

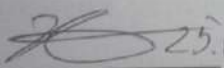
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Кафедра «Строительство и архитектура»
Направление подготовки 08.04.01– «Строительство»
Профиль – «Инновационные технологии в строительстве»


АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

Учет псевдопластических деформаций бетона при проектировании
несущих систем зданий

Студент группы ПСм-1

 25.06.23 А.В. Кручинин
подпись, дата

Научный руководитель,
канд. техн. наук, доцент

 25.06.23 В.А. Дзюба
подпись, дата

2023

Общая характеристика работы

Актуальность. Нелинейные системы (нелинейно деформируемые) - это системы, в которых зависимость внутренних усилий (напряжений), деформаций и перемещений (смещений) от вызывающей их нагрузки не прямо пропорциональна (нелинейна).

Неравномерность деформирования проявляется в том, что при нагружении образцов, помимо упруго-мгновенных деформаций развиваются неупругие деформации и, в частности, деформации ползучести.

В случае деформаций ползучести наблюдается нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями. Если мы нагрузим несколько одинаковых образцов различными силами, деформации ползучести, накопленные в этих образцах за одинаковые промежутки времени, будут пропорциональны не силам, а иным параметрам. Обычно в задачах строительной механики предполагается линейная постановка (в большинстве случаев строительные конструкции в эксплуатации можно рассматривать как физически и геометрически линейные). Однако, при больших деформациях или использовании неупругих материалов возникают и решаются нелинейные задачи.

Правильный учет нелинейной работы конструкции позволяет осуществлять построение корректных расчетных схем, раскрывать дополнительные запасы несущей способности, снижать материалоемкость, обеспечивать конструктивную безопасность, реализовывать моделирование процессов жизненного цикла конструкций - процесс нагружения, процесс возведения, процесс изменения НДС конструкции во времени, устойчивость от прогрессирующего обрушения.

Объект исследования – железобетонные статически неопределимые системы.

Предмет исследования – Методика нелинейных расчетов статически неопределимых систем с учетом реальных диаграмм деформирования бетона и арматуры.

Целью диссертационной работы является учет псевдопластических деформаций бетона при проектировании несущих систем зданий.

Методы исследования. В проведенных исследованиях применялись теоретический и расчетно-аналитические методы. Методической базой диссертационной работы являются работы В.А. Дзюбы, Ю.А. Родиной, Н.В. Байкова, А.М. Белостоцкого, Л.Л. Паньщина и др.

Личное участие автора состоит в разработке методики нелинейного расчета железобетонных балок с переменной жесткостью сечений в ПК «ЛИРА САПР» и «ГИД», отраженной в опубликованных работах, определении количественных оценок перераспределения усилий статически неопределимых железобетонных системах.

Достоверность и обоснованность работы обеспечивалась комплексом теоретических и расчетно-аналитических исследований, который, базируется на общих принципах фундаментальной науки и научных основах прогрессивной техники и технологии. В работе приведены результаты расчётов железобетонной балки с переменной жесткостью в 5-ти итерациях. Расчетные модели балки построены с помощью ПК «ЛИРА САПР», расчеты произведены с помощью «ГИД» и ПК «ЛИРА САПР».

Научная новизна: Полученные в результате исследования новые данные по перераспределению усилий в железобетонных конструкциях и новая методика выполнения нелинейных расчета железобетонных конструкций с использованием программы «ГИД» и «ЛИРА САПР».

Практическая значимость

Результаты исследований нелинейной работы конструкций позволяют определять истинное напряженно-деформированное состояние конструкции, выявлять дополнительные резервы несущей способности, снижать материалоемкость.

Апробация работы.

Основные положения диссертации опубликованы в двух научных статьях. Материалы диссертации опубликованы в двух научных журналах:

- Кручинин А.В. Дзюба В.А. Современные методы определения усилий в несущих системах зданий. / А.В. Кручинин В.А. Дзюба // Международная научно-практическая конференция «Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия», г. Комсомольск-на-Амуре.

- Кручинин А.В. Дзюба В.А. Поведение бетона при псевдопластическом деформировании / А.В. Кручинин В.А. Дзюба // Материалы международной научно практической конференции «Региональные аспекты науки развития и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия (2022 г.)».

Личный вклад. В диссертации представлены результаты исследования, полученные автором самостоятельно. Автору принадлежит:

- постановка задачи исследования;
- анализ литературных источников;
- разработка методик и проведение экспериментальных исследований;
- обработка полученных результатов и их обобщение;



Объем работы. Диссертация состоит из введения. Трех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 113 страницах, содержит 1 таблиц, 168 рисунков и список литературы, включающий 38 наименований.

Основное содержание работы



Введение. Во введении обоснована актуальность диссертационной работы.

В главе 1 «Несущие системы многоэтажных зданий» рассматриваются конструктивные схемы зданий (таблица 1.1), диаграммы деформирования материалов конструкций учет физической нелинейности в расчетах несущих систем.


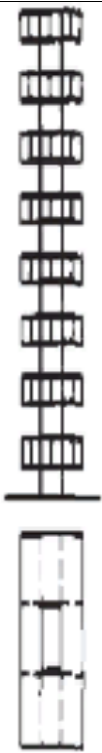
Таблица 1.1

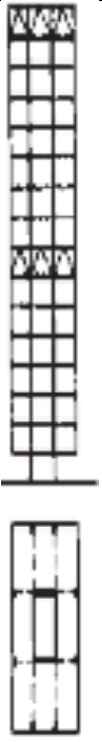

№ Номер	Схема	Характеристики
1		<p>Бескаркасная с параллельными несущими стенами</p> <p>Эта система состоит из плоских вертикальных элементов, которые загружены собственным весом, и поэтому способны эффективно воспринимать горизонтальные воздействия. Система параллельных стен широко применяется для жилых зданий, которые не требуют устройства больших свободных объемов и в которых нет необходимости устраивать специальные стволы жесткости для систем инженерного оборудования</p>
2		<p>Ствольная с наружными стенами-диафрагмами</p> <p>Плоские вертикальные элементы образуют наружные стены ствола здания. Это позволяет устраивать открытые внутренние объемы, величина которых зависит от пролетов, перекрываемых плитами перекрытий. В стволах размещаются системы инженерного оборудования и вертикального транспорта, а сами стволы повышают жесткость здания</p>

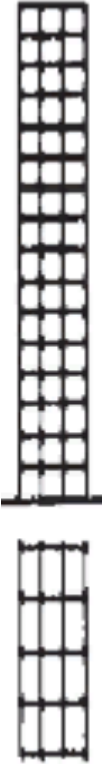
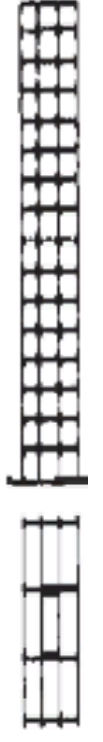
Продолжение таблицы 1.1

<p>3</p>		<p>Коробчатая (объемно-блочная)</p> <p>Здания объемно-блочной (коробчатой) схемы образуются из трехмерных блоков высотой на этаж, которые напоминают здания с несущими стенами, когда они смонтированы и соединены друг с другом. На рисунке показана система, в которой блоки собираются как кирпичи в кладке, в результате чего имеем перекрестную систему несущих стен-балок</p>
<p>4</p>		<p>С консольными перекрытиями в уровне каждого этажа</p> <p>Опираение системы перекрытий на центральный ствол жесткости допускает создание свободного от колонн пространства. При этом размеры здания ограничены несущей способностью плит. Такое решение требует применения сталей с высокими механическими характеристиками, особенно при больших вылетах плит перекрытий. Жесткость плит может быть увеличена с помощью предварительного напряжения</p>



Продолжение таблицы 1.1

5		<p>Каркасная с безбалочными плитами перекрытия</p> <p>Обычно такая горизонтальная плоская конструкция состоит из железобетонных панелей одинаковой толщины, опирающихся на колонны. При любом решении система не имеет высоких балок и, таким образом, допускает минимальную высоту этажа</p>
6		<p>С консолями высотой на этаж в уровне каждого второго этажа</p> <p>Консольные решетчатые конструкции высотой на этаж устраиваются через один этаж. Пространство внутри решетчатых конструкций этажа обычно используется для определенных (с фиксированным оборудованием) операций, а полностью свободное пространство между решетчатыми конструкциями может быть предназначено для любых видов деятельности</p>



7		<p>С подвешенными этажами</p> <p>Такая система предполагает эффективное использование материала при применении вместо колонн подвесок, воспринимающих нагрузки от перекрытий. Несущая способность сжатых элементов обычно снижается в связи с продольной устойчивостью, в то время как несущая способность растянутых элементов используется полностью. Подвески передают вертикальную нагрузку на консольные оголовки, установленные на центральном жестком стволе</p>
8		<p>С фермами высотой на этаж, расположенными в шахматном порядке</p> <p>Фермы высотой на этаж размещаются таким образом, что каждое перекрытие здания опирается на верхний пояс одной фермы и нижний пояс следующей фермы. Кроме восприятия вертикальных нагрузок такая компоновка ферм снижает до минимума требования к системе горизонтальных связей, так как ветровые нагрузки передаются полками ферм и плитами перекрытий</p>

9		<p>Рамно-каркасная</p> <p>Жесткие узлы сопряжения линейных элементов позволяют создать вертикальные и горизонтальные диски жесткости. Вертикальные диски образуются колоннами и ригелями в основном с прямоугольной сеткой (жесткими рамами). Аналогичная сетка продольных и поперечных ригелей создает горизонтальные диски. Важнейшими факторами для создания пространственной жесткости остова здания являются высота этажа и шаг колонн. Пространственная жесткость зависит от несущей способности и жесткости отдельных колонн, ригелей и узлов стыков</p>
10		<p>Каркасно-ствольная (ядровая)</p> <p>Жесткая рама воспринимает горизонтальные нагрузки при работе ее элементов преимущественно на изгиб. Такая схема деформирования приводит к большим горизонтальным перемещениям зданий определенной высоты. Однако введением ствола жесткости можно существенно увеличить боковую жесткость здания за счет взаимодействия рамного каркаса со стволом. В стволах размещают системы инженерного оборудования и вертикального транспорта</p>

Продолжение таблицы 1.1

<p>11</p>		<p>Каркасная с решетчатыми диафрагмами жесткости</p> <p>Сочетанием жестких (или шарнирных) рам с вертикальными решетчатыми диафрагмами, работающими на сдвиг, можно добиться существенного повышения несущей способности и жесткости здания. При проектировании может считаться, что каркас воспринимает вертикальные нагрузки, а вертикальные решетчатые диафрагмы - горизонтальные (ветровые) воздействия</p>
<p>12</p>		<p>Каркасная с решетчатыми горизонтальными поясами и решетчатым стволом жесткости</p> <p>Горизонтальные решетчатые пояса связывают наружные колонны со стволом и тем самым уменьшают степень раздельной работы рамного каркаса и ствола. Система связей называется венчающей сквозной конструкцией в случае расположения горизонтального пояса наверху здания и поясной конструкцией при размещении их в нижней части здания</p>

Продолжение таблицы 1.1

<p>13</p>		<p>Коробчато-ствольная (труба в трубе)</p> <p>Наружные колонны и балки располагаются достаточно близко друг от друга, и каркас наружных стен превращается в оболочку с проемами. Все здание работает как полая трубчатая конструкция, консольно заделанная в грунт. Центральный ствол (труба) увеличивает жесткость здания, воспринимая горизонтальные нагрузки вместе с наружной коробкой (трубой)</p>
<p>14</p>		<p>Много секционная коробчатая</p> <p>Здание такой конструктивной схемы выполняется сблокированным из отдельных секций, решенных по коробчатой схеме (пучок труб). Горизонтальные нагрузки воспринимаются как наружной стеновой коробкой, так и межсекционными стенами. В этом случае повышение жесткости системы очевидно. Такое решение допускает строительство зданий очень большой высоты и с большим открытым пространством междуэтажных перекрытий</p>

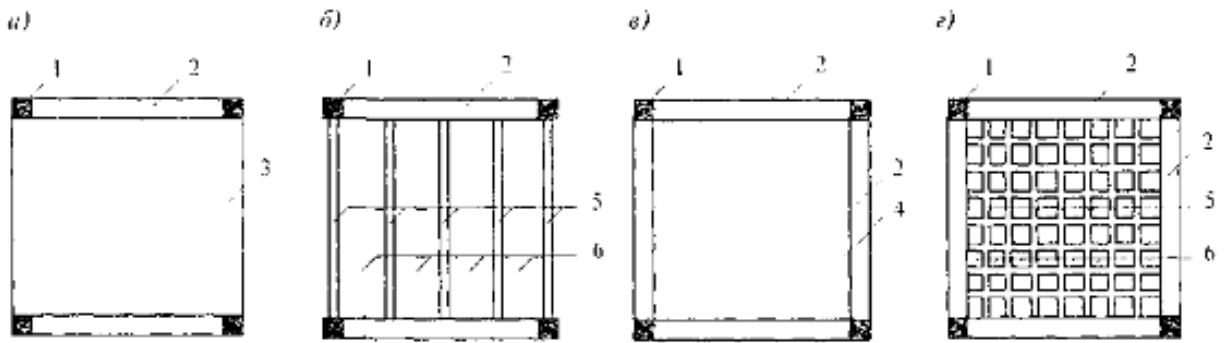


Рисунок 1.2 - Плиты перекрытий в колонных КС с балками и в стеновых КС

а, б - балки и стены в одном направлении; в, г - балки и стены в двух направлениях;
 1 - колонны; 2 - балки или стены; 3 - плита сплошная или пустотная; 4 - плита сплошная или пустотная кессонная; 5 и 6 - ребра и полки ребристой и кессонной плит.

1. Железобетон самый перспективный конструктивный материал 21 века.
2. Предпочтение в современном строительстве отдается монолитному железобетону.
3. Основной конструктивной схемой монолитных железобетонных зданий является каркасная конструктивная схема.
4. Для надежного проектирования железобетонных конструкций необходимо учитывать физическую нелинейность.
5. Учет физической нелинейности следует производить на основе деформационной модели бетона и арматуры.

Глава 2. «Перераспределение усилий в стержневых системах при учете физической нелинейности»

Рассмотрим явление перераспределения усилий на примере статически определимой и статически неопределимой балок.

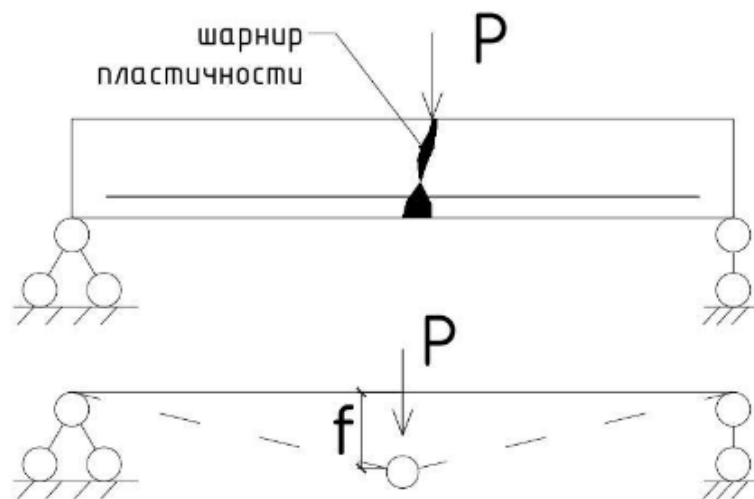


Рисунок 2.1 – Изменение расчетной схемы шарнирноопёртой балки с учетом физической нелинейности.

II стадия р-ты: в нижней части раскрываются трещины, арматура течет, при неизменной силе P увеличиваются деформации, образуется шарнир пластичности.

III стадия р-ты:

$$M_{разгр.} = \frac{M_{тек.}}{\omega_{арм-ре}} = M_{Rd}. \quad (2.1)$$

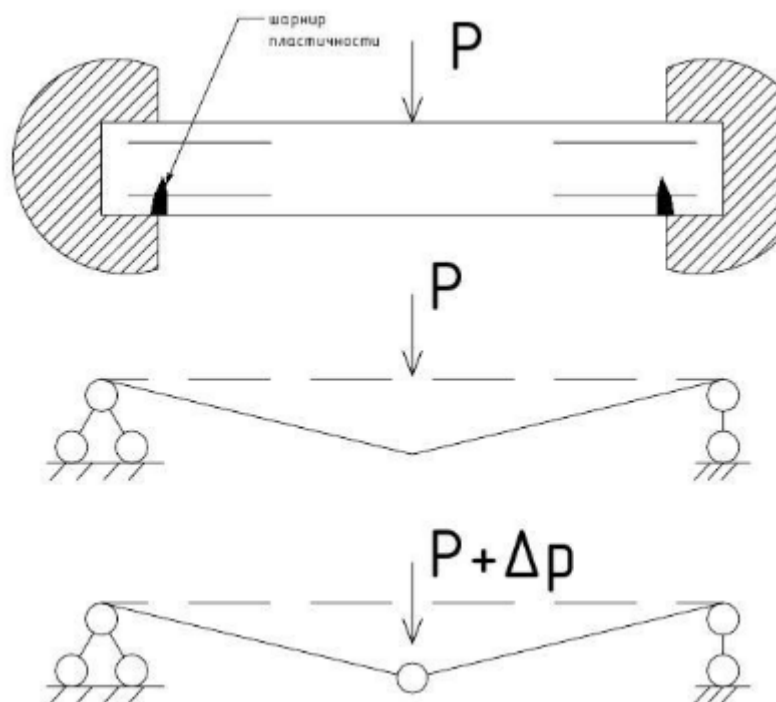


Рисунок 2.2 – Изменение расчетной схема балки при жесткой заделке с учетом физической нелинейности.

При нагрузке P в опорных участках возникают предельные деформации арматуры. Арматура начинает течь. Балка становится шарнирно – опертой (стат. определимой).

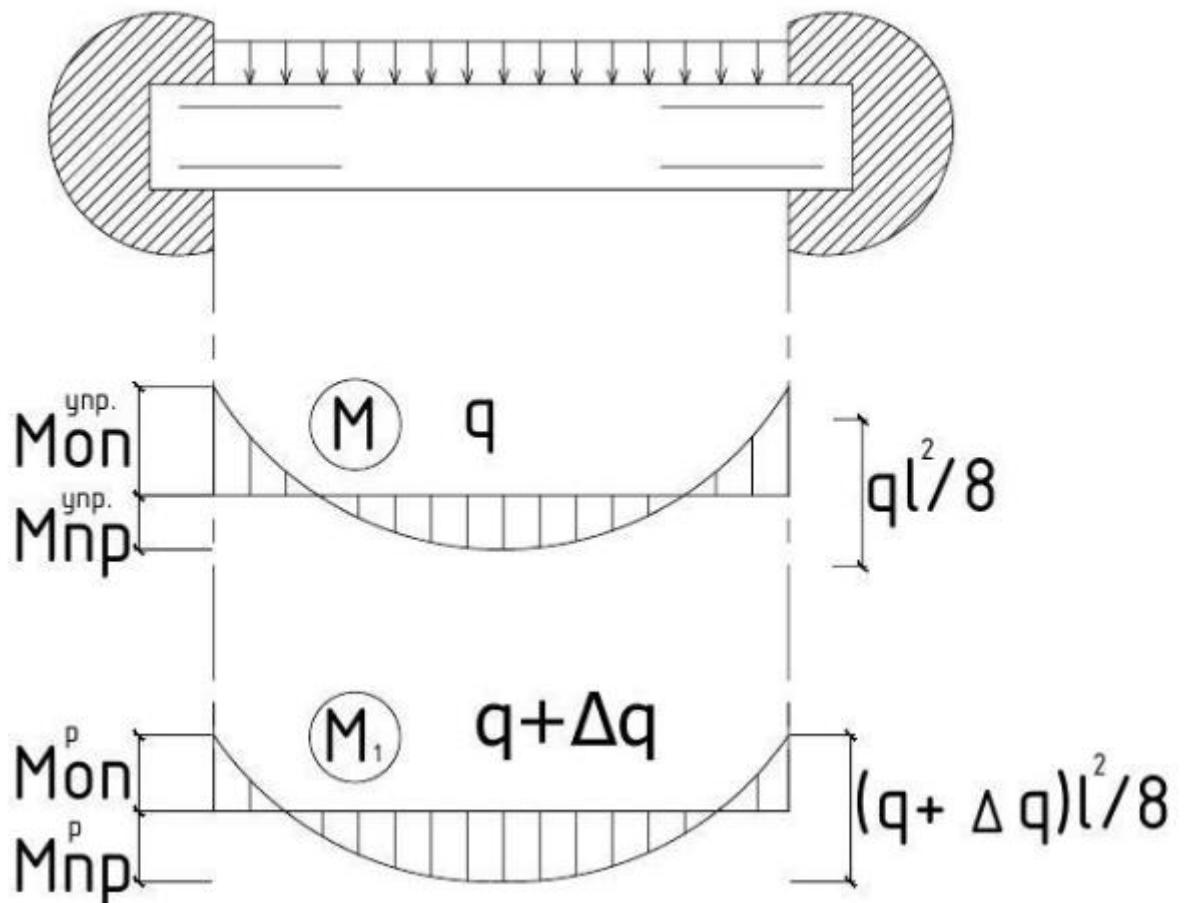


Рисунок 2.3 – Эпюры моментов балки с жесткой заделкой.

$$M_{\text{он}}^{\text{упр.}} + M_{\text{пр}}^{\text{упр.}} = \frac{ql^2}{8} M_{\text{он}}^{\text{р}} + M_{\text{пр}}^{\text{р}} = \frac{(q + \Delta q)l^2}{8} \quad (2.2)$$

$$M_{\text{он}}^{\text{упр.}} = \frac{ql^2}{12} M_{\text{он}}^{\text{р}} = \frac{(q + \Delta q)l^2}{16(17)} \approx 0,7 \times M_{\text{он}}^{\text{упр.}} \quad (2.3)$$

$$M_{\text{пр}}^{\text{упр.}} = \frac{ql^2}{24} M_{\text{пр}}^{\text{р}} = \frac{(q + \Delta q)l^2}{15} \approx M_{\text{пр}}^{\text{упр.}} + 0,3 \times M_{\text{он}}^{\text{упр.}} \quad (2.4)$$

Если уменьшить сечение опорной арматуры в балке по сравнению с сечением пролетной арматуры (при условии, что сечение пролетной арматуры немного больше расчетного значения), то в балке образуется пластичный шарнир. Этот шарнир не вызывает разрушение балки, а делает ее статически определенной системой. В результате этого возможно увеличение деформаций без необходимости увеличивать внешнюю нагрузку.

При определении усилий в статически неопределимых конструкциях методами строительной механики используется предположение об идеальной

упругости материалов и неизменности жесткостных характеристик сечений конструктивных элементов. Однако, в железобетонных конструкциях, кроме упругих, наблюдаются и неупругие деформации, которые приводят к раскрытию трещин и изменению жесткости, а, следовательно, и перераспределению внутренних усилий. Именно поэтому фактическое напряженное состояние статически неопределимых конструкций в процессе эксплуатации, и особенно на пределе несущей способности, существенно отличается от состояния, получаемого расчетом в упругой стадии.

Сегодня при расчете статически неопределимых железобетонных конструкций на несущую способность широко используется метод предельного равновесия. Он учитывает перераспределение усилий, происходящее под влиянием различных факторов, таких как образование трещин, неупругие свойства бетона и арматуры, частичное нарушение сцепления арматуры с бетоном. Давайте рассмотрим суть этого метода на примере.

Рассмотрим свободно опертую железобетонную балку, армированную стержнями из стали с физическим пределом текучести. При определенном значении внешней равномерно распределенной нагрузки в опасном сечении напряжения в арматуре достигают предела текучести, что приводит к возникновению участка больших местных деформаций, известного как шарнир пластичности.

Отличительной особенностью пластического шарнира от идеального, в котором изгибающий момент равен нулю, является действие в нем постоянного момента, равного предельной для заданного сечения величине $M = R_s A_j$. Кроме того, пластический шарнир представляет собой механизм одностороннего действия: при уменьшении нагрузки он закрывается.

Для армирования железобетонных элементов с учетом физической нелинейности необходимо применять специальный подход и методы расчета. Из-за нелинейного поведения как бетона, так и арматуры, при проектировании необходимо учитывать эти особенности.

Основные аспекты армирования железобетонных элементов с учетом физической нелинейности включают моделирование нелинейного поведения бетона. Для этого могут использоваться различные материальные модели, например, модель бетона с ограничением деформаций (например, "смягчающийся бетон") или модель бетона с учетом трещин (например, модель с использованием конечных элементов и моделированием трещин).

При армировании железобетонных элементов важно учитывать нелинейное поведение арматуры, состоящей из стальных стержней. Для этого используются модели, которые принимают во внимание пластичность и деформации арматуры при возникновении больших напряжений. Одна из таких моделей - модель пластичности с пластическим законом МПа.

Расчет напряжений и деформаций в элементе также требует учета физической нелинейности материалов. Для этого могут применяться методы конечных элементов и другие численные методы, которые позволяют определить оптимальное расположение арматуры в элементе и учесть нелинейное поведение материалов.

При армировании необходимо учитывать важное взаимодействие между бетоном и арматурой. В этом процессе необходимо учитывать передачу напряжений между бетоном и арматурой, а также принципы работы и распределение усилий в арматуре при возникновении пластической деформации. Такой учет обеспечит надежность и долговечность конструкции. При определении соотношений между напряжениями и деформациями, а также условий прочности и трещиностойкости материалов, необходимо учитывать физическую нелинейность, анизотропию и ползучесть. Важно различать две стадии деформирования элементов: до и после образования трещин.

Для бетона до образования трещин рекомендуется использовать нелинейную ортотропную модель, которая позволяет учитывать направленное развитие эффекта дилатации и неоднородность деформирования при сжатии и растяжении.

В процессе проектирования бетонных конструкций допустимо использование квазиизотропной модели бетона, учитывающей воздействие различных факторов на среднем по объему участке. Для железобетонных конструкций, необходимо учитывать соотношение осевых деформаций арматуры и окружающего бетона, за исключением концевых участков арматуры, не оборудованных специальными анкерами.

С появлением шарнира пластичности происходит взаимный поворот частей балки, трещины раскрываются, прогиб нарастает, и балка разрушается. Иначе ведет себя статически неопределимая конструкция. Рассмотрим, например, однопролетную балку с защемленными концами, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой q , с одинаковым продольным армированием на опорах и в пролете

Выводы по 2 главе:

1. Для расчета перераспределения усилий в стержневых элементах из железобетона необходимо применять методы, учитывающие нелинейное поведение материалов и специфику железобетона.
2. Метод конечных элементов (МКЭ) является одним из наиболее широко используемых методов для расчета нелинейных стержневых систем.
3. Нелинейные методы статических расчетов применимы в том случае, если в рассматриваемой конструкции действуют неупругие деформации.
4. при учете физической нелинейности железобетона следует применять полные диаграммы деформирования бетона и стальной арматуры.

Глава 3. «Деформационная модель железобетонных конструкций».

Для определения напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций при изгибе необходимо определить изгибающий момент и кривизны. Такой расчет позволяет производить программа «GID». В качестве нагрузки на каждом этапе принимается деформация на крайнем сжатом волокне бетона. Проектирование железобетонной конструкции в программном комплексе «GID» начинается с построения диаграммы сжатого бетона. Данная диаграмма описывается в виде

составной функции, включающей три участка:

- Криволинейный участок 1 при изменении деформации от нуля до ε_l ;
- Прямолинейный участок 2 при деформации от ε_l до $\varepsilon_{0,25}$;
- Прямолинейный участок 3 при деформации от $\varepsilon_{0,25}$ до ε_0 .

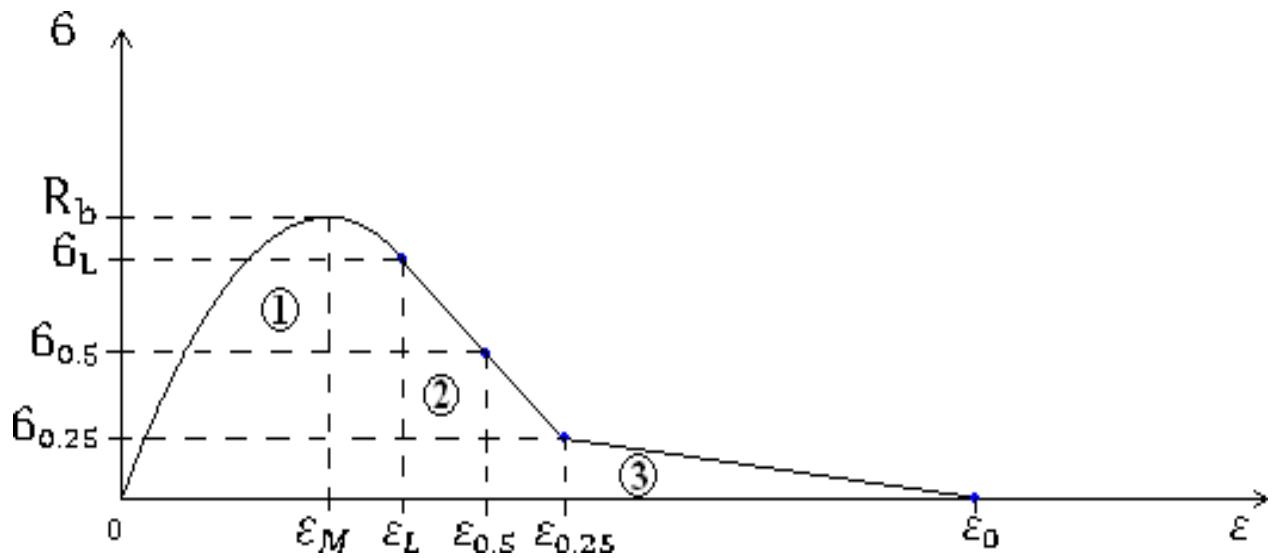


Рисунок 3.6 - Полная диаграмма деформирования сжатого бетона

Диаграмма зависимости "Момент – Кривизна"

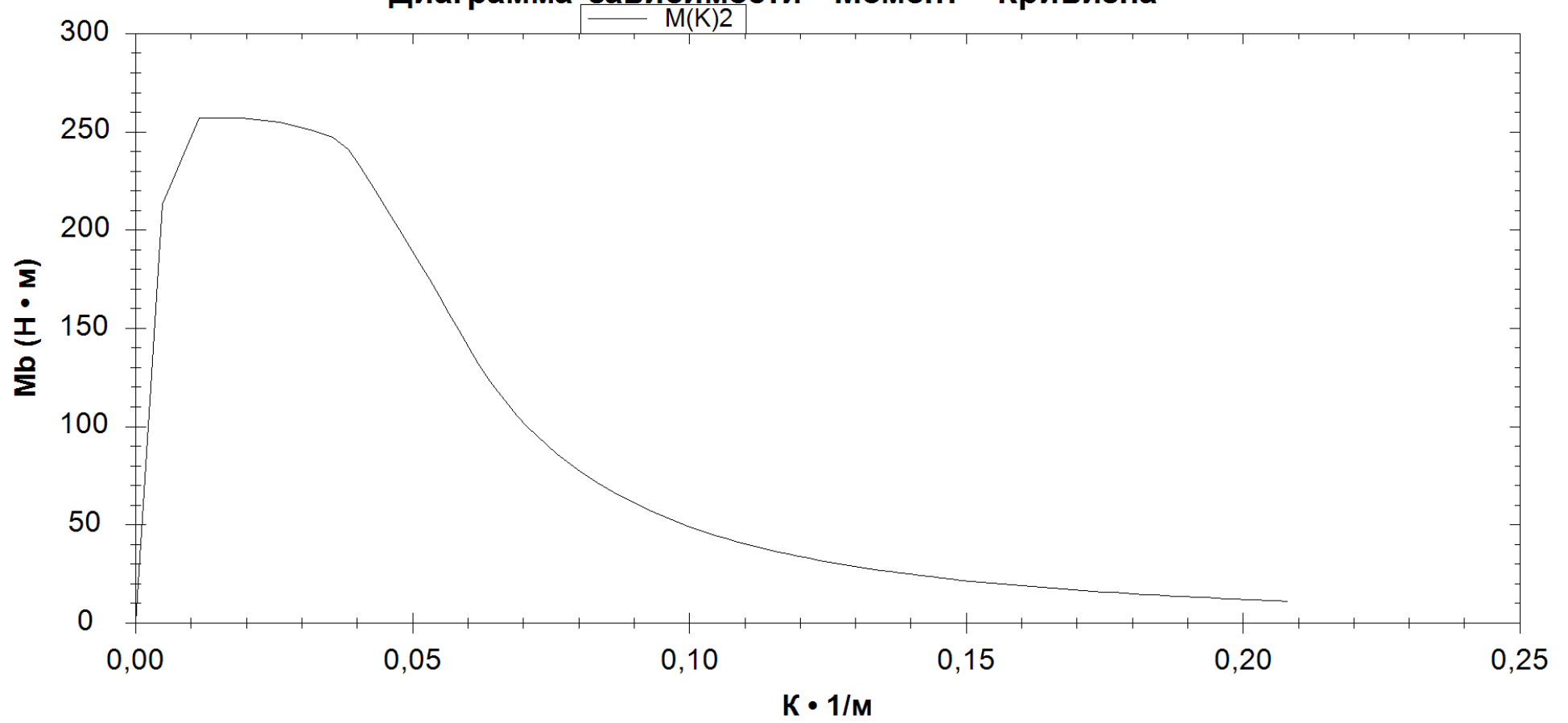


Диаграмма зависимости "Напряжение – деформация"

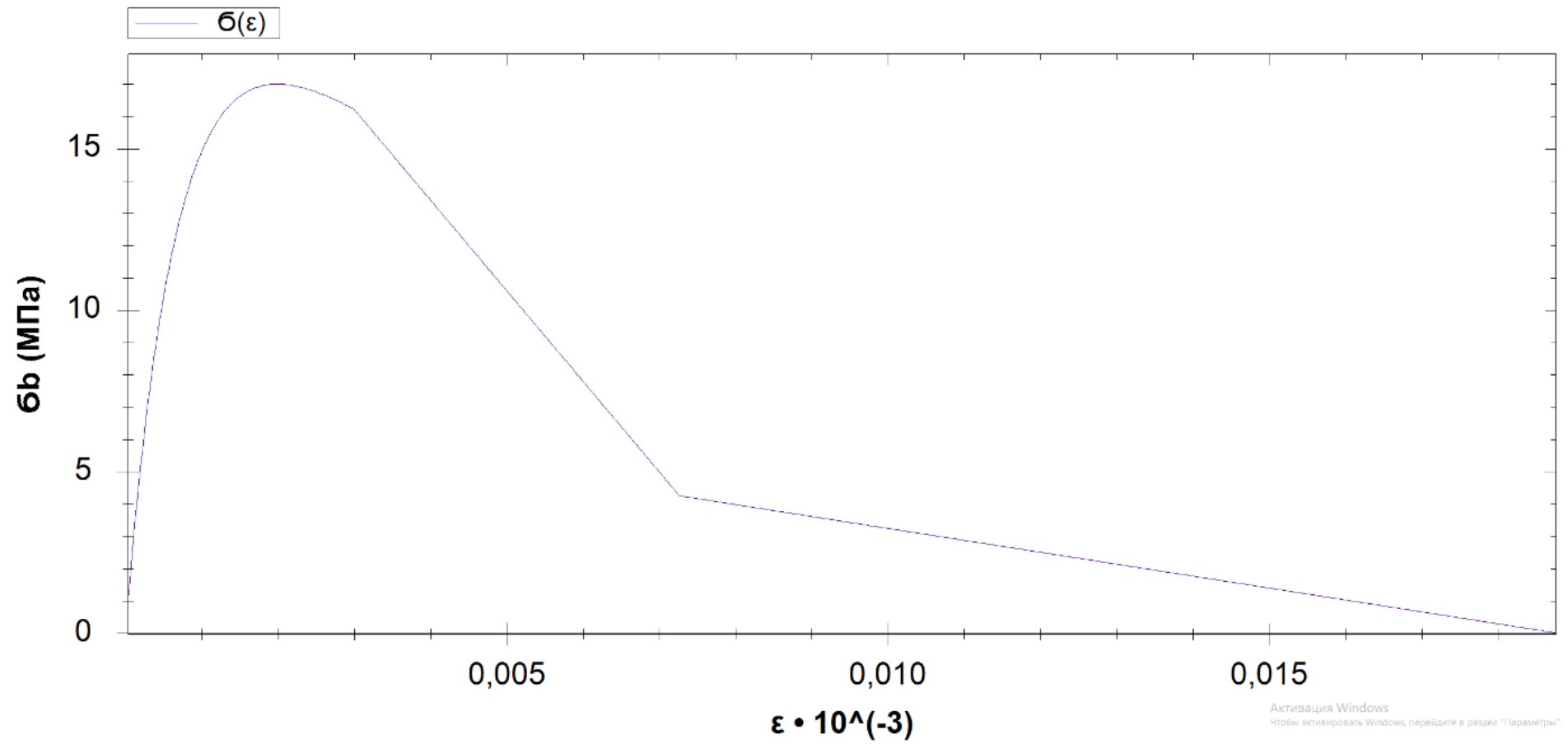




Рисунок 3.12 - График зависимости жесткости бетона фактической V_{ϕ} от момента M

Произведем расчет железобетонной балки в линейной постановке с постоянным модулем упругости в ПК «ЛИРА САПР»

Исследуем балку длиной 12 метров и сечением $0,25 \times 0,6$ м при действии внешней нагрузки равной 137 кН, что соответствует фактической несущей способности сечения балки при заданном армировании.

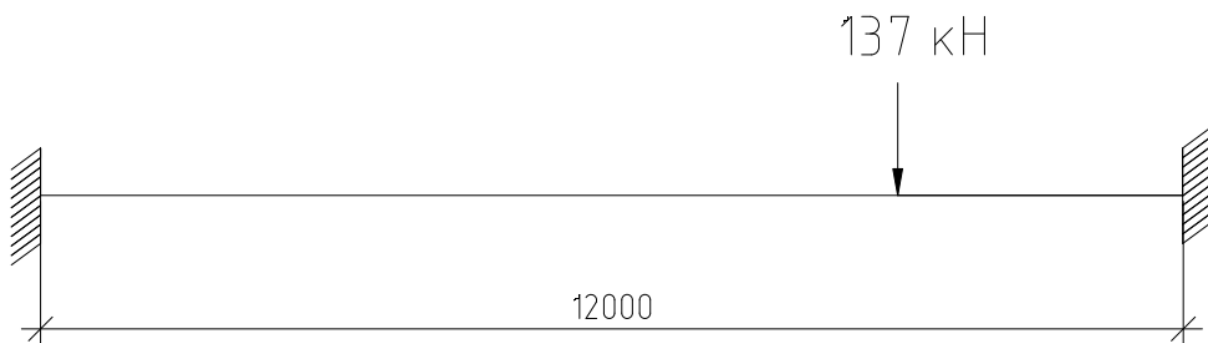


Рисунок 3.14 - Расчетная схема железобетонной балки

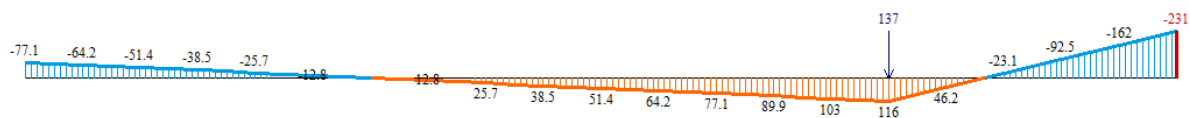


Рисунок 3.15 - Эпюра моментов при постоянном модуле упругости $E = 3 \cdot 10^7$ кН/м².

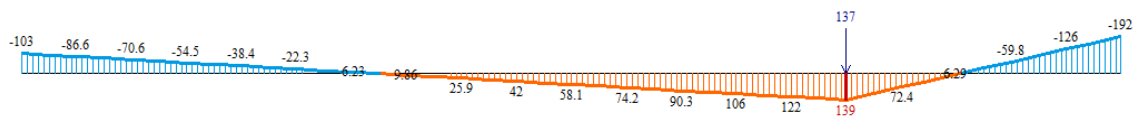


Рисунок 3.36 - Эпюра моментов балки в первой итерации при учете физической нелинейности бетона.

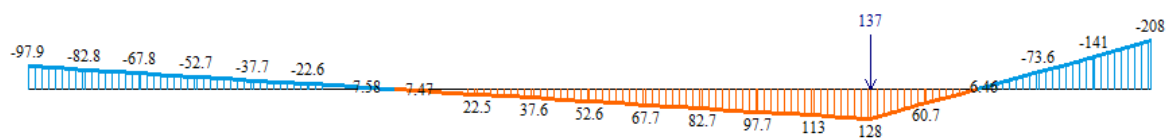


Рисунок 3.57 - Эпюра моментов балки во второй итерации при учете физической нелинейности бетона.

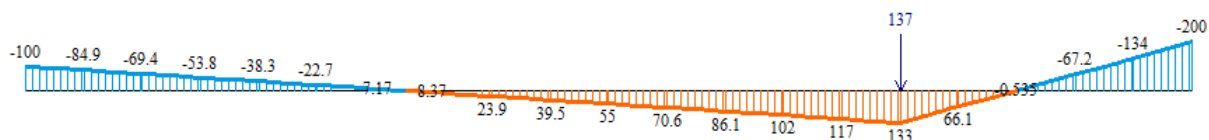


Рисунок 3.78- Эпюра моментов балки в третьей итерации при учете нелинейности бетона.

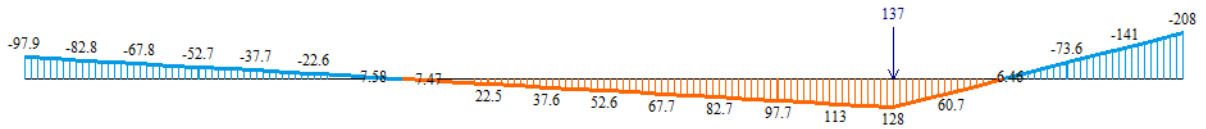


Рисунок 3.99 - Эпюра моментов балки в четвертой итерации при учете нелинейности бетона.

Выводы по 3 главе:

1. Чем больше момент, возникающий в сечении тем меньше жесткость и соответственно модуль деформации бетона.
2. Жёсткость и модуль деформации бетона уменьшается в связи с образованием и раскрытием трещин.
3. До момента образования и раскрытия трещин бетон имеет постоянную жесткость и работает как упругий материал.
4. Жёсткость сечения железобетонных элементов определяется с помощью программы «ГИД», для этого в программе вычисляется моменты и соответствующая ему кривизна, а затем путем деления момента на кривизну получается изгибная жесткость на каждом этапе нагружения, и эта жесткость используется в дальнейшем для расчета статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности.
5. Точность нелинейного расчета зависит от количества итераций.
6. Учет физической нелинейности позволяет получить более точные данные о напряженно деформируемо состоянии железобетонной балки. Так по сравнению с упругим расчетом максимальные моменты в опасных сечениях снизились до 17% процентов

Публикации по теме диссертации.

Публикации в изданиях.

- 1 Кручинин А.В. Дзюба В.А. Современные методы определения усилий в несущих системах зданий. / А.В. Кручинин В.А. Дзюба // Международная научно-практическая конференция «Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и

кадастров в начале III тысячелетия», г. Комсомольск-на-Амуре.

2 Кручинин А.В. Дзюба В.А. Поведение бетона при псевдопластическом деформировании / А.В. Кручинин В.А. Дзюба // Материалы международной научно практической конференции «Региональные аспекты науки развития и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия (2022 г.)».