



Теоретические методы исследования строительных конструкций, зданий и сооружений

Лекция 5.
**Проблемы компьютерного
моделирования**

Основные шаги численного моделирования

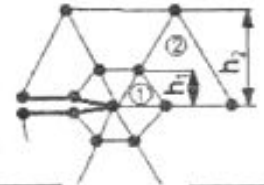
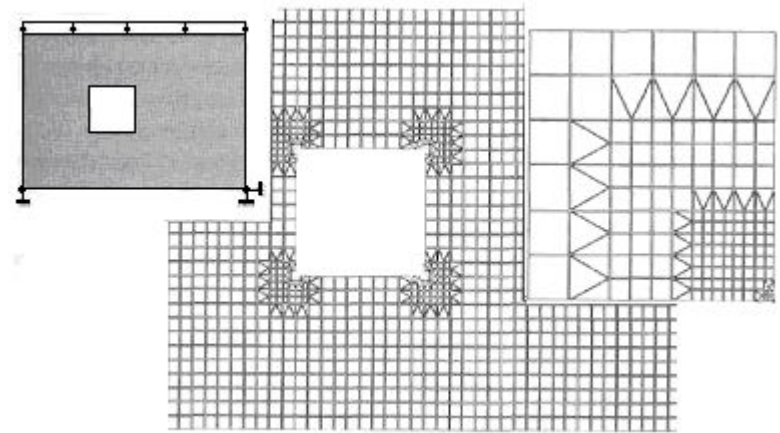


Дискретизация рассматриваемой области

Предвидеть области концентрации напряжений

Замена континуальной среды совокупностью КЭ заданной формы, соединенных между собой в узлах конечным числом связей.

- Этот этап, несмотря на видимую простоту, имеет важное значение, хотя он и не обусловлен строгими теоретическими рекомендациями и во многом определяется интуитивно.



$$\frac{h_2}{h_1} < 2$$

Допустимо

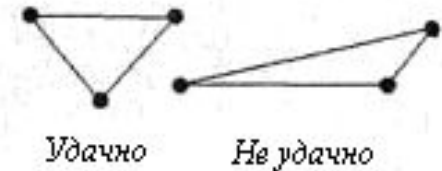
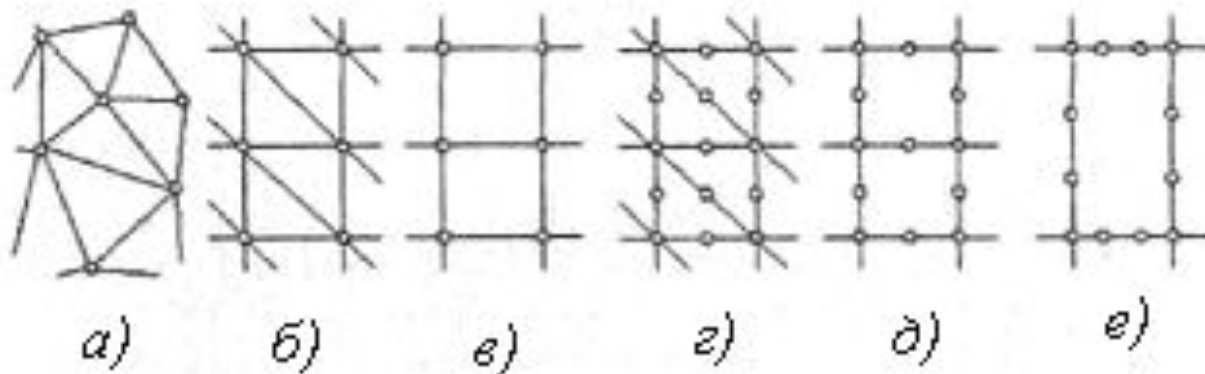
$$\frac{h_2}{h_1} > 2$$

Не допустимо

- Обычно при построении конечно-элементной модели руководствуются предварительными представлениями о характере ожидаемого результата, и в местах высоких градиентов искомых величин сетку конечных элементов сгущают.

Этап дискретизации

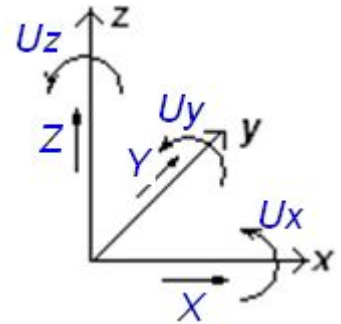
Учитывать влияние вида сетки и формы КЭ и на точность результатов



Признак системы

Сокращенный набор степеней свободы (неизвестных перемещений)

- а) *плоская ферма* или *стена* (балка-стенка), размещенная в плоскости XOZ – учитываются только перемещения вдоль осей X и Z ;
- б) *плоская рама*, расположенная в плоскости XOZ – учитываются перемещения вдоль осей X и Z и угол поворота U_Y ;
- в) *плита* или *балочный ригель* в плоскости XOY – учитываются перемещения вдоль оси Z и углы поворота U_X , U_Y ;
- г) *пространственная ферма* – исключаются все углы поворота, учитываются перемещения X , Y , Z .
- д) *пространственная система* – все 6 степеней свободы



Проблемы стыковки различных типов элементов

Этап дискретизации

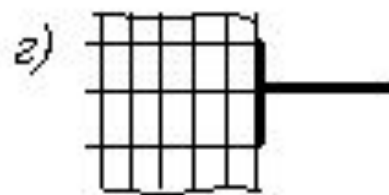
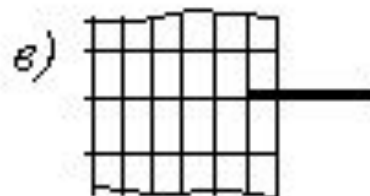
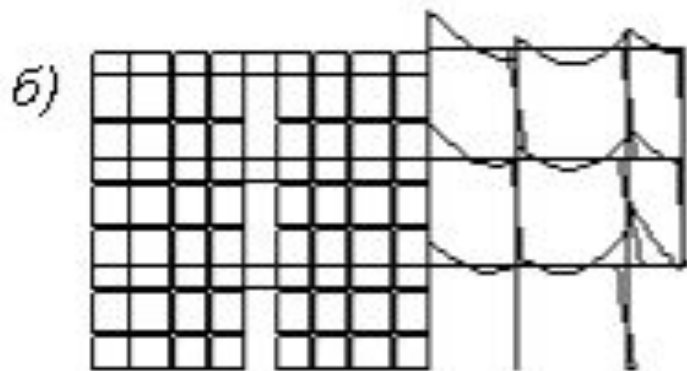
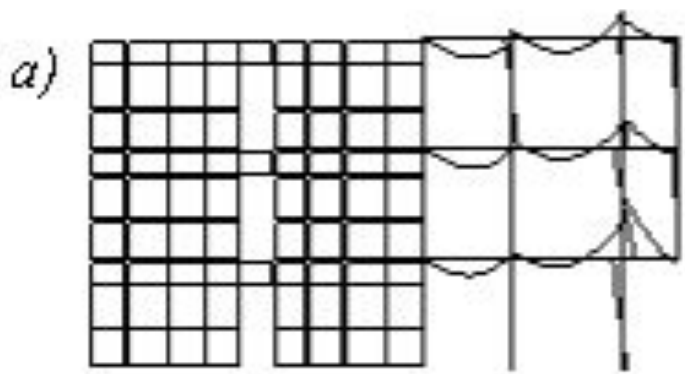
Какие внутренние усилия могут возникнуть в применяемых к.э. и как они согласуются в узлах?

| Элементы | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|
| Стержни | 1 | + | ? | ? | ? | ? |
| Плиты | 2 | | + | ? | ? | ? |
| Пластины | 3 | | | + | ? | ? |
| Оболочки | 4 | | | | + | ? |
| Объемные элементы | 5 | | | | | + |

? - возможно появление проблем

Стыковка различных элементов

Этап дискретизации



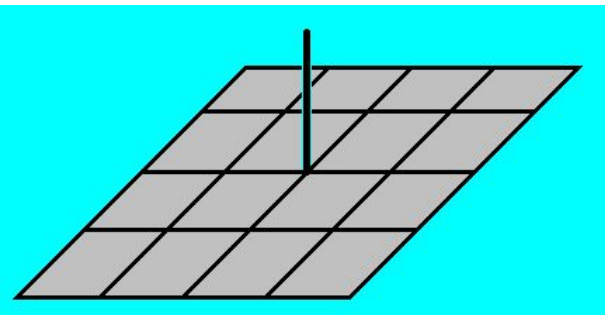
**Стержни
+
пластины**

а) до введения связей; б) после введения связей;
в) фрагмент уточненной схемы при заделке консоли в стену;
г) фрагмент уточненной схемы при монолитном сопряжении

Стыковка различных элементов

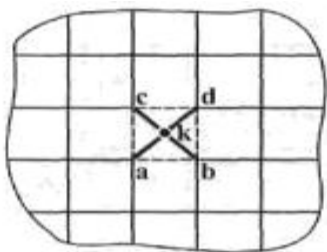
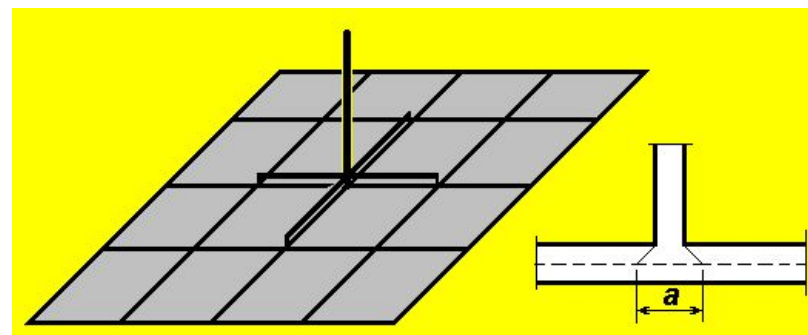
Этап дискретизации

Стержни + плиты



Изгибающие моменты в колонне у стыка с плитой неверны. При сгущении сетки они не стремятся к нулю, поскольку плита не может сопротивляться сосредоточенному моменту. Кроме того, не воспринимается **крутящий момент** в колонне.

Вариант решения — введение “подколонника”, у которого размер a не зависит от размеров сетки конечных элементов.



$abcd$ - контур тела колонны

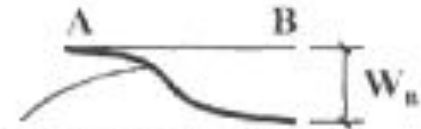
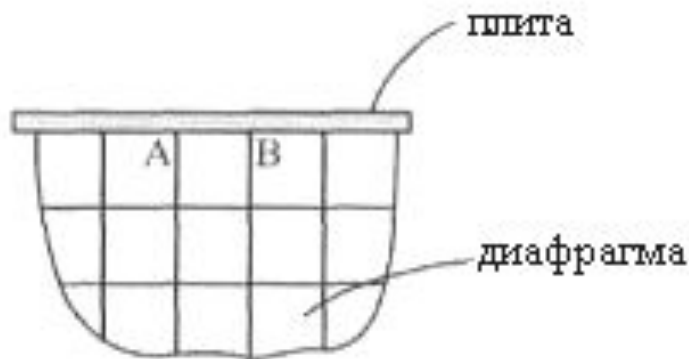
kc, kd, kb, ka - абсолютно жесткие вставки

Опираение плиты на точечную опору

Для учета восприятия колонной **крутящих моментов** можно рекомендовать введение абсолютно жестких вставок или абсолютно жесткого тела $kabcd$, обеспечив кинематическую связь между его узлами.

Стыковка плиты и стены

Этап дискретизации



базисная "балочная" функция КЭ плиты, соответствующая вертикальному перемещению узла В



базисная "линейная" функция КЭ диафрагмы (плоское напряженное состояние), соответствующее вертикальному перемещению узла В

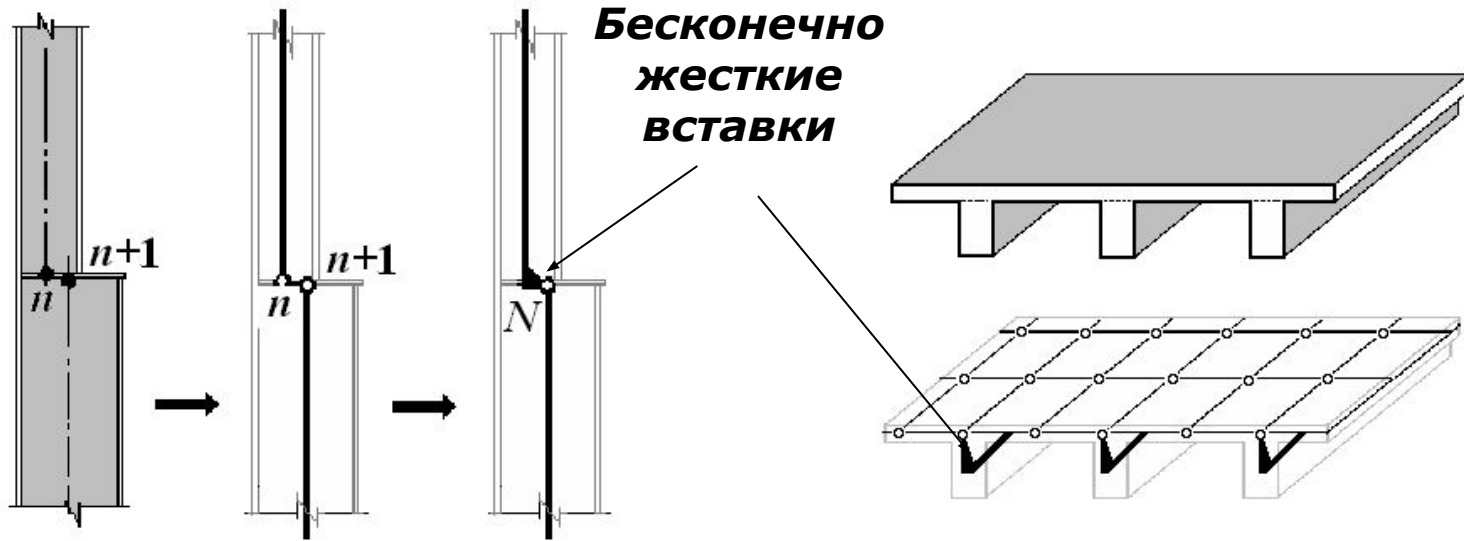
Вдоль верхнего канта диафрагмы имеет место нестыковка базисных функций КЭ плиты с базисными функциями КЭ ПНС, моделирующими работу диафрагмы.

Такие нестыковки не являются препятствием для адекватности расчетной схемы, так как при сгущении сетки параметры НДС плиты и диафрагмы будут приближаться к точному решению (при использовании «правильных» КЭ), а совместность работы плиты и диафрагмы будут обеспечиваться одинаковыми линейными перемещениями в узлах стыковки.

Схематизация геометрической формы

Этап дискретизации

Замена некоторых **пространственных** элементов конструкции **стержневыми** или **пластинчатыми**, в результате чего принятые оси стержней и пластин могут не совпадать с их нейтральными плоскостями.



Бесконечно жесткие вставки

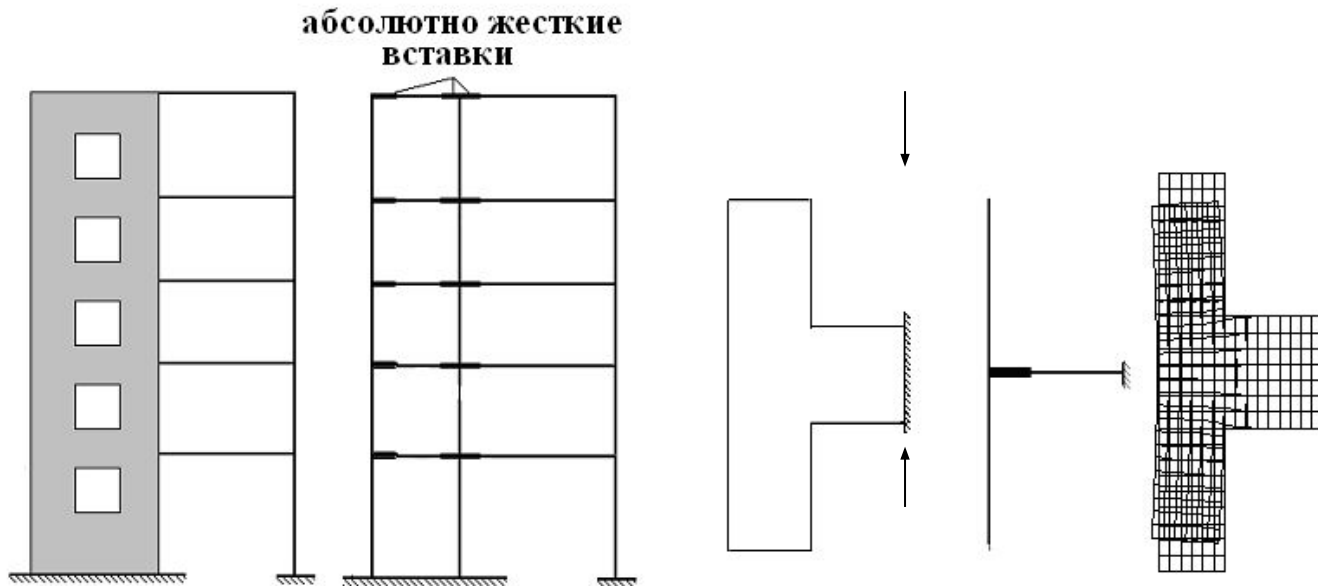
Стыковка стержней с эксцентриситетом

Плита, подкреплённая ребрами, эксцентрично расположенными по отношению к срединной поверхности

Ухудшение обусловленности матрицы жесткости в СЛАУ

Схематизация геометрической формы

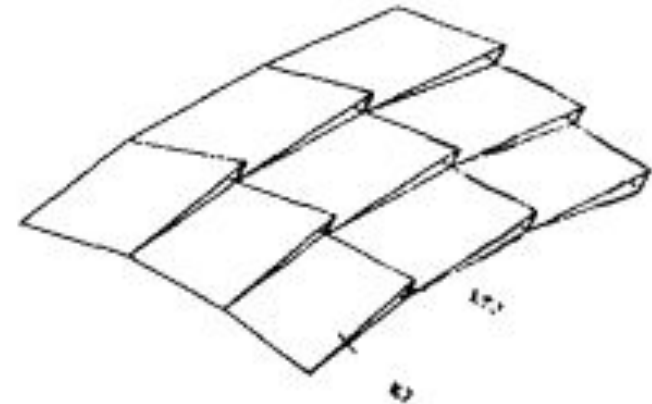
- В стержневой системе высота сечения h не должна превышать $1/8 - 1/10$ расстояния между узлами l , иначе стержневая РС с точечными узлами на пересечении осей элементов становится некорректной → стержневые элементы с *бесконечно жесткими вставками*.
- В такой РС отсутствуют горизонтальные перемещения и вертикальный стержень не изгибается, что в некоторых случаях требуется учитывать.



Моделирование конструкции стержневой системой с жесткими вставками

Схематизация геометрической формы

- ❖ **цилиндрические поверхности - КЭ** оболочки нулевой кривизны **прямоугольной формы**;
- ❖ **оболочки**, поверхность которых имеет кривизну в двух направлениях, - КЭ оболочки нулевой кривизны **треугольной формы**;
- ❖ при отсутствии в библиотеке таковых или по другим соображениям могут быть использованы КЭ прямоугольной формы, при этом три узла каждого КЭ лежат на поверхности, а четвертый, вне ее, - объединяется (см. рис.) с аналогичным узлом на поверхности условием равенства перемещений (происходит незначительное искажение ее формы, однако сохраняется непрерывность функций перемещений по всем сечения оболочки);



Аппроксимирующая модель оболочки положительной гауссовой кривизны
КЭ - конечный элемент оболочки нулевой кривизны; КТЭ - контактный элемент, или условие равенства перемещений

Расчётные схемы и модели многэтажных зданий

- Многоэтажное здание является сложной пространственной системой, которая в зависимости от этажности, особенностей конструктивной системы и действующих нагрузок, рассчитывается с разной степенью детализации с использованием различных расчётных схем (рис.1).
- При одномерной расчётной схеме здание рассматривается как консольный тонкостенный стержень или система стержней, упруго или жёстко закреплённых в основании (б). Предполагается, что поперечный контур стержня или системы стержней неизменяем.
- При двумерной расчётной схеме здание рассматривается как плоская конструкция, способная воспринимать только такую внешнюю нагрузку, которая действует в её плоскости (с) и (d). Для определения усилий в вертикальных несущих конструкциях условно принимается, что все они расположены в одной плоскости и имеют одинаковые горизонтальные перемещения в уровне перекрытий.
- При трёхмерной расчётной схеме здание рассматривается как пространственная система, способная воспринимать приложенную к ней пространственную систему нагрузок.

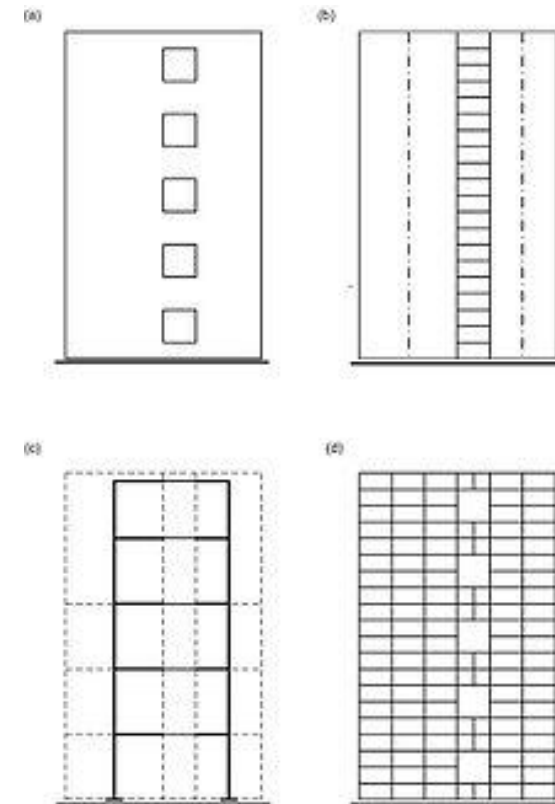
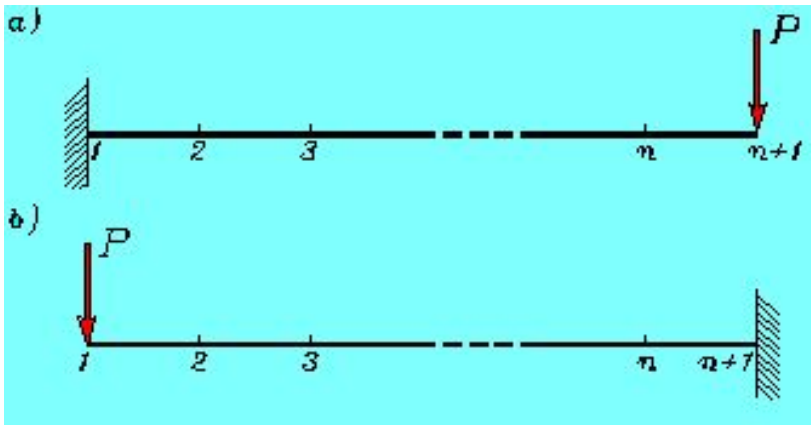


Рис.1. Двумерные расчётные схемы стены с регулярно расположенными по вертикали проёмами (а); составной стержень (б); многоэтажная рама (с); пластинчатая система МКЭ (d)

Проблемы компьютерного моделирования на этапе численной реализации

Накопление погрешностей (в результате плохой обусловленности СЛАУ)



Для минимизации погрешности целесообразно нумеровать неизвестные, начиная от наиболее податливой части схемы, постепенно перемещаясь к местам ее закреплений.

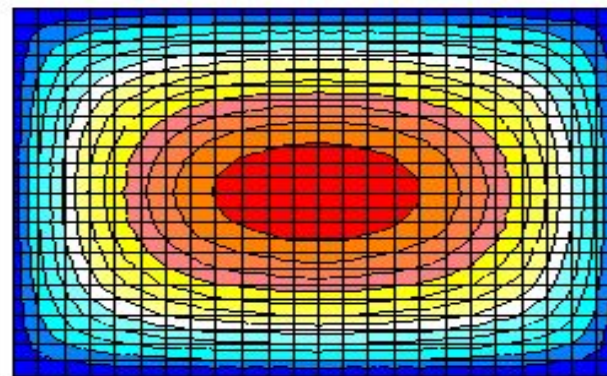
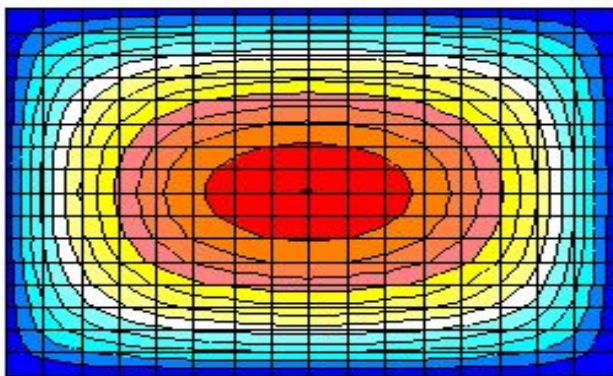
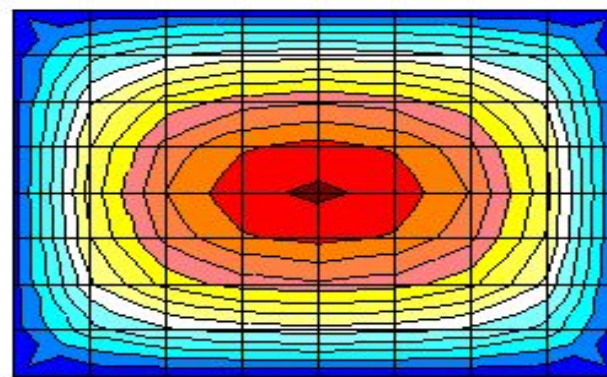
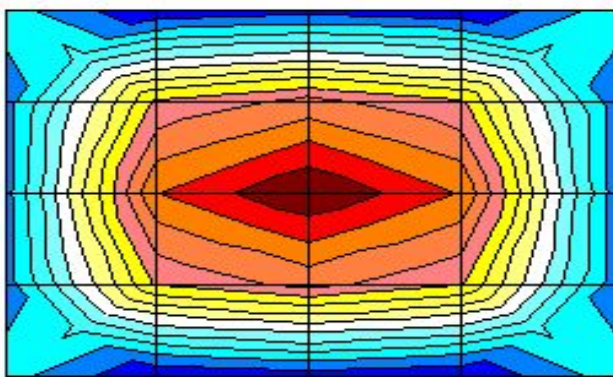
Если положить длину участка разбиения балки равной единице, то полная длина балки L будет равна $L = n$. Если $P = 3$ и $EJ = 1,0 \times 10^9$, то прогиб на конце консоли w^*

$$w^* = PL^3 / (3EJ) = (n/1000)^3.$$

| Результат | n | 5 000 | 10 000 | 15 000 | 20 000 |
|-----------|----------------|-------|--------|--------|--------|
| Точный | w^* | 125 | 1000 | 3375 | 8000 |
| SCAD | Схема <i>a</i> | 125 | 997 | 591 | 605 |
| | Схема <i>b</i> | 125 | 1000 | 3375 | 8000 |

Проблемы компьютерного моделирования на этапе анализа полученного решения

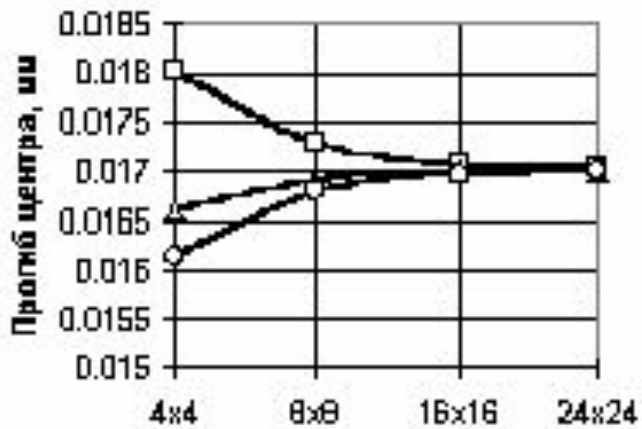
Проверка практической сходимости решения



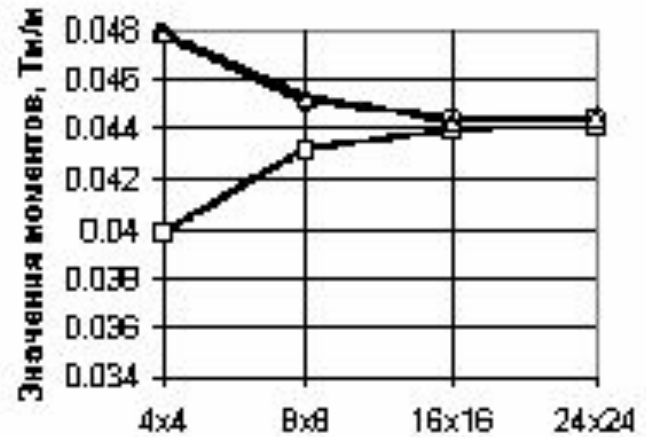
Изополя изгибающих моментов для расчетных схем с различными сетками КЭ



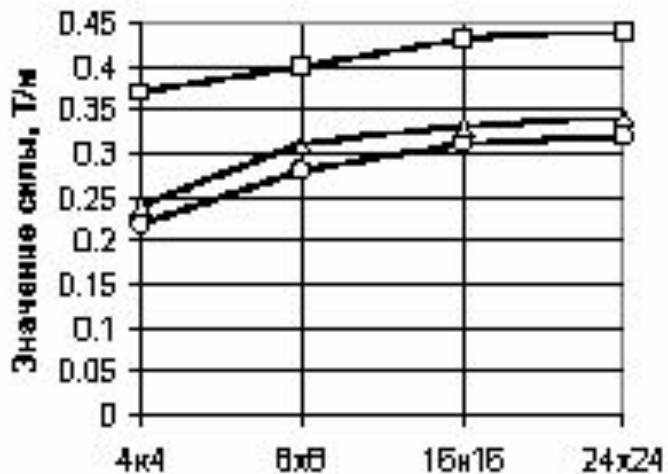
а)



б)



в)



Обозначения:

○ — Q-1141

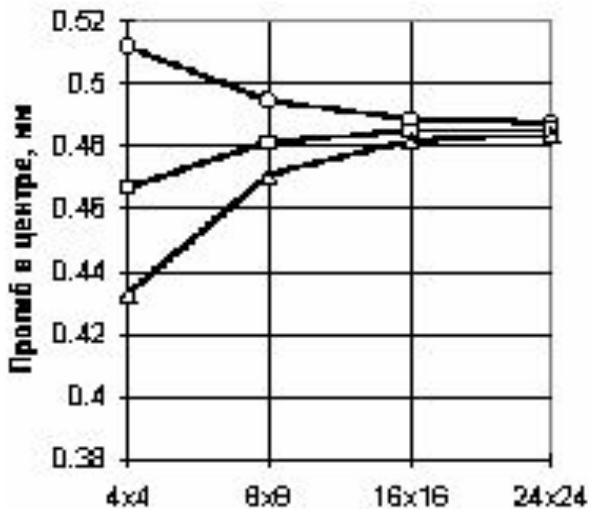
□ — Q-2050

△ — Q-1242

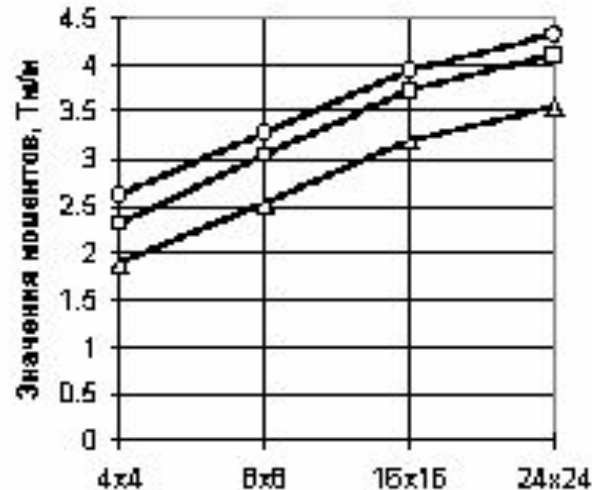
Сходимость результатов при равномерной нагрузке: а - по прогибам, б - по моментам, в - по поперечным силам



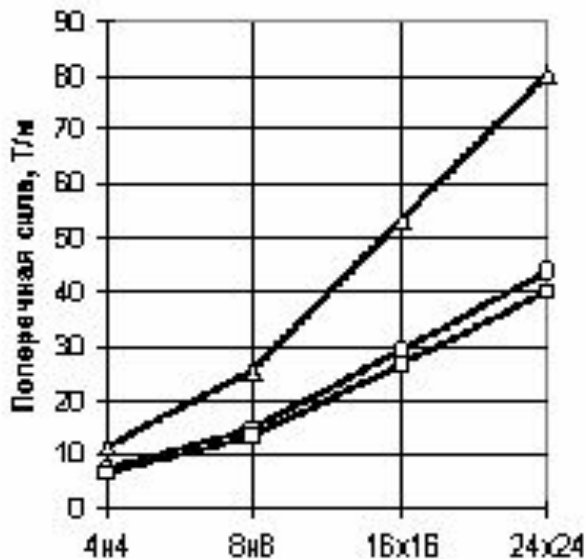
а)



б)



в)



Обозначения:

○ — Q-11,41

□ — Q-20,50

△ — Q-12,412

Сходимость результатов при
нагрузении **сосредоточенной силой**: а - по
прогибам, б - по моментам, в - по поперечным
силам

Оценка точности полученного решения

Этап анализа полученного решения

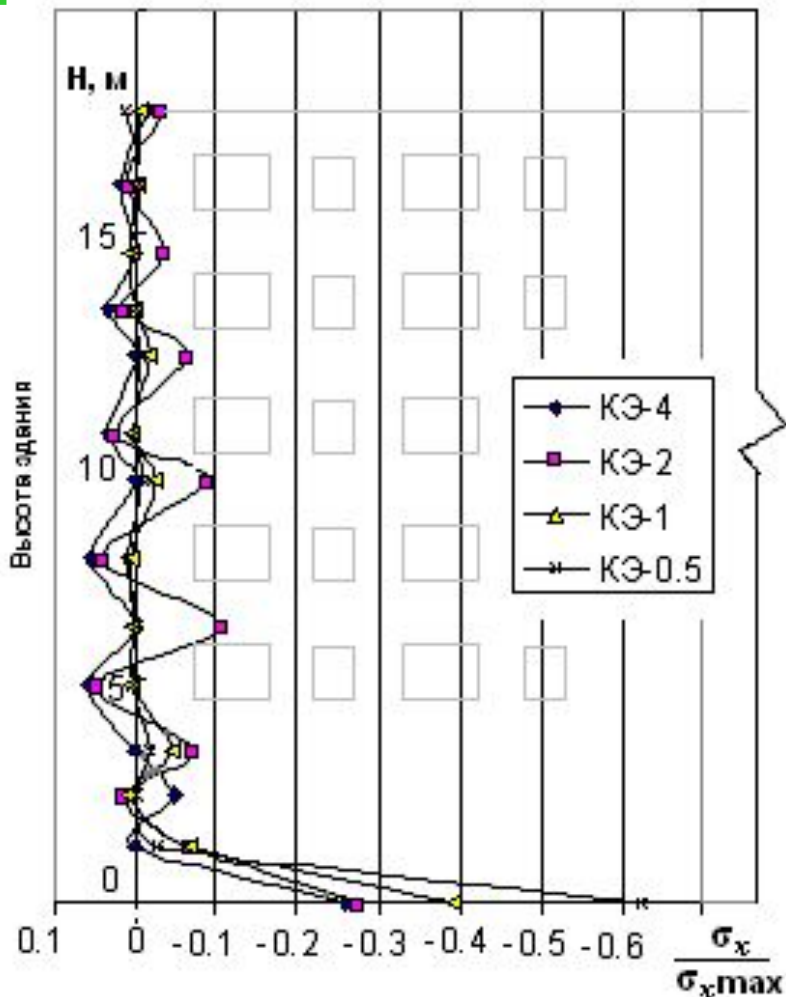


График зависимости относительных нормальных напряжений на свободном от нагрузок торце стены по высоте здания для разных размеров сетки КЭ