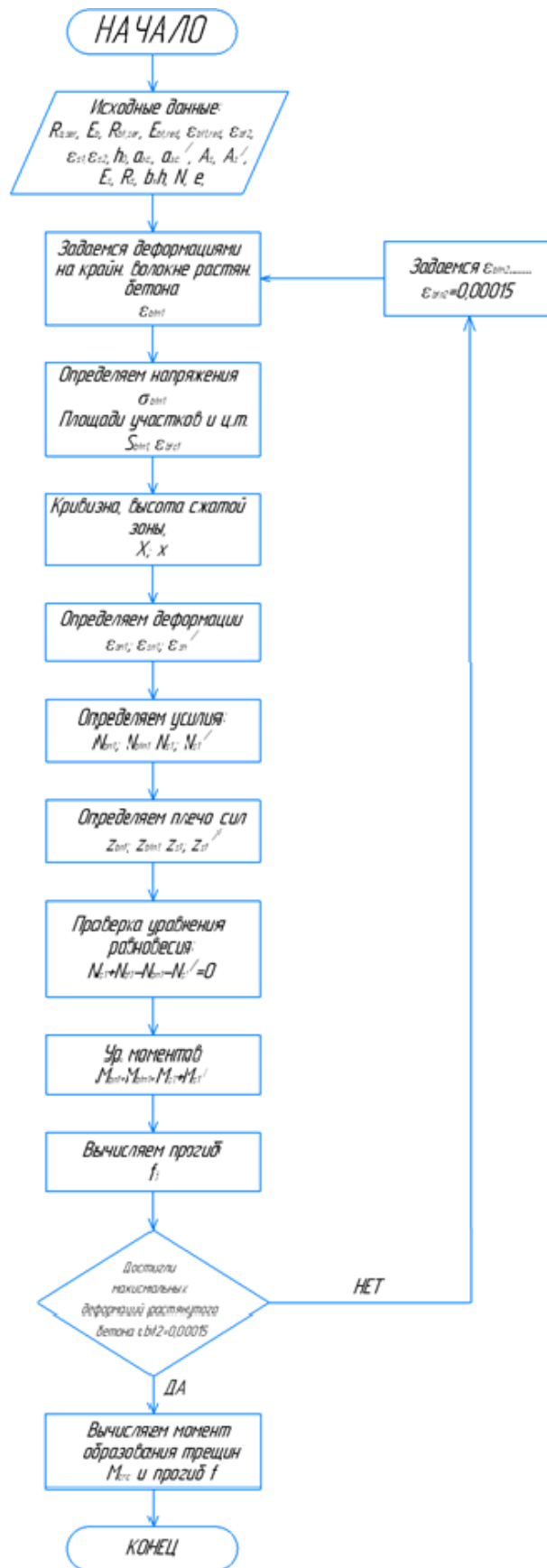


Рисунок 30 – Блок-схема расчета деформаций до образования трещин

4.2 Примеры расчета деформаций до образования трещин

Исходные данные для расчета, представлены в таблице 57.

Таблица 57 – исходные данные для расчета

Сечение	Бетон В15	Арматура А400, 2 диаметра 12
h=18 см	$E_b=307\ 000\ \text{кг/см}^2$	$A_s=2,26\ \text{см}^2$
b=12 см	$R_{b,ser}=306\ \text{кг/см}^2$	$\sigma_s=50\ 200\ \text{кг/см}^2$
l=210 см	$E_{bt,red}=275\ 000\ \text{кг/см}^2$	$E_s=2\ 000\ 000$
$h_0=16\ \text{см}$	$R_{bt,ser}=22\ \text{кг/см}^2$	$\varepsilon_{s1}=0,0025$
$a_{3,c.}=2\ \text{см}$	$\varepsilon_{b1,red}=0,0015$	$\varepsilon_{s2}=0,025$
	$\varepsilon_{b2}=0,0035$	
	$\varepsilon_{bt1,red}=0,00008$	
	$\varepsilon_{bt2}=0,00015$	

Далее строим двухлинейную диаграмму растяжения бетона, построение диаграммы отображено в таблице 58.

Таблица 58 – Двухлинейная диаграмма растяжения бетона

$\eta=\varepsilon_{bt}/\varepsilon_{bt1}$	ε_{bti}	$\Delta\varepsilon_{bti}$	σ_{bt}	$\Delta\sigma_{bti}$	$N_{bt,d}$	ε_{bti}	$S_{bt,d}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,000000	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,00
0,1	0,0000080	0,0000080	2,20	1,10	0,000009	0,00000	0,000000000
0,2	0,0000160	0,0000080	4,40	3,30	0,000026	0,00001	0,0000000003
0,3	0,0000240	0,0000080	6,60	5,50	0,000044	0,00002	0,0000000009
0,4	0,0000320	0,0000080	8,80	7,70	0,000062	0,00003	0,0000000017
0,5	0,0000400	0,0000080	11,0	9,90	0,000079	0,00004	0,0000000029
0,6	0,0000480	0,0000080	13,2	12,1	0,000097	0,00004	0,0000000043
0,7	0,0000560	0,0000080	15,4	14,3	0,000114	0,00005	0,0000000059
0,8	0,0000640	0,0000080	17,6	16,5	0,000132	0,00006	0,0000000079
0,9	0,0000720	0,0000080	19,8	18,7	0,000150	0,00007	0,0000000102
1	0,00008	0,0000080	22,0	20,9	0,000167	0,00008	0,0000000127
1,1	0,0000880	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00008	0,0000000148
1,2	0,0000960	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00009	0,0000000162
1,3	0,0001040	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00010	0,0000000176
1,4	0,0001120	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00011	0,0000000190
1,5	0,0001200	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00012	0,0000000204

Продолжение таблицы 58

1	2	3	4	5	6	7	8
1,6	0,0001280	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00012	0,0000000218
1,7	0,0001360	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00013	0,0000000232
1,8	0,0001440	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00014	0,0000000246
1,875	0,00015	0,0000060	22,0	22,0	0,000132	0,00015	0,0000000194
					0,00242		0,000000223

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 31.

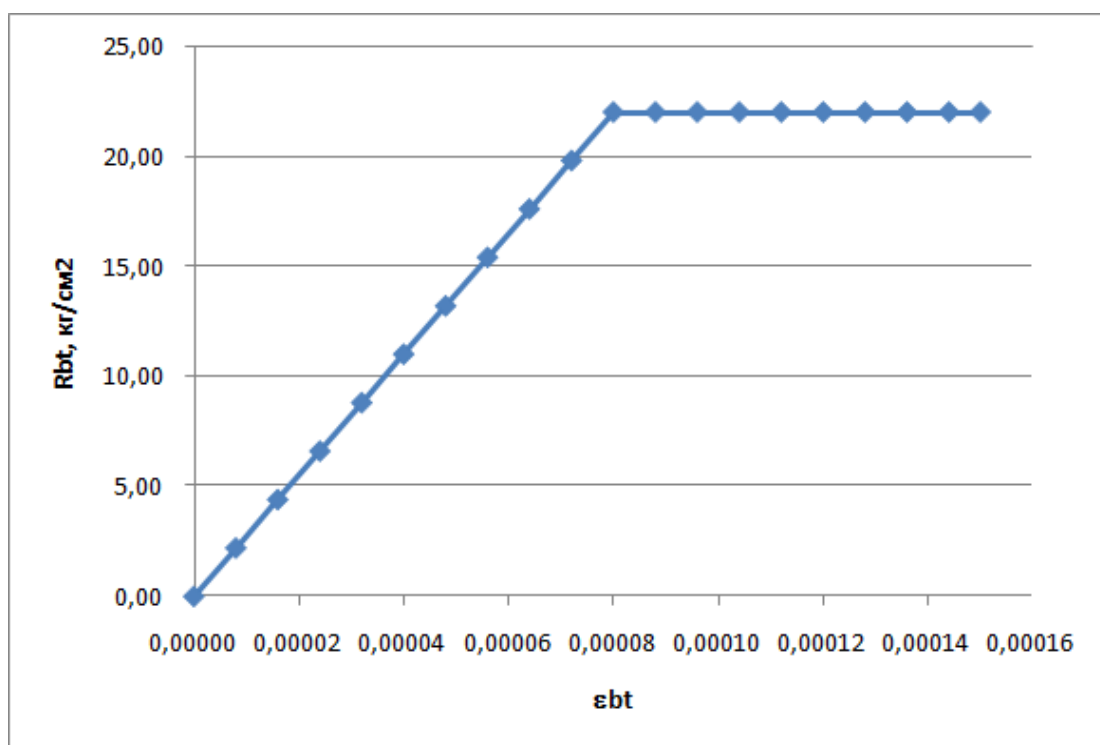


Рисунок 31 – Двухлинейная диаграмма деформирования бетона растяжению

Далее строим диаграмму деформирования бетона сжатию, построение диаграммы отображено в таблице 59.

Диаграмма строится исходя из модуля напряжений, с вычислением центра тяжести каждой полоски, определением напряжений, площадей полосок, момента равного площади умноженной на центр тяжести полоски.

Таблица 59 – Двухлинейная диаграмма сжатия бетона

$\eta=\varepsilon_b/\varepsilon_{b1}$	ε_{bi}	$\Delta\varepsilon_{bi}$	σ_b	$\Delta\sigma_{bi}$	$N_{b,d}$	ε_{bi}	$S_{b,d}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00000	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,00015	0,00015	30,60	15,30	0,002295	0,00008	0,000000
0,2	0,00030	0,00015	61,20	45,90	0,006885	0,00023	0,000002
0,3	0,00045	0,00015	91,80	76,50	0,011475	0,00038	0,000004
0,4	0,00060	0,00015	122,40	107,10	0,016065	0,00053	0,000008
0,5	0,00075	0,00015	153,00	137,70	0,020655	0,00068	0,000014
0,6	0,00090	0,00015	183,60	168,30	0,025245	0,00083	0,000021
0,7	0,00105	0,00015	214,20	198,90	0,029835	0,00098	0,000029
0,8	0,00120	0,00015	244,80	229,50	0,034425	0,00113	0,000039
0,9	0,00135	0,00015	275,40	260,10	0,039015	0,00128	0,000050
1	0,00150	0,00015	306,00	290,70	0,043605	0,00143	0,000062
1,1	0,00165	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00158	0,000072
1,2	0,00180	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00173	0,000079
1,3	0,00195	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00188	0,000086
1,4	0,00210	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00203	0,000093
1,5	0,00225	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00218	0,000100
1,6	0,00240	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00233	0,000107
1,7	0,00255	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00248	0,000114
1,8	0,00270	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00263	0,000120
1,9	0,00285	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00278	0,000127
2	0,00300	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00293	0,000134
2,1	0,00315	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00308	0,000141
2,2	0,00330	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00323	0,000148
2,3	0,00345	0,00015	306,00	306,00	0,045900	0,00338	0,000155
2,33	0,00350	0,00005	306,00	306,00	0,015300	0,00348	0,000053
					0,841500		0,001759

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 32.

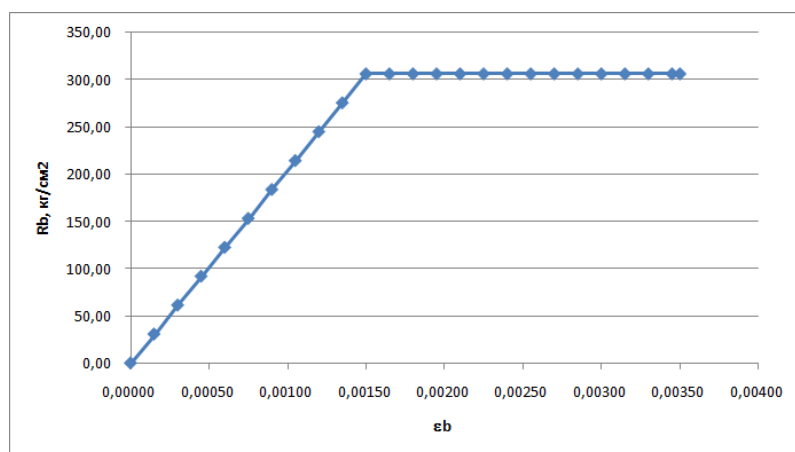


Рисунок 32 – Двухлинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет деформаций с использованием двухлинейных диаграмм деформирования бетона (растяжение – сжатие) по формулам главы 4, расчет представлен в таблице 60.

Таблица 60 – Расчет деформаций до образований трещин

e_{bt}	x	A	B	C	S	ϵ_{bni}
1	2	3	4	5	6	7
0,00004	10,18655	103,76578	150,046948	1424,6948356	0,000	0,0000521488
0,00006	10,18655	103,76578	150,046948	1424,6948356	0,000	0,0000782232
0,00008	10,18655	103,76578	150,046948	1424,6948356	0,000	0,0001042976
0,0001	10,11226	102,25776	170,955556	1626,4888888	0,000	0,0001282022
0,00015	9,74476	94,96029	764,760000	7357,4400000	0,000	0,0001770649

ϵ_{sni}	χ	σ_{bt}	σ_{bn}	S_{bt}	S_{bn}	Z_b	Z_{bt}
8	9	10	11	12	13	14	15
0,0000297	0,000005	11,00	10,638352	0,00022	0,000000006	6,791	5,208
0,0000446	0,000008	16,50	15,957528	0,000495	0,000000019	6,791	5,208
0,0000595	0,000010	22,00	21,276704	0,00088	0,000000046	6,791	5,208
0,0000746	0,000013	22,00	26,153245	0,00132	0,000000085	6,741	5,258
0,0001136	0,000018	22,00	36,121233	0,00242	0,000000214	6,496	5,063

z_s	N_b	N_{bt}	N_s	равновесие	M_{ult} , кг*см	M_{ult} кН*м	f (см)
16	17	18	19	20	21	22	23
5,813	650,208	515,687	134,520	0,00	7883,818	0,788	0,021311966
5,813	975,312	773,531	201,781	0,00	11825,728	1,182	0,031967949
5,813	1300,417	1031,375	269,041	0,00	15767,637	1,576	0,042623933
5,887	1586,810	1249,418	337,391	0,00	19254,024	1,925	0,052778094
6,255	2111,955	1598,215	513,740	0,00	25026,011	2,502	0,075642836

Изменение прогиба в зависимости от момента представлено в Приложении А.

Как показывают расчеты значения момента и деформаций можно рассчитать задаваясь на крайнем волокне деформациями бетона растянутой зоны, до достижения максимальных деформаций в нем, что позволяет построить цепочку значений прогиба на разных ступенях нагружения.

4.3 Методика расчета деформаций после образования трещин с определением M_{cr}

Расчет ведется с применением криволинейной диаграммы в сжатой зоне и двухлинейной диаграммы в растянутой зоне, в соответствии с рисунком 33.

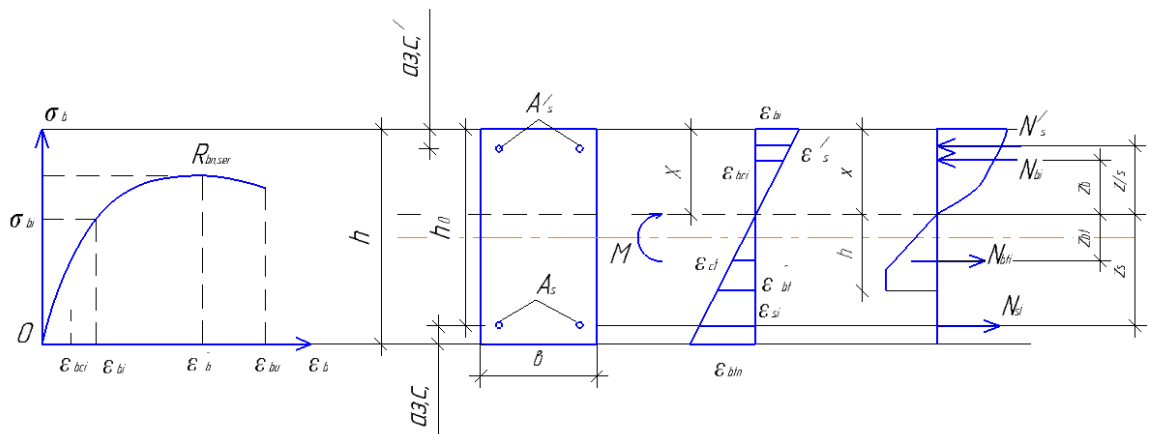


Рисунок 33 – Распределение деформаций и усилий по криволинейной диаграмме

Методика расчета строится исходя из условия, в соответствии с формулой (55).

$$\frac{1}{r} = \chi = \frac{\epsilon_{bi}}{x} = \frac{\epsilon_{si}}{h_0 - x} = \frac{\epsilon_{bi} + \epsilon_{si}}{h_0} \quad (55)$$

Уравнение равновесие запишется в соответствии с формулой (56).

$$N_{bi} + N_{si}' - N_{br} - N_{si} = 0 \quad (56)$$

где N_{bi} – усилие в i участке сжатого бетона;

N_{br} – усилие в i участке растянутого бетона;

N_{si} – усилие в i участке растянутой арматуры;
 N'_s – усилие в сжатой арматуре.

Далее задаемся деформацией в сжатом бетоне ε_{bi}

Уравнение примет вид, в соответствии с формулой (57).

$$\frac{S_{dbi} \cdot b}{\chi} + \sigma_{si} \cdot A'_s - \frac{S_{dbii} \cdot b}{\chi} - \sigma_{si} \cdot A_s = 0 \quad (57)$$

где S_{dbi} и S_{dbii} – площади, которые находим из криволинейной диаграммы бетона для класса В.

Кривизну определяем, в соответствии с формулой (58).

$$\frac{\varepsilon_{bi}}{x} = \frac{\varepsilon_{si}}{h - x} \quad (58)$$

Далее находим деформации в арматуре, в соответствии с формулой (59).

$$\varepsilon_{si} = \frac{\varepsilon_{bi}}{x} (h_0 - x) = \frac{\varepsilon_{bi} \cdot h_0}{x} - \varepsilon_{bi} \quad (59)$$

Деформации в сжатой арматуре находятся из условия в соответствии с формулой (60).

$$\frac{\varepsilon_{bi}}{x} = \frac{\varepsilon'_{si}}{x - a'_{3.c.}} \quad \text{отсюда} \quad \varepsilon'_{si} = \frac{\varepsilon_{bi} \cdot (x - a'_{3.c.})}{x} \quad (60)$$

Подставляем уравнения (59) и (60) в уравнение (57)

где $\sigma_{si} = \varepsilon_{si}(\varepsilon'_{si}) \cdot E_s$

Уравнение примет вид, в соответствии с уравнением (61).

$$\frac{S_{dbi} \cdot b \cdot x_i}{\varepsilon_i} + \frac{\varepsilon_{bi} \cdot (x - a'_{з.с.})}{x} \cdot E_s \cdot A'_s - \frac{S_{dbti} \cdot b \cdot x_i}{\varepsilon_{bi}} - \left(\frac{\varepsilon_{bi} \cdot h_0}{x} - \varepsilon_{bi} \right) \cdot E_s \cdot A_s = 0 \quad (61)$$

После преобразований уравнение (61) примет вид:

$$x^2 \cdot (S_{dbi} \cdot b - S_{dbti} \cdot b) + x \cdot \varepsilon_{bi}^2 \cdot E_s \cdot A'_s - \varepsilon_{bi}^2 \cdot h_0 \cdot E_s \cdot A_s = 0 \quad (62)$$

Решаем квадратное уравнение (61) относительно x

$$\text{Из } \frac{\varepsilon_{bi}}{x} = \frac{\varepsilon_{bci}}{z_b}$$

Определяем расстояния от усилий до нейтральной оси, в соответствии с формулами (63).

$$\begin{aligned} z_b &= \frac{\varepsilon_{bci} \cdot x}{\varepsilon_{bi}}; \\ z_s &= h_0 - x; \\ z'_s &= x - a'_{з.с.} \end{aligned} \quad (63)$$

Из $\frac{\varepsilon_{bi}}{x} = \frac{\varepsilon_{ct}}{z_{bt}}$ определяем

$$z_{bt} = \frac{\varepsilon_{ct} \cdot x}{\varepsilon_{bi}} \quad (64)$$

где z_b – расстояние от усилия в сжатом бетоне до нейтральной оси;

z_{bt} – расстояние от усилия в растянутом бетоне до нейтральной оси;

z_s – расстояние от усилия в растянутой арматуре до нейтральной оси;

z_s' – расстояние от усилия в сжатой арматуре до нейтральной оси.

Уравнение моментов примет вид, в соответствии с формулой (65).

$$M_{ult} = \frac{S_{dbi} \cdot b \cdot x_i}{\varepsilon_i} \cdot z_b + \frac{\varepsilon_{bi} \cdot (x - a'_{з.с.})}{x} \cdot E_s \cdot A'_s \cdot z_s' + \frac{S_{dbii} \cdot b \cdot x_i}{\varepsilon_{bi}} \cdot z_{bt} + \left(\frac{\varepsilon_{bi} \cdot h_0}{x} - \varepsilon_{bi} \right) \cdot E_s \cdot A_s \cdot z_s \quad (65)$$

При этом переход из стадии 2 (стадия при которой деформации в растянутой арматуре находятся в пределах упругой зоны), в стадию 3 (стадия при которой деформации в растянутой арматуре находятся в пластической зоне). Определяется из условия (66).

$$\begin{aligned} \text{Если } \varepsilon_{si} \leq \frac{R_s}{E_s}, \text{ то } \sigma_{si} = \varepsilon_{si} \cdot E_s - \text{стадия 2;} \\ \text{Если } \varepsilon_{si} > \frac{R_s}{E_s}, \text{ то } \sigma_{si} = R_s \cdot A_s - \text{стадия 3.} \end{aligned} \quad (66)$$

При переходе в стадию 3 высота сжатой зоны x , определяется из уравнения (57).

Далее определяем прогибы f_i на каждой стадии деформирования, в соответствии с рисунком 34.

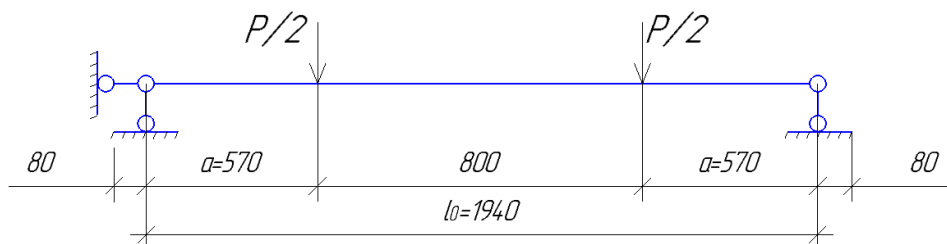


Рисунок 34 – Расчетная схема изгибаемого элемента

Определяем значение S , в соответствии с формулой (67).

$$S = \frac{1}{8} - \frac{a^2}{6 \cdot l^2} \quad (67)$$

далее определяем значение прогиба, в соответствии с формулой (68).

$$f_i = \left(\frac{1}{\chi} \right) \cdot (S \cdot l^2) \quad (68)$$

В целом как показывает данная методика расчет деформаций после образования трещин, значительно упрощается так как исключается итерационный процесс, за счет применения энергетических законов механики деформируемого твердого тела.

Что в свою очередь позволяет оценить деформирование железобетона на любой стадии загрузки, задаваясь деформациями на крайнем волокне бетона сжатой зоны, с вычислением момента при заданной деформации, а также вычислением прогиба на данной стадии нагружения.

В дальнейшем это упрощает расчет сложных статических систем (к примеру монолитных железобетонных каркасов многоэтажных зданий), и позволяет создавать специализированные программные комплексы для расчетов по второй группе предельных состояний.

В общем виде расчет можно представить в виде блок схемы, в соответствии с рисунком 35, которая отражает весь алгоритм расчета на стадиях 2 (упругая работа арматуры растянутой зоны) и 3 (работа арматуры в пластической зоне).

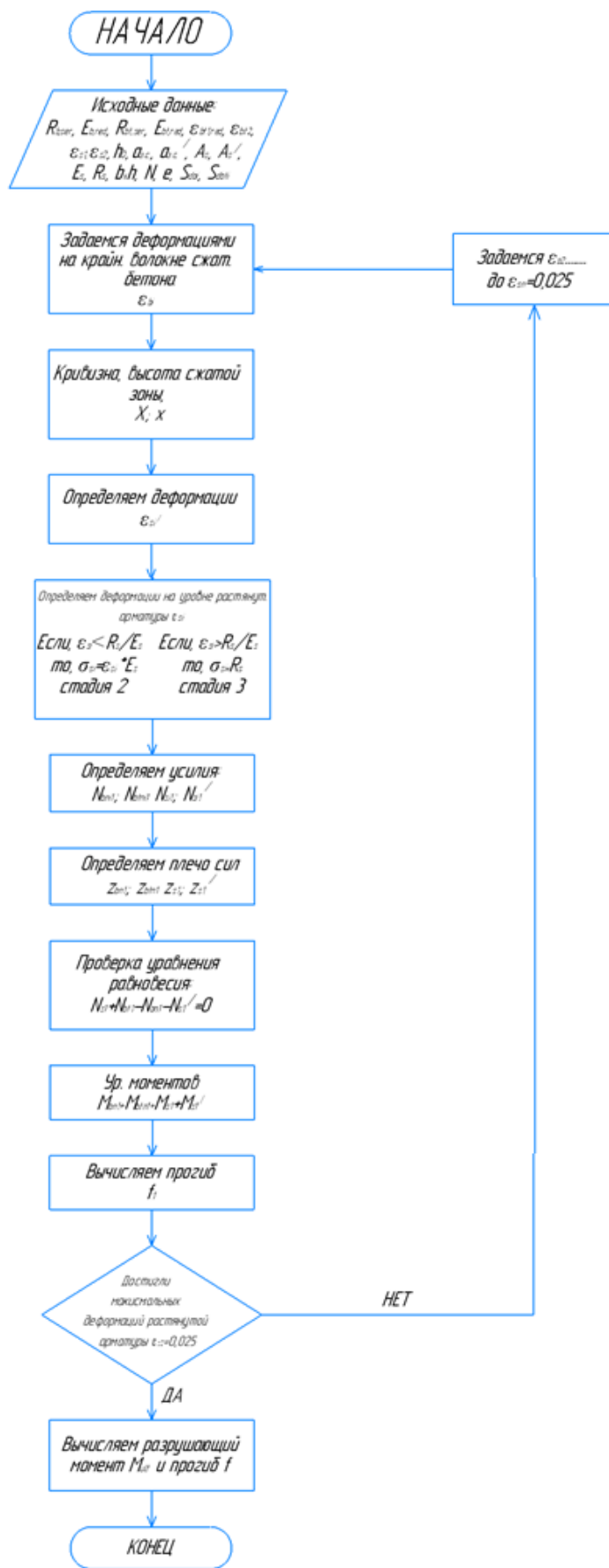


Рисунок 35 – Блок–схема расчета деформаций после образований трещин

4.4 Примеры расчета деформаций после образования трещин

Исходные данные для расчета, представлены в таблице 61.

Таблица 61 – исходные данные для расчета

Сечение	Бетон В15	Арматура А400, 2 диаметра 12
h=18 см	$E_{b,red}=204\ 000\ \text{кг/см}^2$	$A_s=2,26\ \text{см}^2$
b=12 см	$R_{b,ser}=306\ \text{кг/см}^2$	$\sigma_s=50\ 200\ \text{кг/см}^2$
l=210 см	$E_{bt,red}=275\ 000\ \text{кг/см}^2$	$E_s=2\ 000\ 000$
h ₀ =16 см	$R_{bt,ser}=22\ \text{кг/см}^2$	$\varepsilon_{s1}=0,0025$
a _{з.с.} =2 см	$\varepsilon_{bt1,red}=0,00008$	$\varepsilon_{s2}=0,025$
	$\varepsilon_{bt2}=0,00015$	

Далее строим двухлинейную диаграмму растяжения бетона, построение диаграммы отображено в таблице 62.

Таблица 62 – Двухлинейная диаграмма растяжения бетона

$\eta=\varepsilon_{bt}/\varepsilon_{bt1}$	ε_{bti}	$\Delta\varepsilon_{bti}$	σ_{bt}	$\Delta\sigma_{bti}$	$N_{bt,d}$	ε_{bti}	$S_{bt,d}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,000000	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,00
0,1	0,0000080	0,0000080	2,20	1,10	0,000009	0,00000	0,000000000
0,2	0,0000160	0,0000080	4,40	3,30	0,000026	0,00001	0,0000000003
0,3	0,0000240	0,0000080	6,60	5,50	0,000044	0,00002	0,0000000009
0,4	0,0000320	0,0000080	8,80	7,70	0,000062	0,00003	0,0000000017
0,5	0,0000400	0,0000080	11,0	9,90	0,000079	0,00004	0,0000000029
0,6	0,0000480	0,0000080	13,2	12,1	0,000097	0,00004	0,0000000043
0,7	0,0000560	0,0000080	15,4	14,3	0,000114	0,00005	0,0000000059
0,8	0,0000640	0,0000080	17,6	16,5	0,000132	0,00006	0,0000000079
0,9	0,0000720	0,0000080	19,8	18,7	0,000150	0,00007	0,0000000102
1	0,00008	0,0000080	22,0	20,9	0,000167	0,00008	0,0000000127
1,1	0,0000880	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00008	0,0000000148
1,2	0,0000960	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00009	0,0000000162
1,3	0,0001040	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00010	0,0000000176
1,4	0,0001120	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00011	0,0000000190
1,5	0,0001200	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00012	0,0000000204
1,6	0,0001280	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00012	0,0000000218

Продолжение таблицы 62

1	2	3	4	5	6	7	8
1,7	0,0001360	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00013	0,0000000232
1,8	0,0001440	0,0000080	22,0	22,0	0,000176	0,00014	0,0000000246
1,875	0,00015	0,0000060	22,0	22,0	0,000132	0,00015	0,0000000194
					0,00242		0,0000000223

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 36.

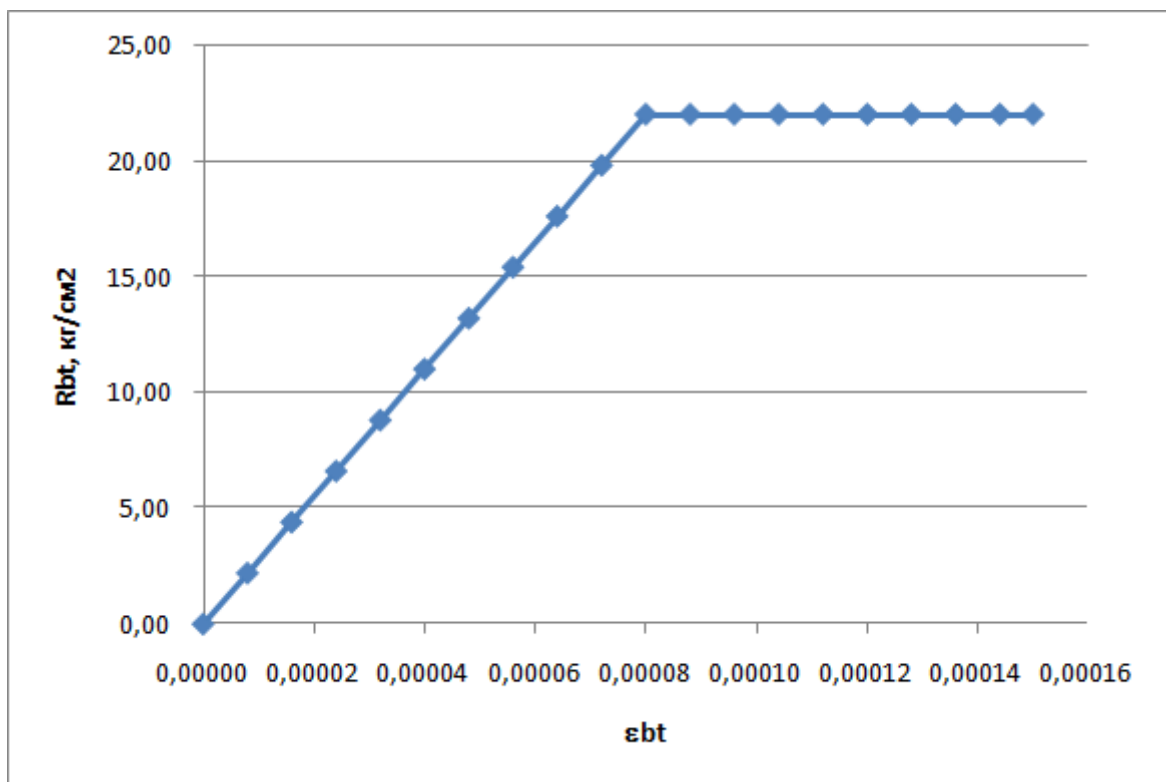


Рисунок 36 – Двухлинейная диаграмма деформирования бетона растяжению

Далее строим криволинейную диаграмму деформирования бетона сжатию, построение диаграммы отображено в таблице 63.

Диаграмма строится исходя из модуля деформации, с вычислением напряжения.

Таблица 63 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона

η_d	ε_b	A	B	C	ν_b	Σ	σ_b
1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	0,00019	0,2765432	0,28160	-0,01390	0,96628142	0,0	56,298
0,2	0,00038	0,2786600	0,27347	-0,01390	0,92759854	0,0	108,089
0,3	0,00057	0,2821881	0,26533	-0,01390	0,88459470	0,0	154,618
0,4	0,00076	0,2871275	0,25720	-0,01390	0,83800574	0,0	195,299
0,5	0,00095	0,2934780	0,24907	-0,01390	0,78861621	0,0	229,736
0,6	0,00114	0,3012398	0,24093	-0,01390	0,73721466	0,0	257,715
0,7	0,00133	0,3104129	0,23280	-0,01390	0,68455180	0,0	279,189
0,8	0,00152	0,3209971	0,22467	-0,01390	0,63130383	0,0	294,254
0,9	0,00171	0,3329926	0,21653	-0,01390	0,57804145	0,0	303,107
1,0	0,00190	0,3463994	0,20840	-0,01390	0,52520245	0,0	306
1,1	0,00209	0,9979083					305,359
1,2	0,00228	0,9916332					303,439
1,3	0,00247	0,9811748					300,239
1,4	0,00266	0,9665331					295,759
1,5	0,00285	0,9477080					289,998
1,6	0,00304	0,9246995					282,958
1,7	0,00323	0,8975077					274,637
1,8	0,00342	0,8661325					265,036
1,84	0,003505	0,85					260,1

Диаграмма построена в соответствии с рисунком 37.

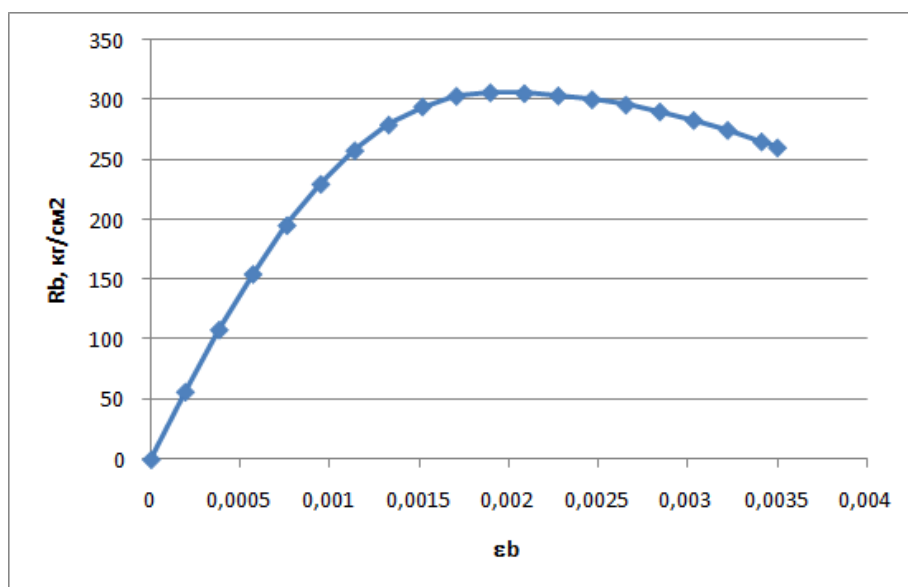


Рисунок 37 – Криволинейная диаграмма деформирования бетона при сжатии

Далее выполняем расчет прочности изгибаемого элемента по деформациям, пример расчета площадей представлен в таблице 64.

Таблица 64 – Расчет площадей диаграммы

$\varepsilon_j = \varepsilon_i - \varepsilon_{1/2}$	A	B	C	v_B	Σ	σ_B	N_{bd}	S_{bd}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00011	0,2760	0,2850	- 0,0139	0,98109	0,0	33,13	0,000331315	0,0000000364
0,0013	0,3089	0,2340	- 0,0139	0,69250	0,0	276,37	0,027637952	0,0000359293
0,0014	0,3142	0,2297	- 0,0139	0,66451	0,0	285,61	0,028561067	0,0000399855
0,0035	0,8499					260,09	0,027310311	0,0000957226

$\Sigma N_{b,d}$	$\Sigma S_{b,d}$	ε_{ci}	σ_{ci}	$S_{b,d}^* (N_{b,d}^*)$
10	11	12	13	14
0,003348777	0,0000003382	0,000100989	30,47	0,00364447
0,222717697	0,0001935223	0,000868913	216,00	0,359293379
0,251278764	0,0002335078	0,000929278	226,47	0,399854944
0,866059073	0,0017571407	0,002028892	305,69	0,911644185

Далее выполняем расчет деформаций с применением двухлинейной диаграммы в растянутой зоне и криволинейной диаграммы в сжатой зоне, расчет приведен в таблице 65.

Таблица 65 – Расчет деформаций изгибаемого элемента

ε_{bj}	x	A	B	C	S	ε_s	χ	z_b
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Стадия 2								
0,00011	6,74	0,01114532	0,054692	0,8750720	0,0	0,000151	0,0000163	6,18
0,0013	5,51	2,64357236	7,638800	122,22080	0,0	0,002477	0,0002360	3,68
Стадия 3								
0,0014	5,32	2153,817981	20,742857	11345,2	0,0	0,002811	0,0002632	3,53
0,0035	3,84	2965,109524	8,285307	11345,2	0,0	0,011110	0,0009134	2,22

Продолжение таблицы 65

z_s	z_{bt}	N_b	N_{bt}	N_s	равновесие	M_{ult} кг*см	M_{ult} кН*м	f (см)
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Стадия 2								
9,26	5,63	2462,51	1779,54	682,97	0,0	31595,7	3,16	0,06 8
10,49	0,38	11320,60	123,0	11197,59	0,0	159215,4	15,92	0,98 3
Стадия 3								
10,68	0,34	11455,52	110,32	11345,2	0,0	161662,5	16,16	1,09 6
12,16	0,10	11376,99	31,79	11345,2	0,0	163264,2	16,32	3,80 3

Изменение значений прогиба в зависимости от момента и переход из стадии 2 в стадию 3 представлено в Приложении А.

4.5 Расчет момента образования трещин M_{crc} по СП 63.13330.2012

Момент образования трещин без учета неупругих деформаций бетона следует определять в соответствии с пп. 4.5-4.8 [5], как для сплошного упругого тела, в соответствии с формулой (69).

$$M_{crc} = R_{b,ser} \cdot W \pm N e_y \quad (69)$$

где W – момент сопротивления приведенного сечения для крайнего растянутого волокна бетона;

e_y – расстояние от центра тяжести приведенного сечения элемента до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется.

Значения W и e_y определяются согласно п.4.6 [5]. Момент сопротивления W и расстояние e_y определяют, в соответствии с формулами (70) и (71).

$$W = \frac{I_{red}}{y_t}, \quad (70)$$

$$e_a = \frac{W}{A_{red}} \quad (71)$$

где y_t – расстояние от наиболее растянутого волокна бетона до центра тяжести приведенного сечения элемента;

I_{red} – момент инерции приведенного сечения относительно его центра тяжести, определяемый в соответствии с формулой (72).

$$I_{red} = I + I_s a + I'_s a \quad (72)$$

где I, I_s, I'_s – момент инерции соответственно бетона, растянутой и сжатой арматуры;

A_{red} – площадь приведенного сечения, которая определяется в соответствии с формулой (73).

$$A_{red} = A + A_s a + A'_s a \quad (73)$$

где $a = \frac{E_s}{E_b}$ – коэффициент приведения арматуры к бетону.

Момент образования трещин с учетом неупругих деформаций бетона растянутой зоны можно определять путем умножения модуля сопротивления W на коэффициент γ – определяется согласно табл. 4.1 [3].

4.6 Примеры расчета момента образования трещин M_{cr} по СП 63.13330.2012

Исходные данные для расчета, представлены в таблице 66.

Таблица 66 – исходные данные для расчета

Сечение	Бетон В15	Арматура А400, 2 диаметра 12
h=18 см	$E_{b,red}=204\ 000\ \text{кг/см}^2$	$A_s=2,26\ \text{см}^2$
b=12 см	$R_{b,ser}=306\ \text{кг/см}^2$	$E_s=2\ 000\ 000$
$a_{з.с.}=2\ \text{см}$	$R_{bt,ser}=22\ \text{кг/см}^2$	

Определяем коэффициент армирования:

$$\mu = \frac{A_s}{b \cdot h} = \frac{2,26}{12 \cdot 18} = 0,0104$$

Определяем значения W и e_y с учетом арматуры при коэффициенте приведения:

Для прямоугольного сечения $\gamma_i = h/2 = 9$ см, а момент инерции будет равен, в соответствии с формулой (74).

$$a = \frac{E_s}{E_b} = \frac{2000000}{307000} = 6,51 \quad (74)$$

$$I_{red} = \frac{12 \cdot 18^3}{12} + 2 \cdot 6,51 \cdot 2,26 \cdot (0,5 \cdot 18 - 2)^2 = 7273,83 \text{ см}^4$$

Момент инерции будет равен:

$$W = \frac{I_{red}}{y_i} = \frac{7273,83}{9} = 808,2 \text{ см}^3$$

Определяем площадь приведенного сечения:

$$A_{red} = b \cdot h + 2 \cdot A_s \cdot a = 18 \cdot 12 + 2 \cdot 2,26 \cdot 6,51 = 245,42 \text{ см}^3$$

Отсюда находим:

$$e_y = \frac{W}{A_{red}} = \frac{808,2}{245,42} = 3,29 \text{ см}$$

С учетом неупругих деформаций бетона растянутой зоны, умножим момент сопротивления W на коэффициент $\gamma=1,3$ (принятый по табл. 4.1 [3] для прямоугольного сечения), т.е. $W = 808,2 \cdot 1,3 = 1050,66 \text{ см}^3$

Отсюда определяем момент образования трещин по формуле (69).

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot W = 22 \cdot 1050,66 = 23114,52 \text{ кг} \cdot \text{см} = 2,31 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Момент образования трещин, без учета неупругих деформаций вычисляется без коэффициента γ :

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot W = 22 \cdot 808,2 = 17780,4 \text{ кг} \cdot \text{см} = 1,77 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Сравнение моментов образования трещин представлено в таблице 67.

Таблица 67 – момент образования трещин M_{cr}

Значение M_{cr} , кН*м	M_{cr} по СП без учета неупругих деформаций	M_{cr} по СП с учетом неупругих деформаций	M_{cr} по двухлинейной диаграмме	M_{cr} по криволинейной диаграмме
		1,77	2,31	2,50

Сравнение расчетных значений деформаций производится с опытными данными Ерышева В.А.

Сравнения значений представлены в Приложении Б.

Как можно заметить в целом момент образования трещин с использованием криволинейной диаграммы сжатой зоны получается самым большим в отличие от методик расчета по СП, что свидетельствует о некотором запасе.

Что в дальнейшем повлияет на стоимость конструкции, а также здания или сооружения в целом.

Учитывая экономические ситуации в стране и мире, развитие технических решений, связанных с экономией материалов, да и денежных средств в целом является актуальной и перспективной задачей в целом.

В дальнейшем развитие перспективных направлений в том числе методик расчета железобетона направленных на экономичность конструкций (с точки зрения затрат материалов) также будут являться перспективными.

Выводы по четвертой главе

В главе 4, была описана методика расчета деформаций бетона (момент образования трещин, прогибы) на стадии до образования трещин, после образования трещин (при упругой и пластической работе арматуры) по нормам СП 63.13330.2012, на основе нелинейной деформационной модели с использованием диаграмм двухлинейной, криволинейной. Выполнены расчеты момента образования трещин, прогибов по действующим нормам и по предложенным методикам. Исходя из полученных расчетов можно сделать вывод, что расчеты по СП 63.13330.2012 (без учета и с учетом неупругих деформаций) дает значение $M_{сгс}$ наименьший, а с использованием криволинейной диаграммы деформирования порядка на 20 % больше, что свидетельствует о не котором запасе. Из чего можно сделать вывод, что получение заниженных значений по СП при проектировании приведет к переизбытку материала и соответственно удорожанию конструкции в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Описаны нормируемые диаграммы с построением их на ЭВМ.
2. Произведены расчеты прочности изгибаемых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели, описан алгоритм программы на ЭВМ.
3. Описан алгоритм расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели и построения программы на ЭВМ, составлена программа для расчета прочности на ЭВМ, выполнены расчеты.
4. Произведено сравнение расчетов прочности по нелинейной деформационной модели изгибаемых и внецентренно сжатых элементов с расчетами по методу предельных усилий. Сравнение расчетов показывает, что значения разрушающего момента получаются близки, что говорит о целесообразности применения метода расчета по деформационной модели.
5. Описан метод расчета деформаций изгибаемых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели (до образования и после образования трещин), описан алгоритм построения программы на ЭВМ, составлена программа для расчета деформаций на ЭВМ. Произведено сравнение с опытными данными Ерышева В.А., которые дают близкие значения что также свидетельствует о целесообразности метода расчета по деформационной модели. Данный метод расчета позволяет исключить итерационный процесс, что значительно упрощает процедуру расчета, в отличие от расчета по деформационной модели описанном в СП 63.13330.2012. Также данный метод позволяет определять деформации на любой стадии нагружения (задаваясь деформациями на крайнем волокне), что невозможно выполнить по методикам расчета, описанным в выше указанном СП.

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

В общем смысле предложенные методики позволяют экономить материалы как в конструкции (изгибаемые, внецентренно сжатые железобетонные элементы) так и по зданию в целом, что при нынешних экономических ситуациях в стране, да и в целом в мире (острый дефицит материалов, средств, энергии затрачиваемой на производство конструкций и строительства в целом). И при таких условиях требуется развитие различных технических направлений (в том числе в области расчета железобетонных конструкций, так как железобетон является очень распространенным материалом в строительстве) направленных на экономию материалов и средств в целом считается очень актуальной задачей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Давидюк, А.Н. Железобетон как фактор глобализации / А.Н. Давидюк, Ю.С. Волков / Технологии бетонов. – 2014 - №7 – с. 52-55.
2. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: НИИЖБ Госстрой СССР, 1985. – 87 с.
3. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: ГУП НИИЖБ Госстроя России, 2013. – 155 с.
4. Ерышев В.А. Методика расчета деформаций бетона при режимных нагрузениях: монография / В.А. Ерышев. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. – 131 с.: пер.
5. 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.
6. 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.
7. Карпенко Н.И. К построению обобщенной зависимости для диаграммы деформирования бетона [Текст] / Н.И. Карпенко // Строительные конструкции. – Минск, 1983. – С. 164-173.
8. 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.
9. 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.

10. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
11. Карпенко Н.И. Проектирование бетонных, железобетонных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета / Н.И. Карпенко, Б.С. Соколов, О.В. Радайкин / изд. АСВ. – 2019. – 194 с.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования. ФАУ «ФЦС». Москва – 2017. – 197 с.
17. 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.
18. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. – М.: ГУП НИИЖБ Госстроя России, 2004. – 186 с.

19. Бондаренко В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов/: Монография. – М.: Издательство АСВ. 2004.- 472 с.

20. 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.

21. 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.

22. Тошин Д.С. Прикладные возможности деформационной модели железобетона / Д.С. Тошин / Молодой ученый. – 2016 - № 29 (133) – с. 164-166.

23. 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. 11-19.

24. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. – Минск: Минстройархитектуры, 2003. – 149 с.

25. 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.

26. 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.

27. 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. 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.

29. 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.

30. 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,

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. 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.
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.
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. Chichaya Boonmee, Gravity Load Collapse Behavior of Non engineered Reinforced Concrete Columns, Published: 18 March 2018, Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2018, Article ID 9450978, 12 pages, pp 1-12.
39. Chunyi Yu, Size Effect on the Seismic Performance of High-Strength Reinforced Concrete Columns with Different Shear Span-to-Depth Ratios, Published: 19 December 2018, Hindawi Mathematical Problems in Engineering Volume 2018, Article ID 2723198, 19 pages, pp 1-19.
40. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings.
41. Jieqiong Wu, Hysteretic Behavior of Eccentrically Loaded Reinforced Air-Entrained Concrete Columns under Combined Effects of Freeze-Thaw Cycles and Seawater Corrosion, Published: 21 May 2018, Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2018, Article ID 3931791, 10 pages, pp 1-10.
42. Mohammad Esmaeilnia Omran and Somayeh Mollaei, Investigation of Axial Strengthened Reinforced Concrete Columns under Lateral Blast Loading, Published: 16 October 2017, Hindawi Shock and Vibration Volume 2017, Article ID 3252543, 18 pages, pp 1-18.

43. 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.

44. 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.

45. Sher AliMirza, Examination of StrengthModeling Reliability of Physical Tests on Structural Concrete Columns, Published: 28 Jule 2010, Civil Engineering, Lakehead University, Thunder Bay, ON, Canada, pp 1-16.

46. 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.

47. Woraphot Prachasaree, Sitthichai Piriyaakootorn, Athawit Sangsrijun, and Suchart Limkatanyu, Behavior and Performance of GFRP Reinforced Concrete Columns with Various Types of Stirrups, Published: 2 August 2015, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Polymer Science Volume 2015, Article ID 237231, 9 pages, pp 1-9.

48. Yu Tang, Numerical Study on Seismic Behavior of Underwater Bridge Columns Strengthened with Prestressed Precast Concrete Panels and Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements, Published: 7 August 2018, Hindawi International Journal of Polymer Science Volume 2018, Article ID 7438694, 15 pages, pp 1-15.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Графики изменения прогиба от момента М



Рисунок А.1 – График момент – прогиб до образования трещин (стадия 1)



Рисунок А.2 – График момент – прогиб после образования трещин (стадия 2 и 3)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Сравнение расчетных и опытных данных деформаций

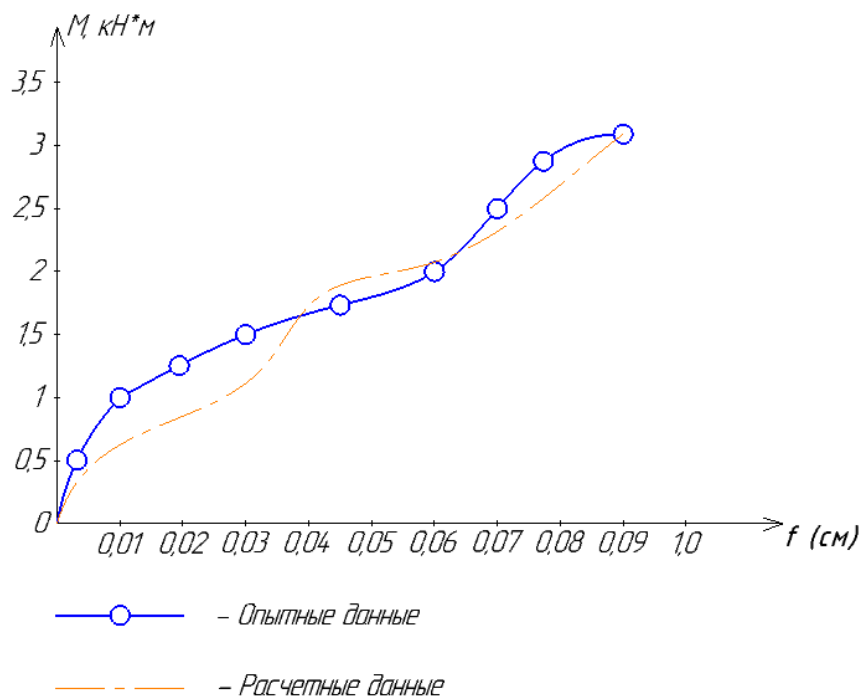


Рисунок Б.1 – Сравнение значений момент – прогиб до образования трещин

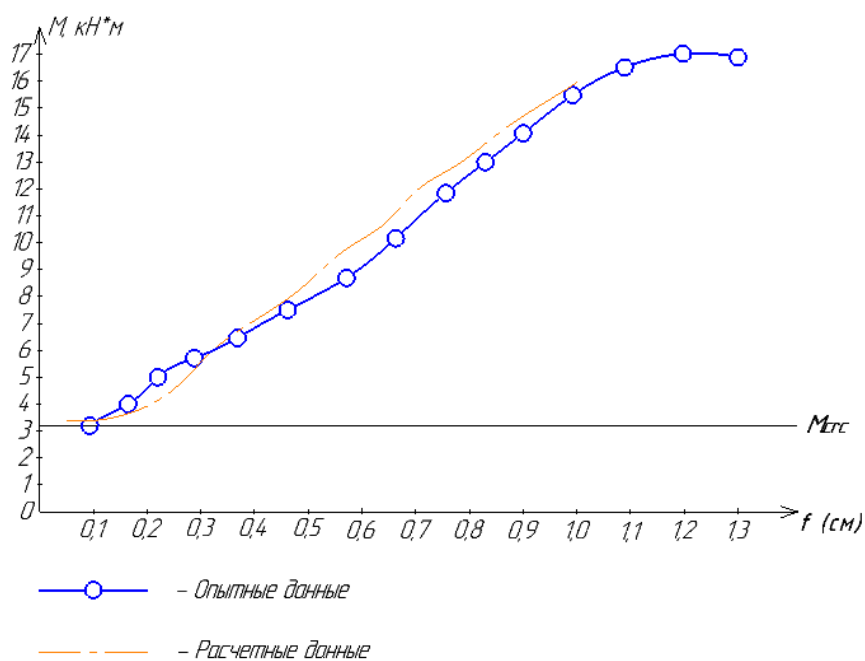


Рисунок Б.2 – Сравнение значений момент – прогиб после образования трещин

Продолжение Приложения Б

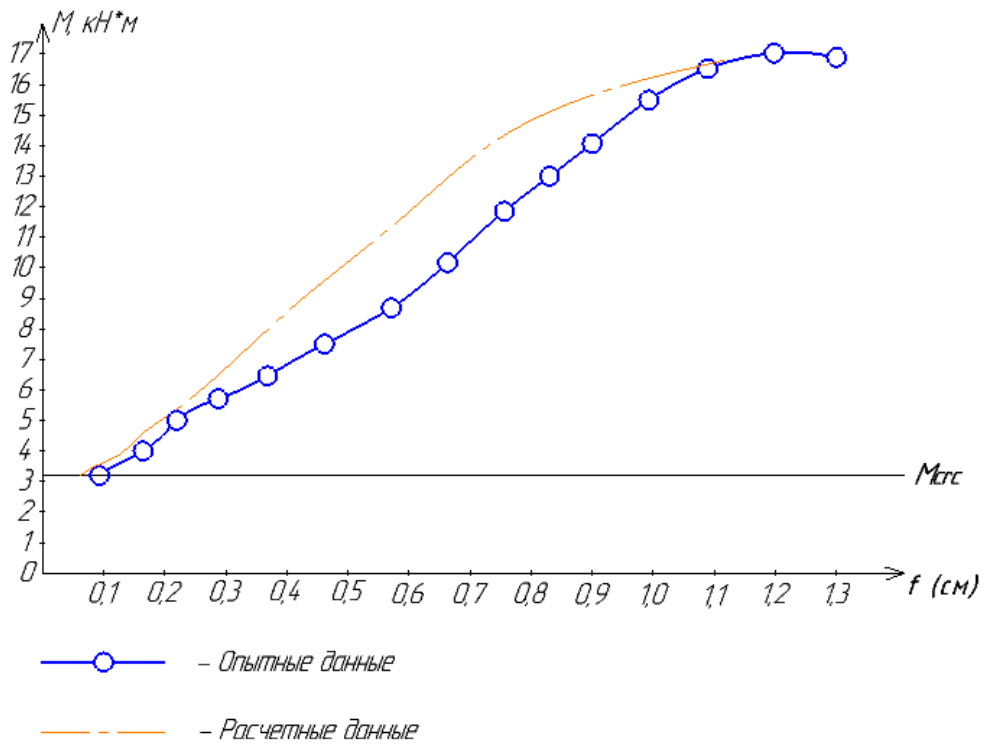


Рисунок Б.3 – Сравнение значений момент – прогиб, расчет по СП и опыты