

ИСА | 08.03.01 | ПГС | 6-й семестр

Железобетонные и каменные конструкции

Практическое занятие №14



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

www: mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/ZhBK/

e-mail: gbk@mgsu.ru; PekinDA@mgsu.ru

тел.: +7 495 287 49 14 доб. 3036, 3084

Пекин Дмитрий Анатольевич, доцент, к.т.н.

Практическое занятие №14 – краткий обзор:

Плитная сталежелезобетонная конструкция:

- Название изобретения
- Цель изобретения
- Традиционные решения плитных конструкций
- Суть изобретения
- Особенности конструктивного решения
- Расчетное обоснование
- Область применения
- Примеры реализации

Название изобретения:

- Нагромождение из слов «сталежелезо...» в названии данного конструктивного решения используется для подчеркивания **принципиального** отличия от традиционных плитных железобетонных конструкций и принято по аналогии с другими более известными **сталежелезобетонными** конструкциями
- Коллеги, принимавшие участие в его дальнейшей реализации, предлагали другие названия «воротники», «решетки», «пауки»
- В п. 7.3.8 норм СП 31-114-2004 похожее конструктивное решение называется «металлические обоймы»
- В кандидатской диссертации автора использовано – «скрытые металлические капители», поскольку в начале работы не были доказаны и зафиксированы те самые принципиальные отличия

Цель изобретения:

- Главный недостаток железобетонных конструкций – это образование и раскрытие **трещин**. На опорах трещины могут провоцировать механизм хрупкого разрушения конструкции, который применительно к плитам называется **продавливанием**
- Попытки решить данную проблему с помощью поперечной или жесткой арматуры, капителей, подколонников или их сочетания часто вызывают негативные побочные последствия, снижающие технико-экономические показатели объектов строительства
- Конструктивное решение, позволяющее исключить механизм продавливания без увеличения толщины плитных конструкций, повысить **трещиностойкость** и **надежность** опорных зон

Продавливание происходит:

- При **замене** или **отказе** от устройства капителей, подколонников или жесткой арматуры
- В случае совершения **ошибок** в процессе проектирования и/или строительства, как в случае аварии на фото справа (покрытие стилобатной части здания в Москве вблизи Павелецкого вокзала)
- Когда на этапе эксплуатации не соблюдаются заданные в проекте параметры нагрузок и воздействий



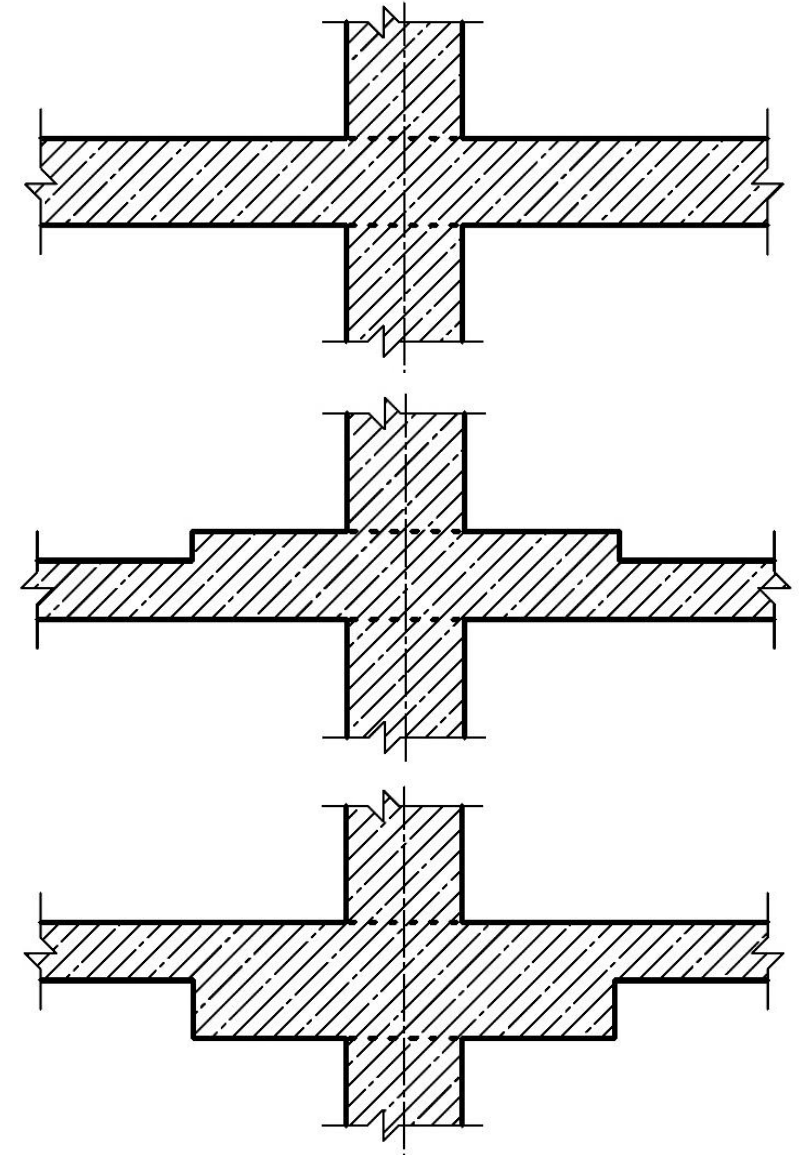
Результаты продавливания:

- Разрушение покрытия в данном случае привело к разрушению нижележащего перекрытия (верхнее фото справа)
- Аварии с тяжелыми, а иногда и с катастрофическими последствиями
- Угроза безопасности людей обусловлена **мгновенным** обрушением и весом падающих конструкций
- Всегда многократное увеличение затрат относительно стоимости разрушенных элементов и срыв сроков строительства



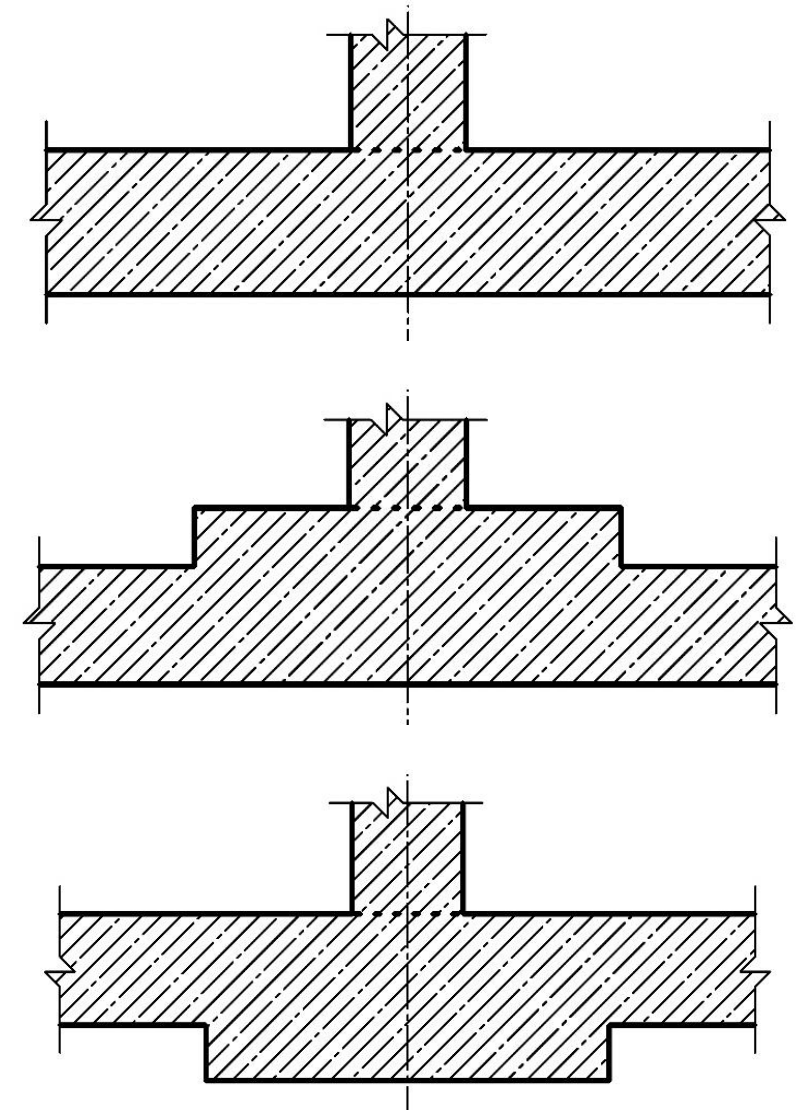
Традиционные решения для перекрытий:

- Применение плоских перекрытий на практике ограничено пролетами $\sim 8 \times 8$ м, поскольку несущая способность поперечной арматуры не должна превышать несущую способность бетона
- Капители, развитые вверх, ограничены толщиной конструкции пола, поэтому не могут принципиально изменить ситуацию
- Капители, развитые вниз, съедают **внутреннее пространство** или увеличивают высоты этажей и зданий, усложняют прокладку коммуникаций



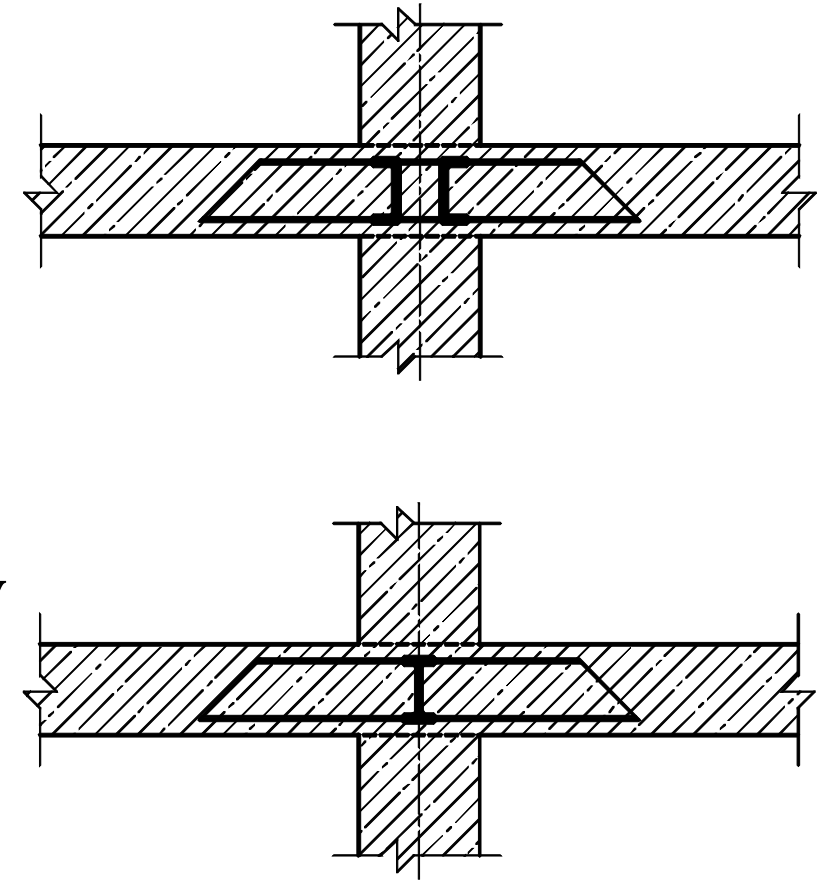
Традиционные решения для фундаментов:

- Толщина фундаментных плит и плит перекрытий обычно назначается из расчета **предотвращения** продавливания
- Рекомендации НИИОСП предлагают не учитывать **поперечную арматуру** при расчете на продавливание в связи с необходимостью повышения надежности
- Уширения в фундаментных плитах заметно **усложняют** СМР и в случае подколонников увеличивают высоту этажа и толщину конструкции пола



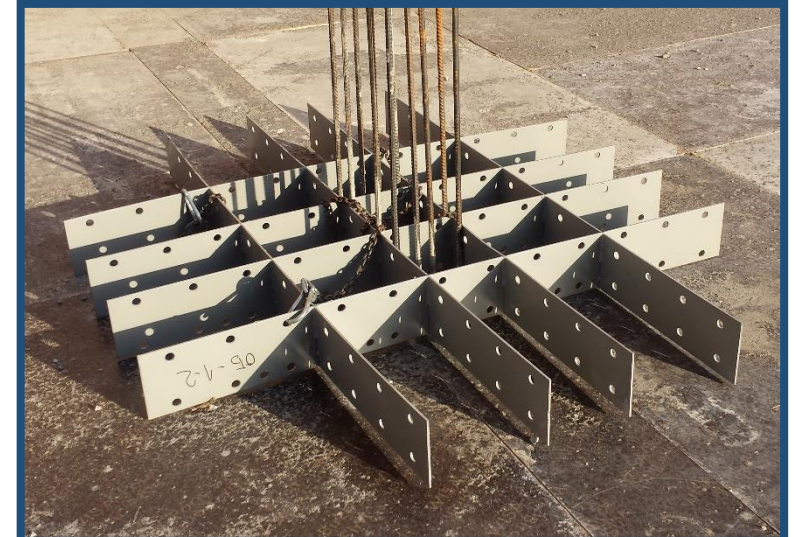
Решения с жесткой и листовой арматурой:

- Для решения проблемы продавливания может применяться жесткая арматура в виде **крестообразных элементов** из двутавров или спаренных швеллеров
- Или листовая арматура в виде отдельных не связанных между собой **Г-образных элементов**, соединяемых с продольной арматурой колонн
- Стальные элементы располагаются между **нижней** и **верхней** сетками арматуры, не позволяют снизить ее расход и не оказывают влияния на трещиностойкость и изгибную жесткость опорных зон



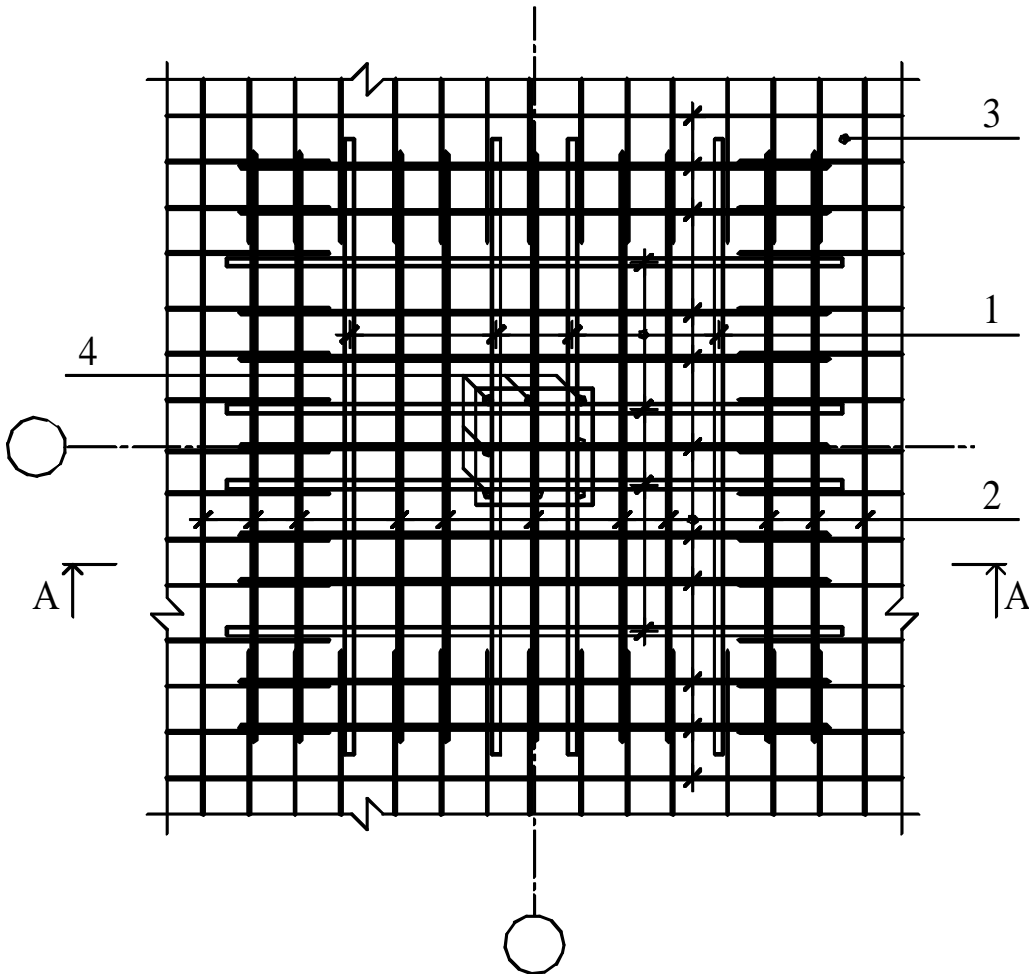
Суть изобретения:

- В опорных зонах плитных железобетонных конструкций предусматривается установка **решеток** из перекрестных стальных листов с отверстиями под продольную арматуру
- Стальные листы выполняются высотой, равной толщине плитной конструкции и **рассекают** тело бетона
- В листах для соединения между собой выполняются **прорези** на половину высоты элемента и **отверстия** для установки продольной арматуры



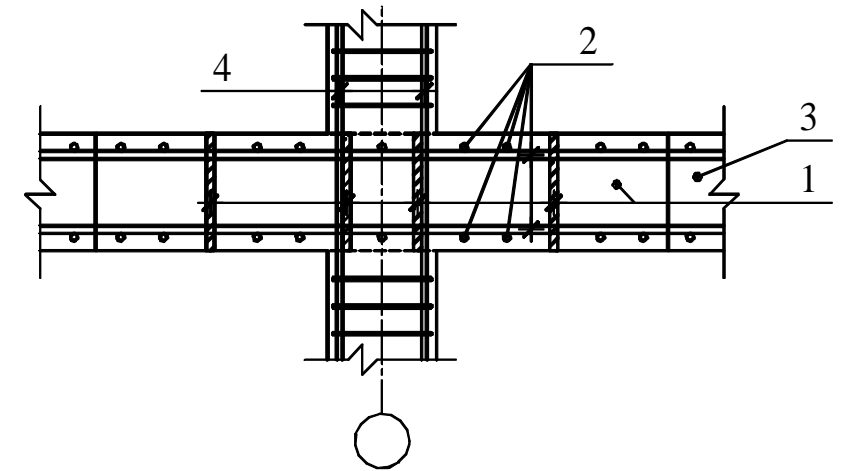
Конструктивное решение:

Фрагмент опорной зоны
перекрытия. Вид в плане

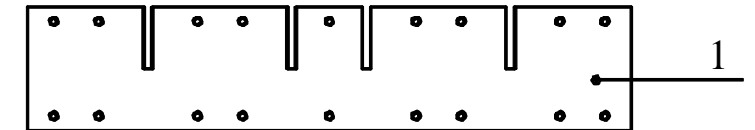


- 1 - стальные листы
- 2 - арматура
- 3 - бетон
- 4 - арматура колонны

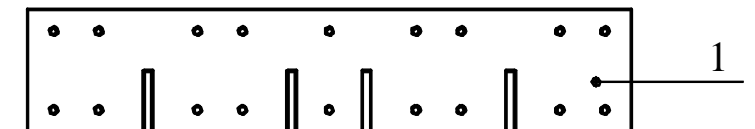
Сечение А-А



Стальные листы, устанавливаемые в
одном направлении

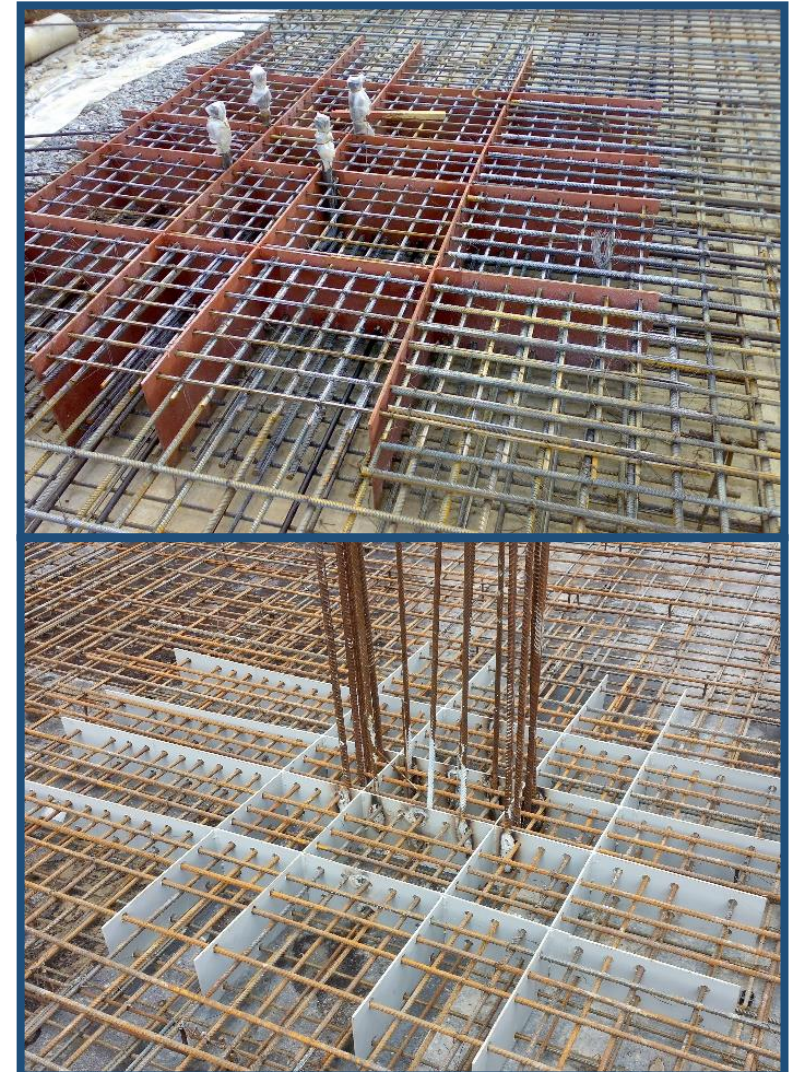


Стальные листы, устанавливаемые
в другом направлении



Изготовление стальных элементов:

- Прорези и отверстия в стальных листах обычно выполняются на линиях автоматизированной плазменной резки
- Стальные листы в местах пересечений соединяются между собой при помощи полуавтоматической **сварки**
- Соединение листов и арматуры между собой **не требуется**
- Изготовление стальных решеток может выполняться как на заводе, так и в условиях строительной площадки



Организация и технология строительства:

- Изготовление стальных решеток и установка продольной арматуры в проектное положение на заводе позволяет заметно повысить **технологичность СМР**
- Но не вызывает особых затруднений и при организации сборочной линии и СМР на строительной площадке
- При бетонировании рабочие швы устраиваются вдоль стальных листов, расположенных по наружному контуру, т. о. **надежность** рабочих швов за счет наличия листов в сечении заметно повышается



Особенности конструктивного решения:

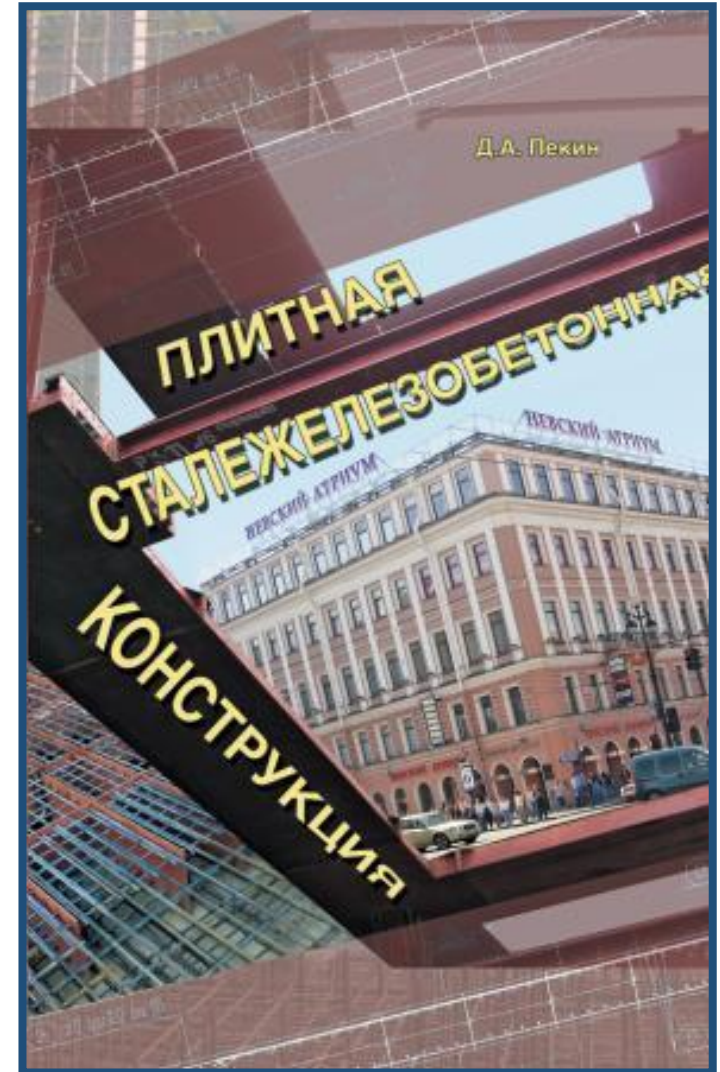
- Совместная работа всех компонентов конструкции: бетон – «**ткани**», арматура – «**мышцы**» и стальная решетка – «**скелет**», достигается за счет сил **трения** без дополнительных мероприятий и обеспечивается вплоть до разрушения
- Существенное увеличение **изгибной жесткости** опорных зон по сравнению с традиционными решениями или другими скрытыми стальными элементами после раскрытия трещин
- Продольная арматура в опорных зонах не может потерять **проектного положения**, что очень важно для неразрезных многопролетных конструкций
- Заранее известное положение основных **нормальных трещин**

Преимущества конструктивного решения:

- Существенное уменьшение **толщины** плиты в опорных зонах и невозможность возникновения продавливания
- Вклад стальных **листов** совместно с бетоном в несущую способность на **изгиб** сопоставим с вкладом продольной **арматуры**, что позволяет существенно снизить ее расход
- Увеличение **трещиностойкости** за счет разделения трещины на две части – с каждой стороны от листа и возможность снижения общего количества продольной арматуры
- Заметное снижение влияния прочности **бетона** на несущую способность опорных зон плитных конструкций

Теоретические исследования и обоснование:

- В монографии «**Плитная сталежелезобетонная конструкция**» приведены первоочередные результаты теоретических исследований и обоснование возможности применения предложенного конструктивного решения для широкого класса строительных задач
- Разработана новая **методика расчета**, позволяющая определять и учитывать фактические значения изгибающих моментов с учетом сложного напряженного состояния опорных зон



Теория изгиба пластин Кирхгофа-Лява

Основное уравнение теории изгиба пластин:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{12(1 - \nu^2)}{E \cdot h^3} \cdot p(x, y)$$

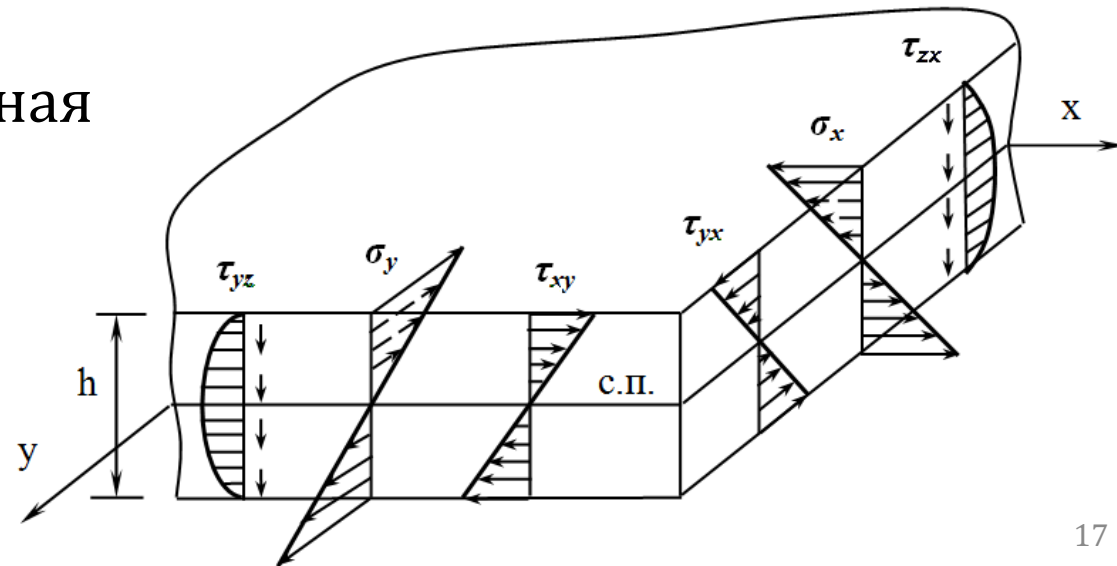
где w – прогиб срединной поверхности (вертикальное расстояние между точкой, взятой на срединной плоскости до деформации, и положением той же точки на упругой поверхности), одинаковый для всех точек линейного элемента

$p(x, y)$ – поперечная нагрузка, распределенная любым образом по поверхности пластинки

h – толщина пластинки

E – модуль упругости

ν – коэффициент Пуассона

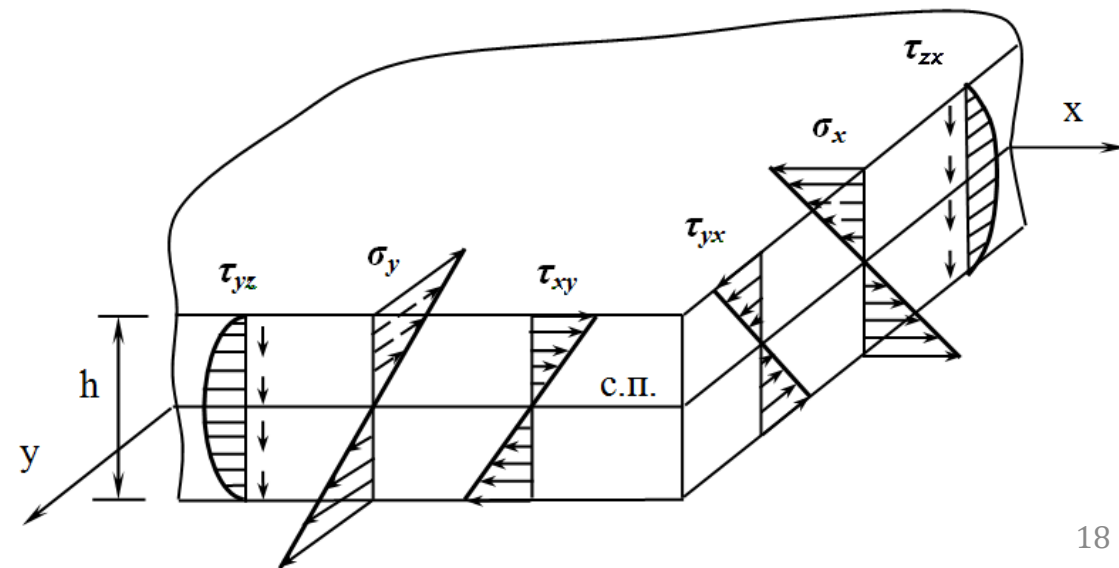


Принятые допущения:

- **Кинематическая гипотеза:** совокупность точек, образующих линейный элемент и лежащих до деформации пластинки на какой-либо прямой, перпендикулярной срединной плоскости, остается на прямой нормальной к упругой поверхности деформированной пластинки. Это допущение аналогично гипотезе плоских сечений в технической теории изгиба балок

$$u = -z \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$v = -z \cdot \frac{\partial w}{\partial y}$$

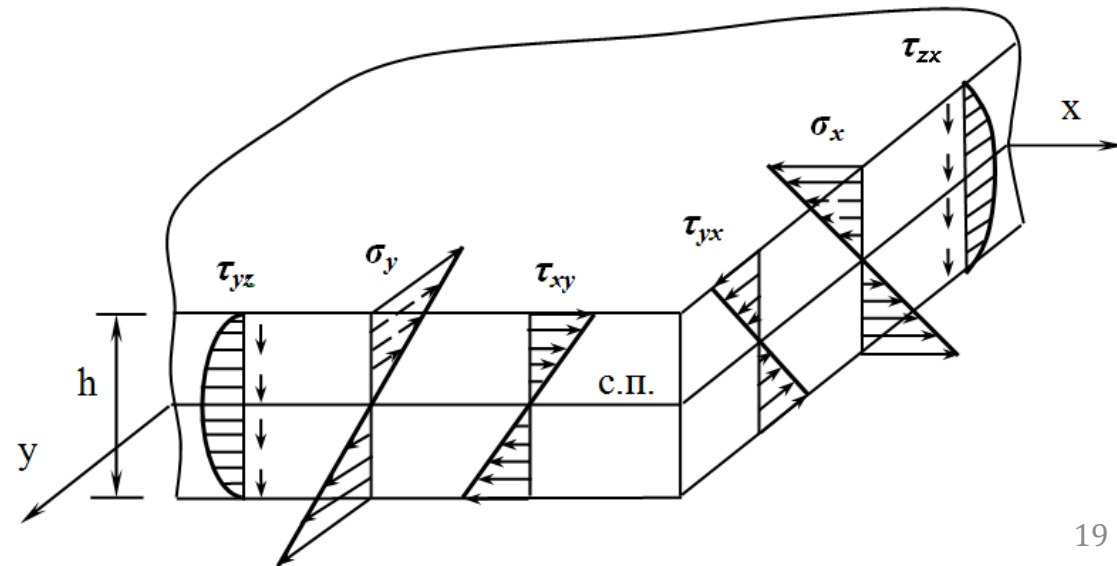


Принятые допущения:

- **Статическая гипотеза:** пренебрегаем нормальными напряжениями ($\sigma_z = 0$), возникающими вследствие взаимного нажатия горизонтальных слоёв пластинки друг на друга, на площадках параллельных срединной плоскости. Следовательно, каждый бесконечно тонкий слой пластинки, взятый параллельно срединной плоскости, можно рассматривать в условиях плоского напряженного состояния:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_z) = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x)$$



Основные гипотезы теории упругости:

- Гипотеза о непрерывной сплошной среде
- Гипотеза о линейной зависимости между напряжениями, деформациями, перемещениями и их производными
- Гипотеза об однородности сплошной среды (упругие свойства материала одинаковы во всех его точках)
- Гипотеза об изотропности твердого тела (упругие свойства одинаковы во всех направлениях),

позволили теоретически сформулировать и практически использовать целый ряд важнейших физических и механических характеристик материала

Статические уравнения Навье:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho \cdot X = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho \cdot Y = 0$$

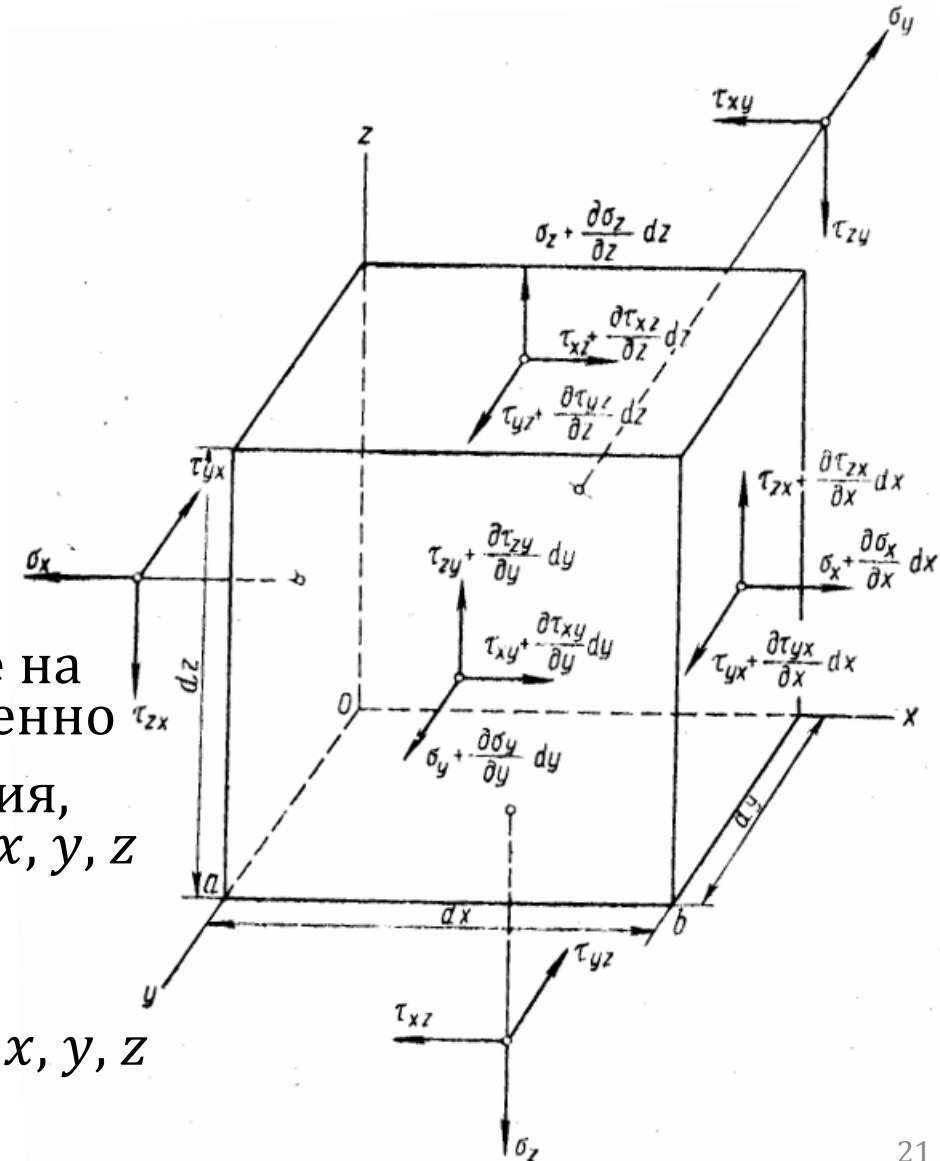
$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho \cdot Z = 0$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные напряжения, действующие на площадках перпендикулярных осям x, y, z соответственно

$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$ – касательные напряжения, действующие на площадках перпендикулярных осям x, y, z соответственно

ρ – плотность вещества

X, Y, Z – проекции объемных сил (сил тяжести) на оси x, y, z соответственно, отнесенные к единице массы



Геометрические уравнения Коши:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

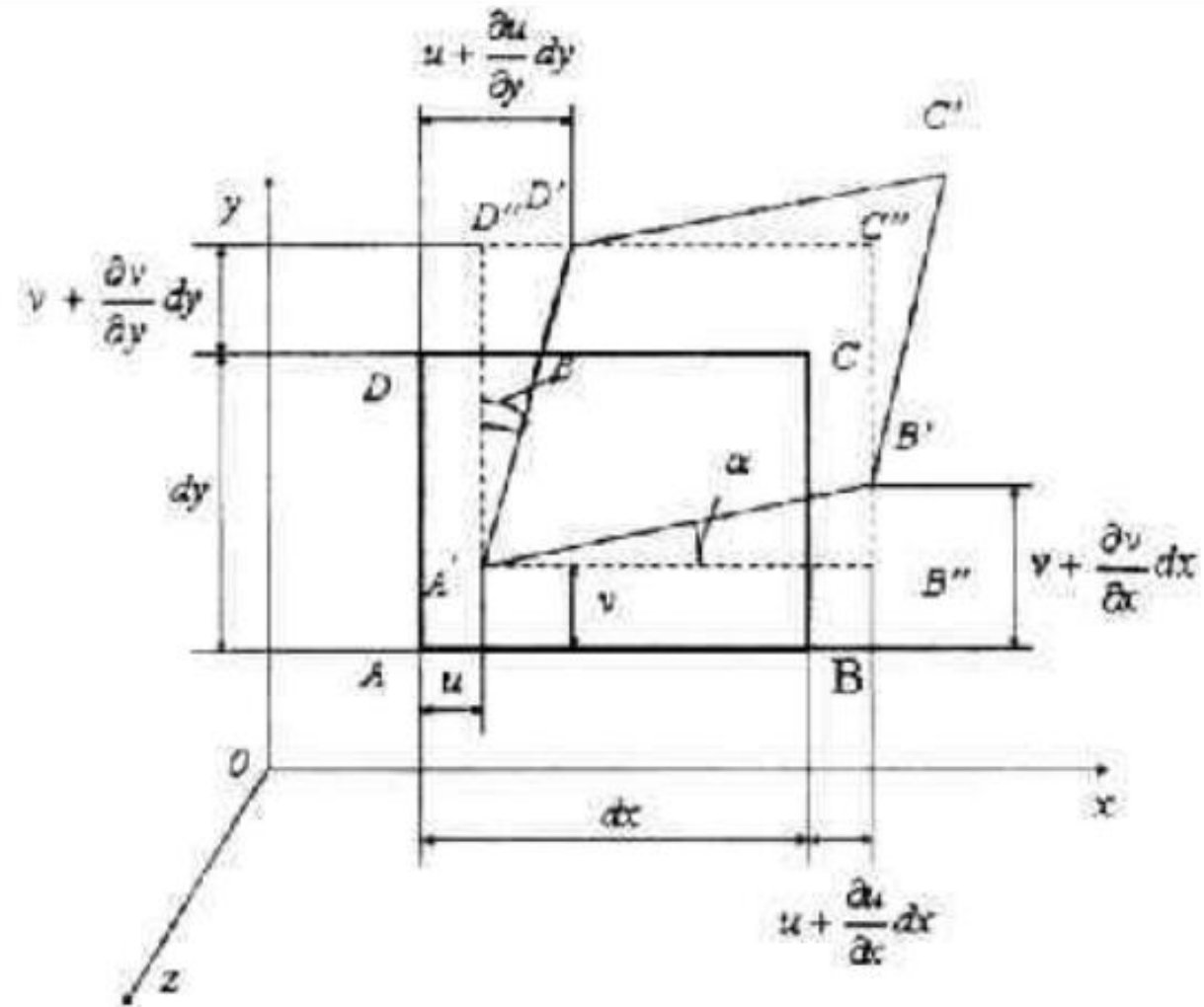
$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – относительные деформации удлинения в направлении осей x, y, z соответственно

$\gamma_{xy} = \gamma_{yx}, \gamma_{yz} = \gamma_{zy}, \gamma_{zx} = \gamma_{xz}$ – углы сдвига относительно осей x, y, z соответственно

u, v, w – перемещения в направлении осей x, y, z соответственно



Физические уравнения Гука:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_y + \sigma_z) \text{ или } \sigma_x = 2 \cdot G \left[\varepsilon_x + \frac{3 \cdot \nu}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \varepsilon_{\text{ср}} \right]; \quad \tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_z) \text{ или } \sigma_y = 2 \cdot G \left[\varepsilon_y + \frac{3 \cdot \nu}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \varepsilon_{\text{ср}} \right]; \quad \tau_{yz} = G \cdot \gamma_{yz}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \text{ или } \sigma_z = 2 \cdot G \left[\varepsilon_z + \frac{3 \cdot \nu}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \varepsilon_{\text{ср}} \right]; \quad \tau_{zx} = G \cdot \gamma_{zx}$$

где $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ – модуль сдвига

E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона

$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{3} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$ – средняя деформация

Условия на контуре:

$$p_{xv} = \sigma_x \cdot \cos(xv) + \tau_{xy} \cdot \cos(yv) + \tau_{xz} \cdot \cos(zv)$$

$$p_{yv} = \tau_{yx} \cdot \cos(xv) + \sigma_y \cdot \cos(yv) + \tau_{yz} \cdot \cos(zv)$$

$$p_{zv} = \tau_{zx} \cdot \cos(xv) + \tau_{zy} \cdot \cos(yv) + \sigma_z \cdot \cos(zv)$$

где p_{xv}, p_{yv}, p_{zv} – поверхностные компоненты нагрузки

$\cos(xv), \cos(yv), \cos(zv)$ – направляющие косинусы углов xv, yv, zv

В вышеперечисленных 15 уравнениях следующие неизвестные:

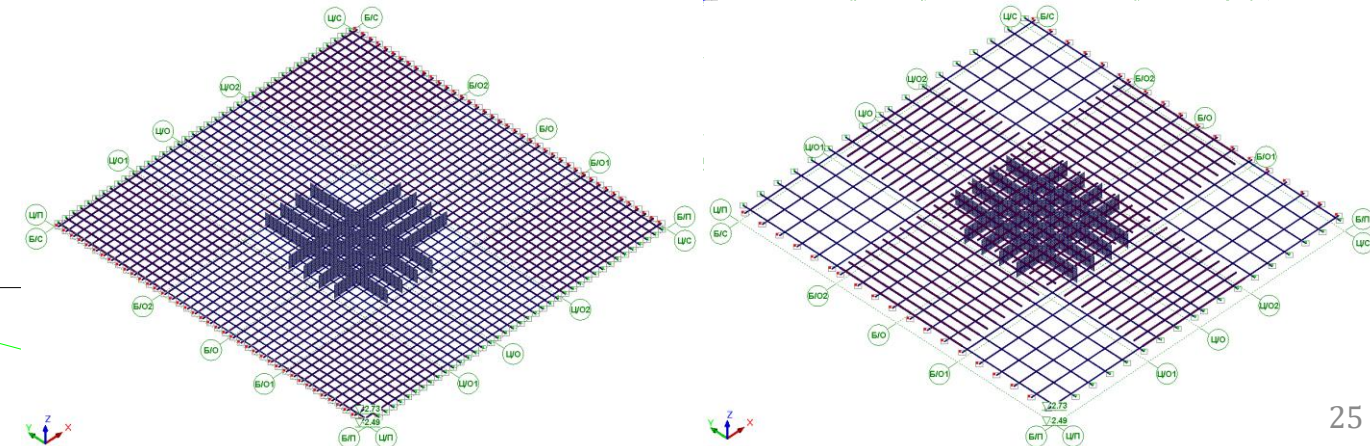
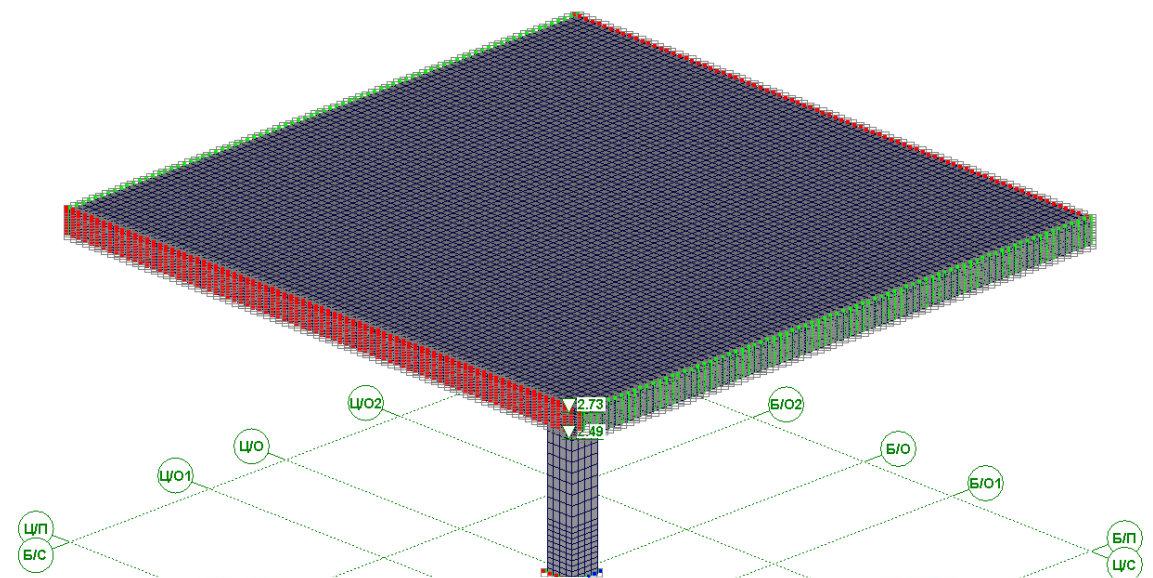
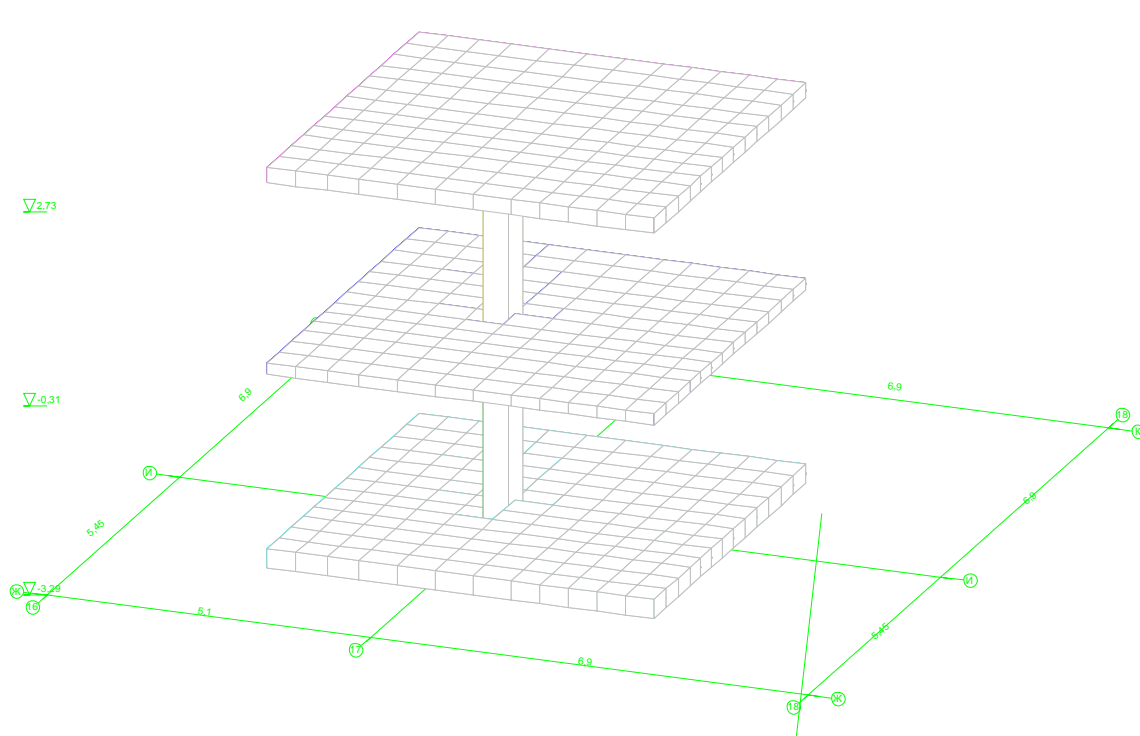
- компоненты напряжений: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$
- компоненты деформаций $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$
- компоненты перемещений $u, v, w,$

т. е. всего 15 неизвестных и 15 уравнений

Сравнение расчетных моделей плиты перекрытия:

Теория Кирхгофа-Лява

Теория упругости



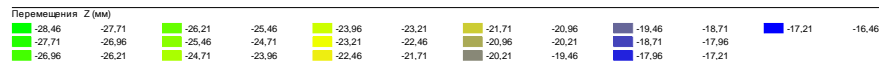
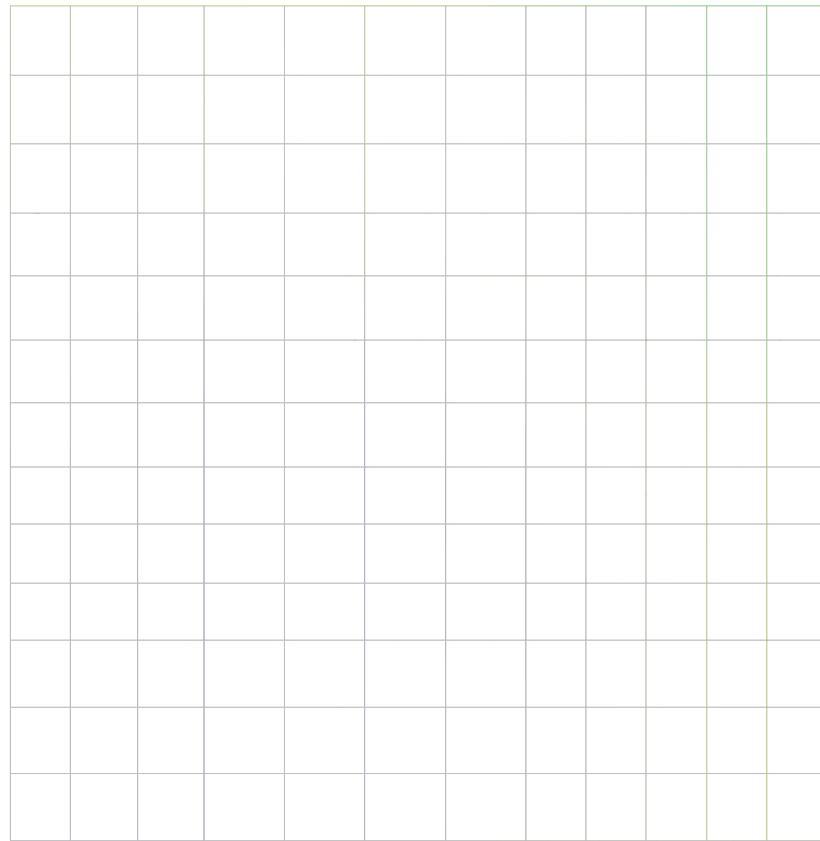
Жесткости

	УСЛ1	1 * 1		ППм-2	h=0.18		Км-5-1	60 * 40		Ц/О	X, Y
	ФПм-2	h=0.3		ППм-5	h=0.24		Км-5-2	60 * 40			

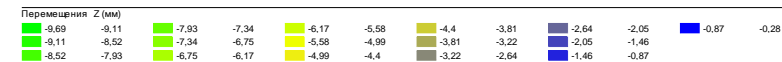
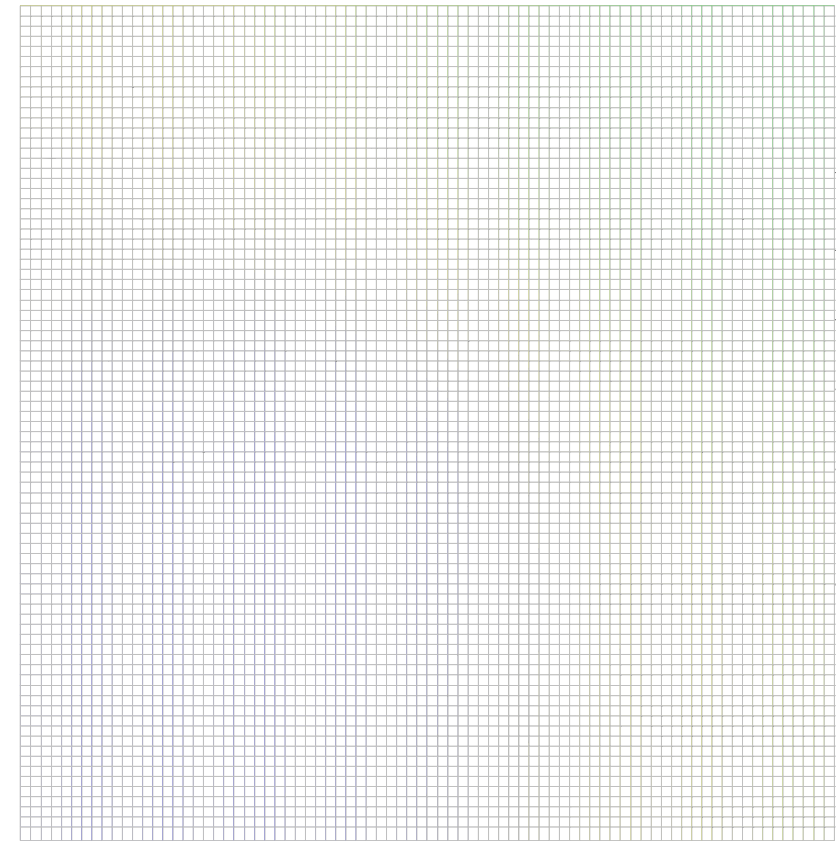
Сравнение вертикальных перемещений по оси Z:

Теория Кирхгофа-Лява

Теория упругости



максимальные прогибы 28,5 мм

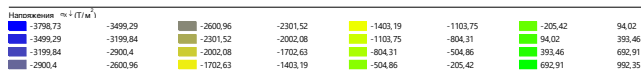
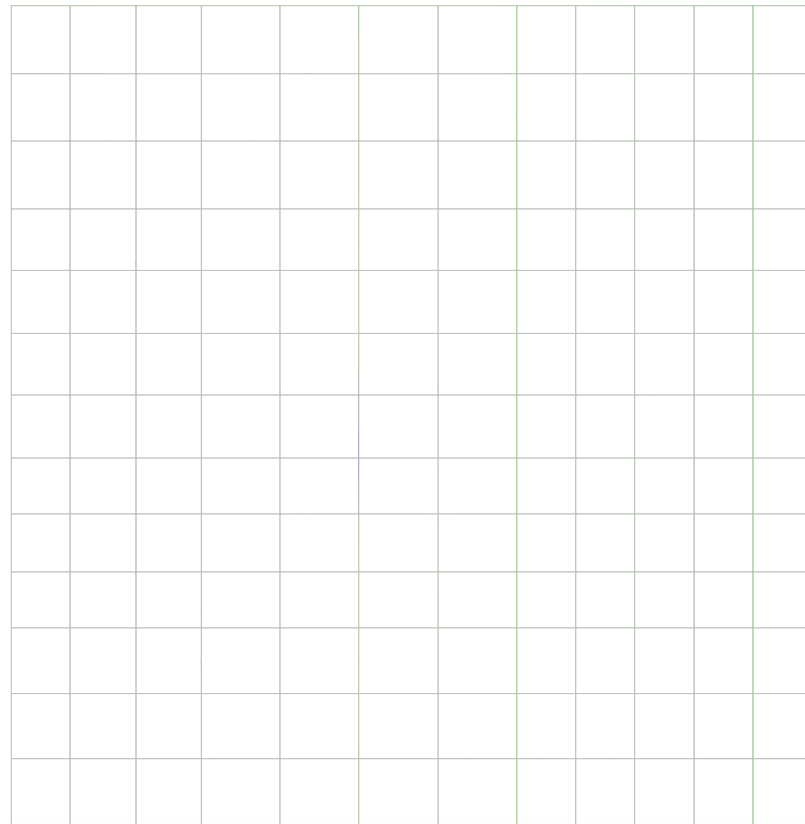


максимальные прогибы 9,6 мм

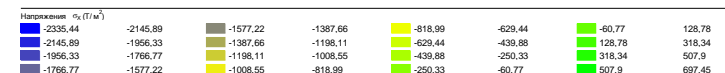
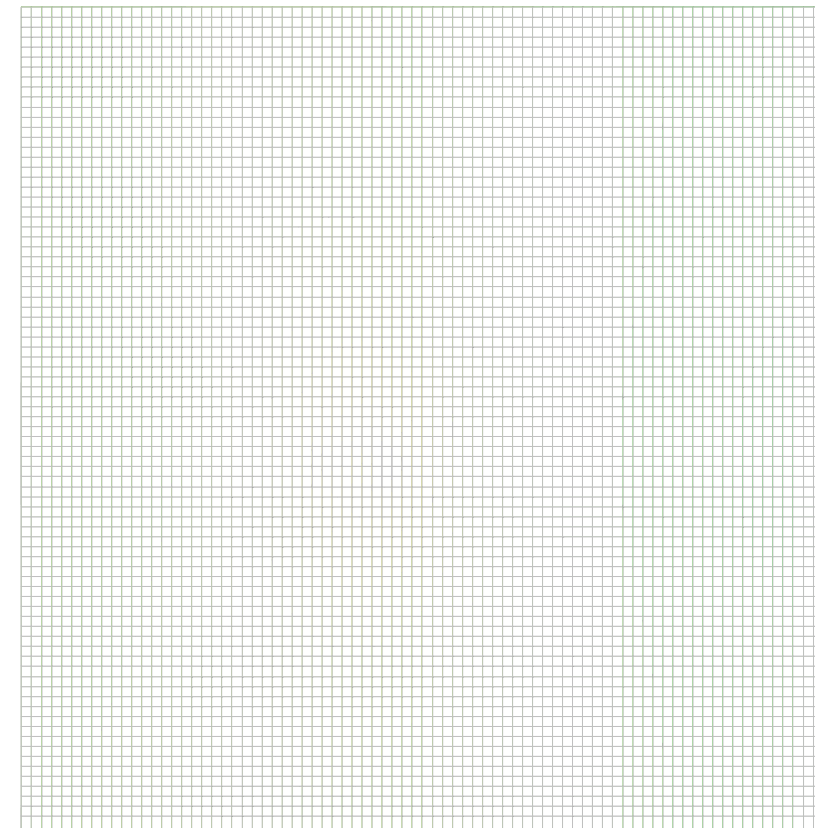
Сравнение напряжений σ_x на нижней грани:

Теория Кирхгофа-Лява

Теория упругости



напряжения сжатия (max) в бетоне -37987 кПа



напряжения сжатия (max) в бетоне -23354 кПа

Определение приведенного изгибающего момента

На основе объемной задачи теории упругости (полученных $\sigma_{bt,red}$ и $\sigma_{bc,red}$):

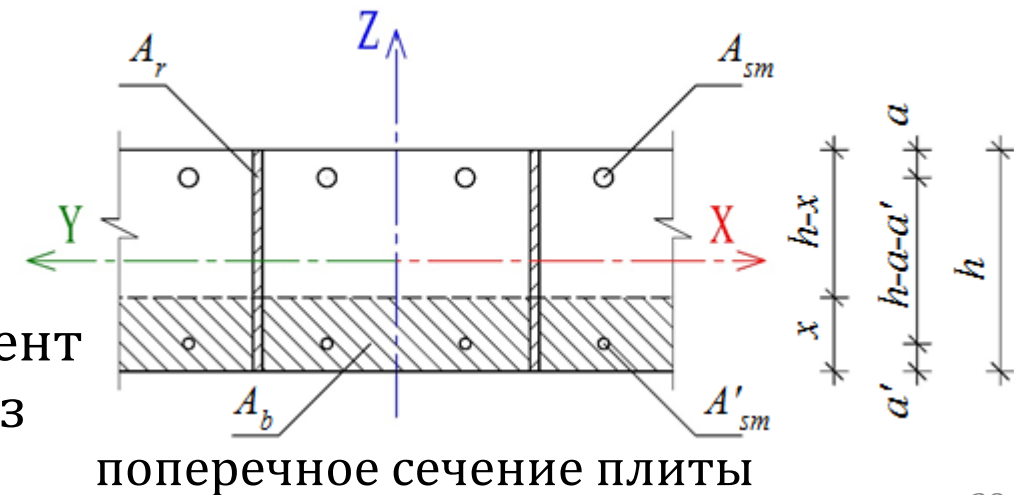
$$M_{red} = \frac{\sigma_{bt,red} - \sigma_{bc,red}}{\frac{z_t}{I_{red,el}} + \frac{z_c}{I_{red,el}}} = I_{red,el} \frac{\sigma_{bt,red} - \sigma_{bc,red}}{z_t + z_c} = I_{red,el} \frac{\sigma_{bt,red} - \sigma_{bc,red}}{h}$$

и решения системы уравнений относительно M_{red} :

$$\sigma_{bt,red} = \frac{N}{A} + \frac{M_{red} \cdot z_t}{I_{red,el}} \quad \text{и} \quad \sigma_{bc,red} = \frac{N}{A} - \frac{M_{red} \cdot z_c}{I_{red,el}}$$

где $\sigma_{bt,red} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{bt,i}}{n}$ и $\sigma_{bc,red} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{bc,i}}{n}$ – приведенные (средние) значения нормальных горизонтальных напряжений в бетоне на крайних фибрах поперечного сечения

$I_{red,el} = I_b + \alpha I_r + \alpha I_{sm} + \alpha I'_{sm}$ – приведенный момент инерции поперечного сечения опорного участка без учета трещин и неупругих деформаций бетона



Теория прочности бетона Вильяма-Варнка

Бетон **растрескивается** (при растяжении) или **раздрабливается** (при сжатии) при выполнении условия:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad \text{или} \quad \frac{F}{R_b} - S \geq 0$$

где F – функция состояния главных напряжений $\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$

S – поверхность разрушения, выраженная в компонентах главных напряжений и пятью параметрами $f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2$:

$f_t = R_{bt}$ – предельная прочность при одноосном растяжении

$f_c = R_b$ – предельная прочность при одноосном сжатии

$f_{cb} = R_b''$ – предельная прочность при двухосном сжатии

f_1 и f_2 – предельная прочность при двухосном и одноосном сжатии соответственно, наложенном на гидростатическое напряжение σ_h^a



Случаи разрушения бетона:

- **Случай 1:** $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (сжатие-сжатие-сжатие)
- **Случай 2:** $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (растяжение-сжатие-сжатие)
- **Случай 3:** $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ (растяжение-растяжение-сжатие)
- **Случай 4:** $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ (растяжение-растяжение-растяжение)

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения

$f_t = R_{bt}$ – предельная прочность при одноосном растяжении

$f_c = R_b$ – предельная прочность при одноосном сжатии

$f_{cb} = R_b'' = 1,2R_b$ – предельная прочность при двухосном сжатии

$f_1 = 1,45R_b$ и $f_2 = 1,725R_b$ – предельная прочность при двухосном и одноосном сжатии соответственно, наложенном на гидростатическое напряжение σ_h^a



Поверхность разрушения:

И критерий прочности для **случая 1**: $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (сжатие-сжатие-сжатие):

$$F = F_1 = \frac{1}{\sqrt{15}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$S = S_1 = \frac{2r_2(r_2^2 - r_1^2) \cos \eta + r_2(2r_1 - r_2) \sqrt{4(r_2^2 - r_1^2) \cos^2 \eta + 5r_1^2 - 4r_1 \cdot r_2}}{4(r_2^2 - r_1^2) \cos^2 \eta + (r_2 - 2r_1)^2}$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения

$$\cos \eta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}$$

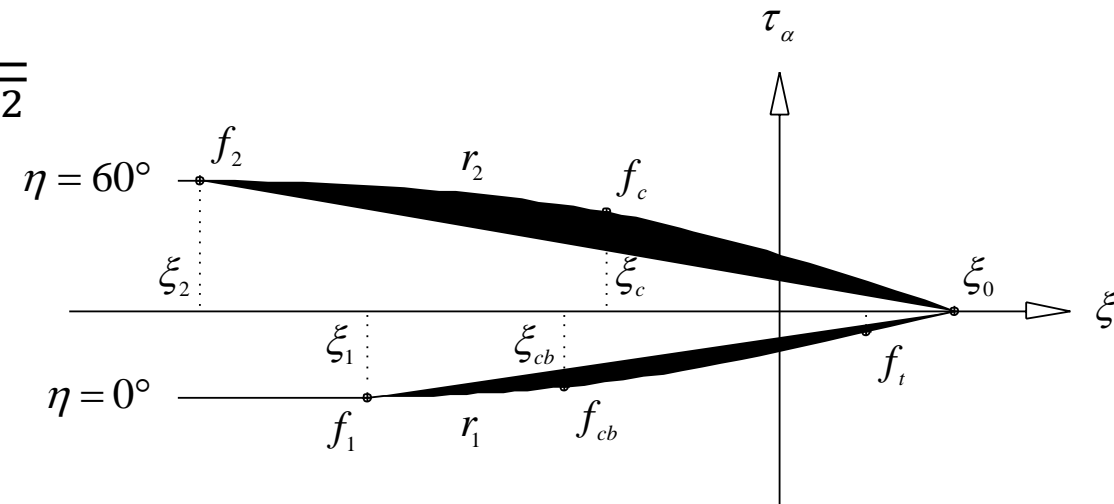
$$r_1 = a_0 + a_1 \cdot \xi + a_2 \cdot \xi^2$$

$$r_2 = b_0 + b_1 \cdot \xi + b_2 \cdot \xi^2$$

$$\xi = \sigma_h / R_b$$

$$\text{при } |\sigma_h| = (\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}) / 3 \leq \sqrt{3} \cdot R_b$$

σ_h – гидростатическое давление (среднее напряжение)



Сечение вдоль поверхности разрушения при трехосном НДС

Поверхность разрушения:

И критерий прочности для **случая 2**: $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (растяжение-сжатие-сжатие):

$$F = F_2 = \frac{1}{\sqrt{15}} \sqrt{(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}$$

$$S = S_2 = \left(1 - \frac{\sigma_1}{R_{bt}}\right) \frac{2p_2(p_2^2 - p_1^2) \cos \eta + p_2(2p_1 - p_2) \sqrt{4(p_2^2 - p_1^2) \cos^2 \eta + 5p_1^2 - 4p_1 \cdot p_2}}{4(p_2^2 - p_1^2) \cos^2 \eta + (p_2 - 2p_1)^2}$$

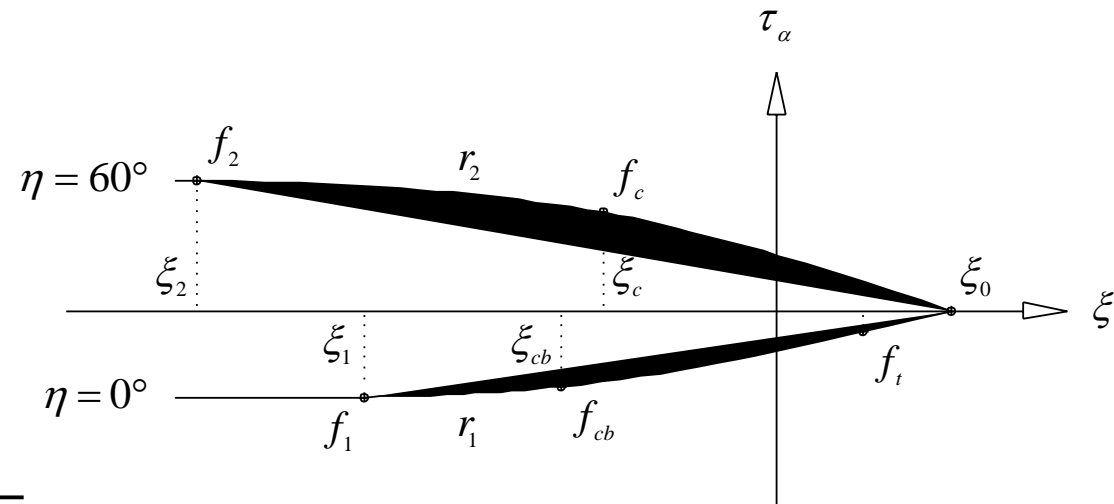
где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения

$$p_1 = a_0 + a_1 \cdot \chi + a_2 \cdot \chi^2$$

$$p_2 = b_0 + b_1 \cdot \chi + b_2 \cdot \chi^2$$

$$\chi = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{3R_b} \quad \text{при } |\sigma_h| \leq \sqrt{3} \cdot R_b$$

$$\cos \eta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}$$



Сечение вдоль поверхности разрушения при трехосном НДС

Поверхность разрушения:

И критерий прочности для **случая 3**: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ (растяжение-растяжение-сжатие):

$$F = F_3 = \sigma_i; \quad i = 1, 2$$

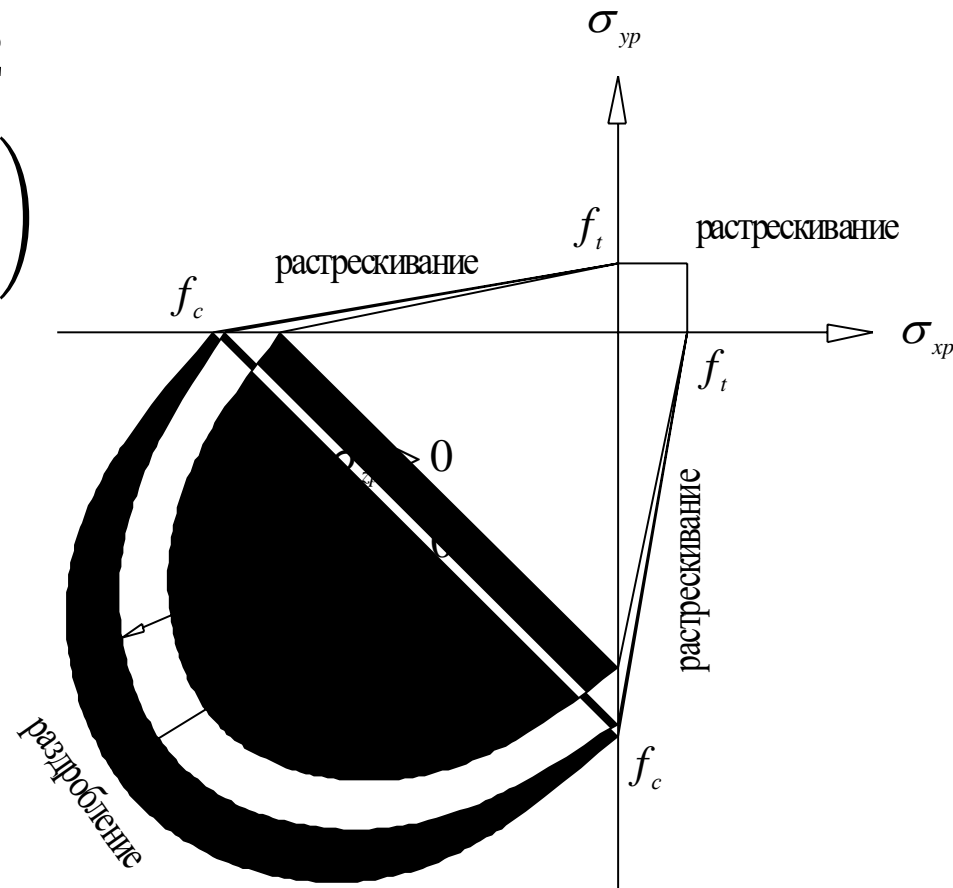
$$S = S_3 = \frac{R_{bt}}{R_b} \left(1 + \frac{\sigma_3}{R_b} \right)$$

и для **случая 4**: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ (растяжение-растяжение-растяжение):

$$F = F_4 = \sigma_i; \quad i = 1, 2, 3$$

$$S = S_4 = \frac{R_{bt}}{R_b}$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения



Поверхность разрушения
для двухосного НДС

Особенности теории прочности бетона:

Функции F (состояния главных напряжений) и S (поверхности разрушения) выражаются в компонентах главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и при этом учитываются следующие условия:

$$\sigma_1 = \max(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}), \quad \sigma_3 = \min(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}), \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

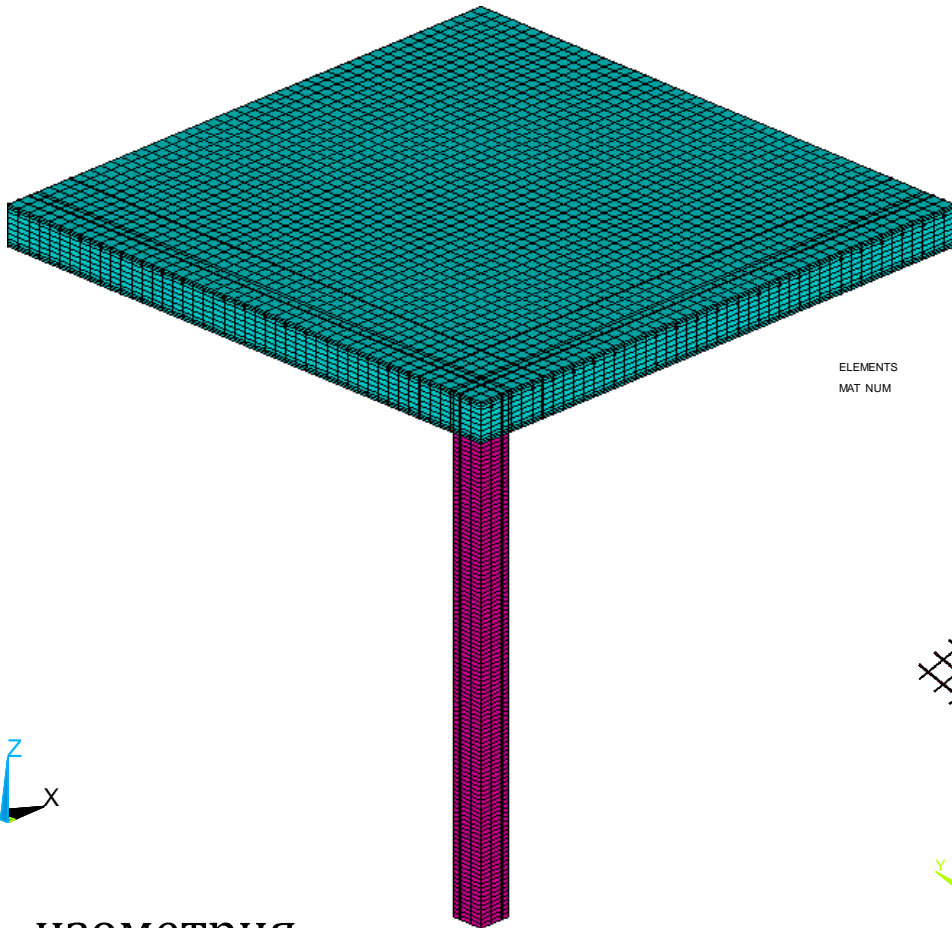
В каждом из приведенных случаев НДС для описания F и S используются независимые функции: F_1, F_2, F_3, F_4 и S_1, S_2, S_3, S_4

Функции S_i ($i = 1 \dots 4$), описывающие поверхность разрушения, являются непрерывными, при этом градиенты поверхности не являются непрерывными, если любое главное напряжение меняет знак

Расчетная модель фрагмента перекрытия:

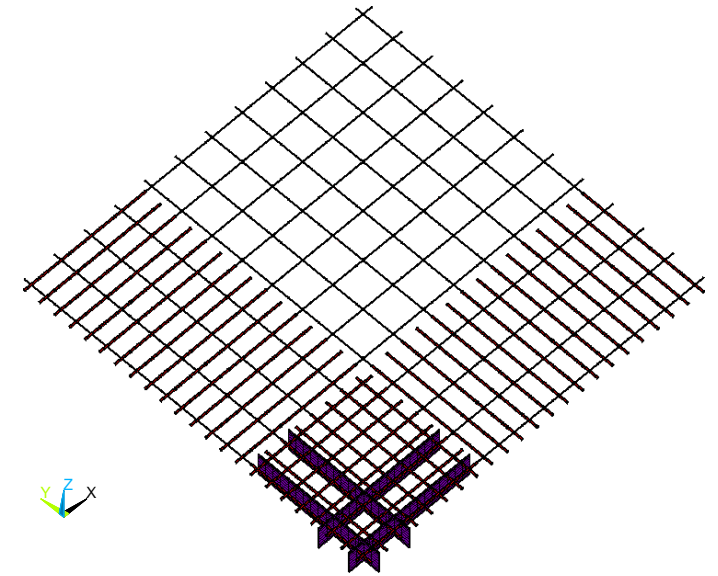
Теория прочности бетона Вильяма-Варнка

ELEMENTS
MAT NUM



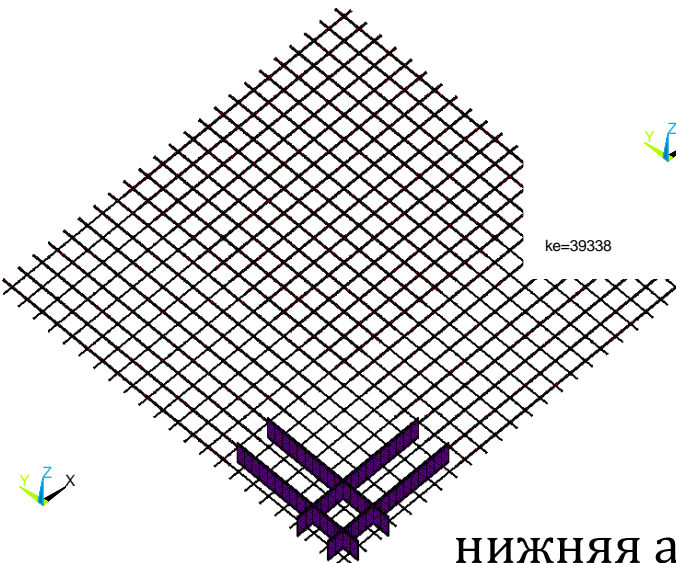
ELEMENTS
MAT NUM

ELEMENTS
MAT NUM



верхняя арматура

ke=39338



нижняя арматура

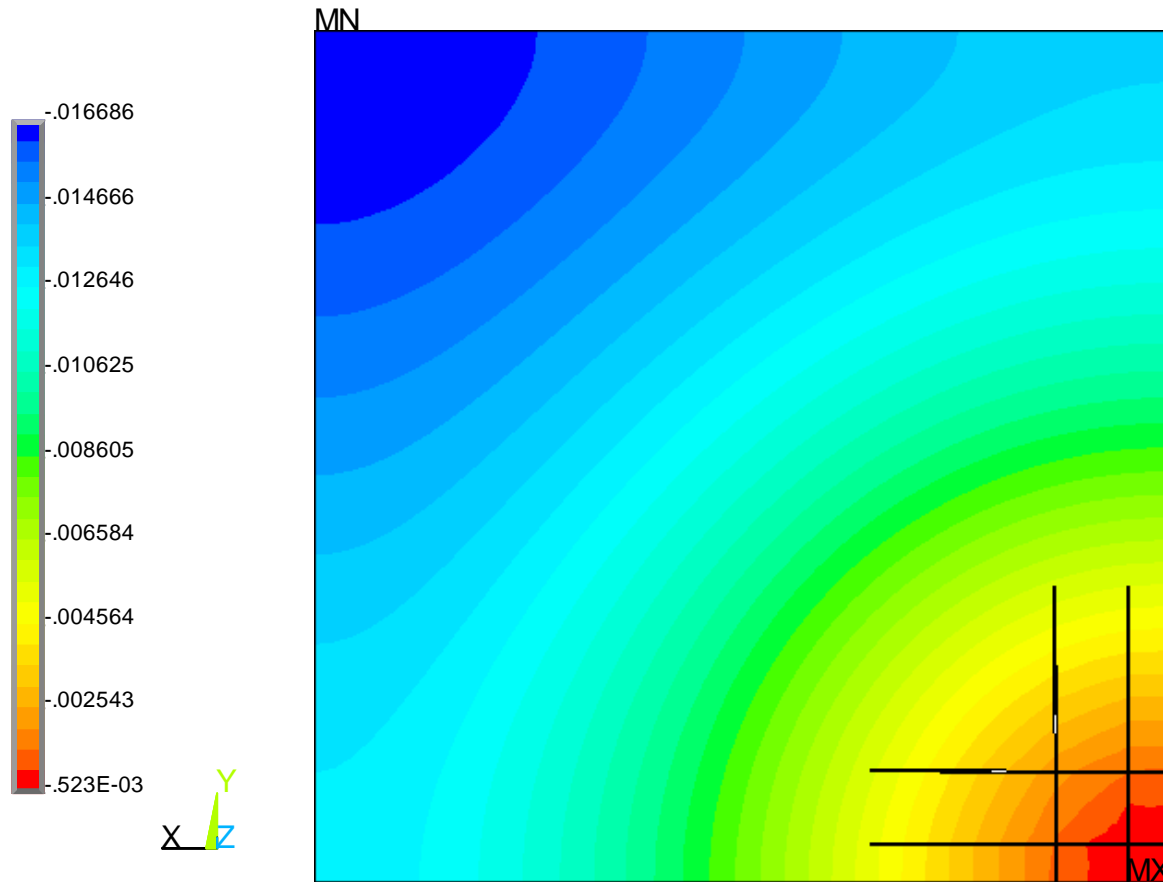
ke=39338



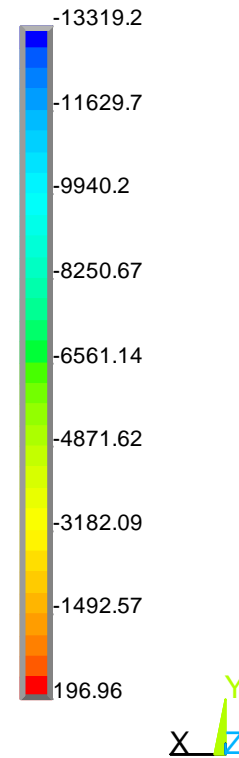
изометрия

ke=39338

Прогибы и напряжения в бетоне:

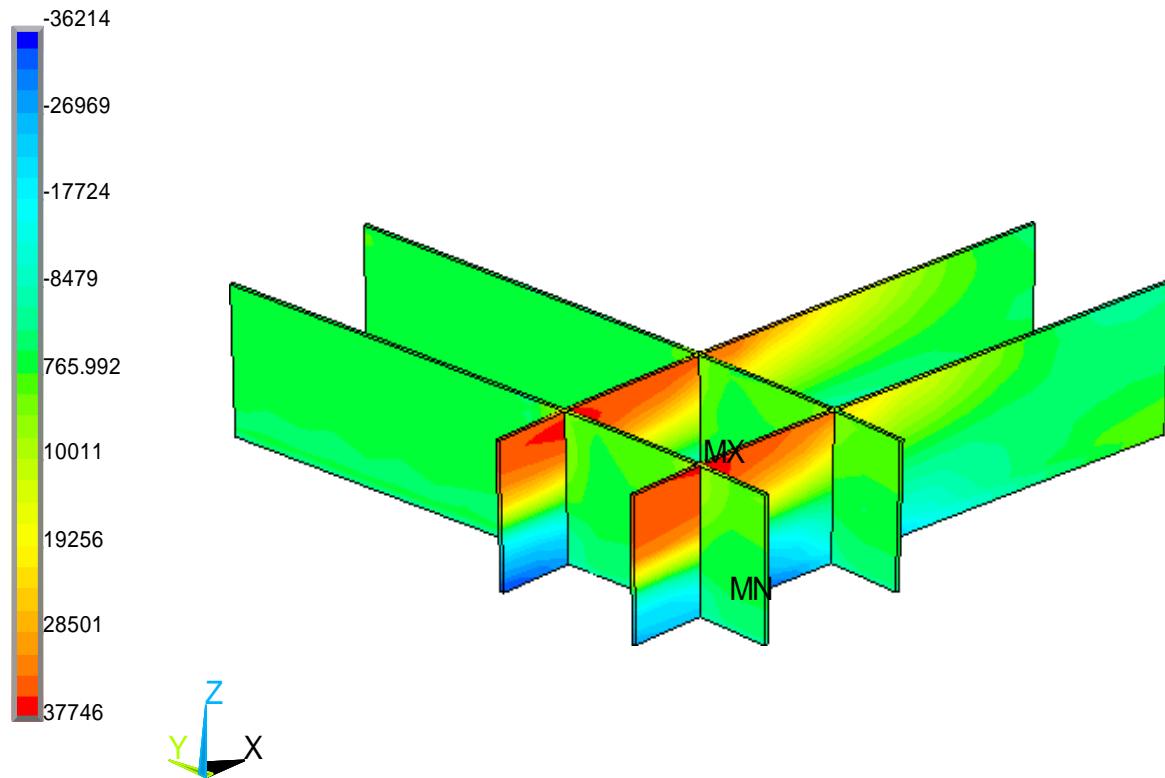


максимальные прогибы 16,7 мм

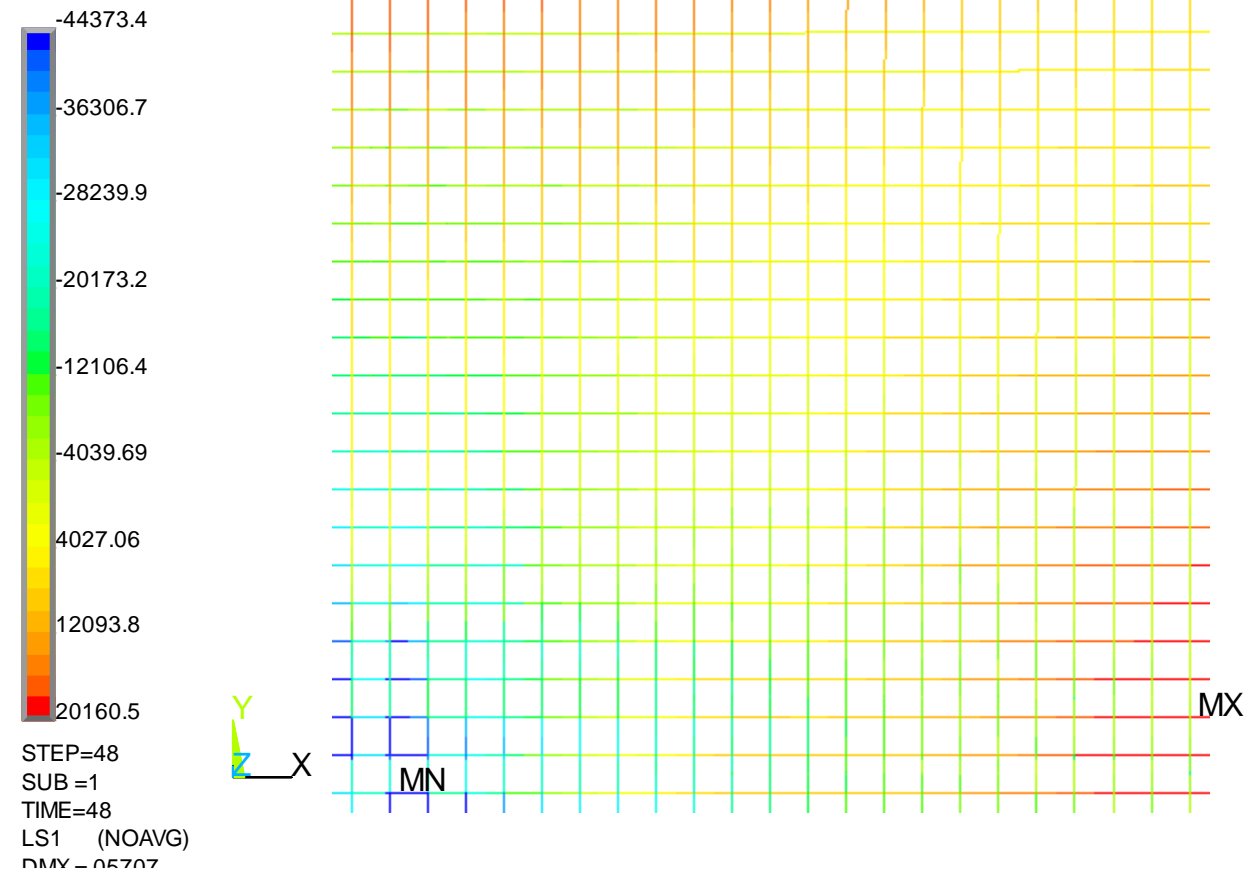


напряжения в бетоне, тс/м²

Напряжения в листовой и стержневой арматуре:



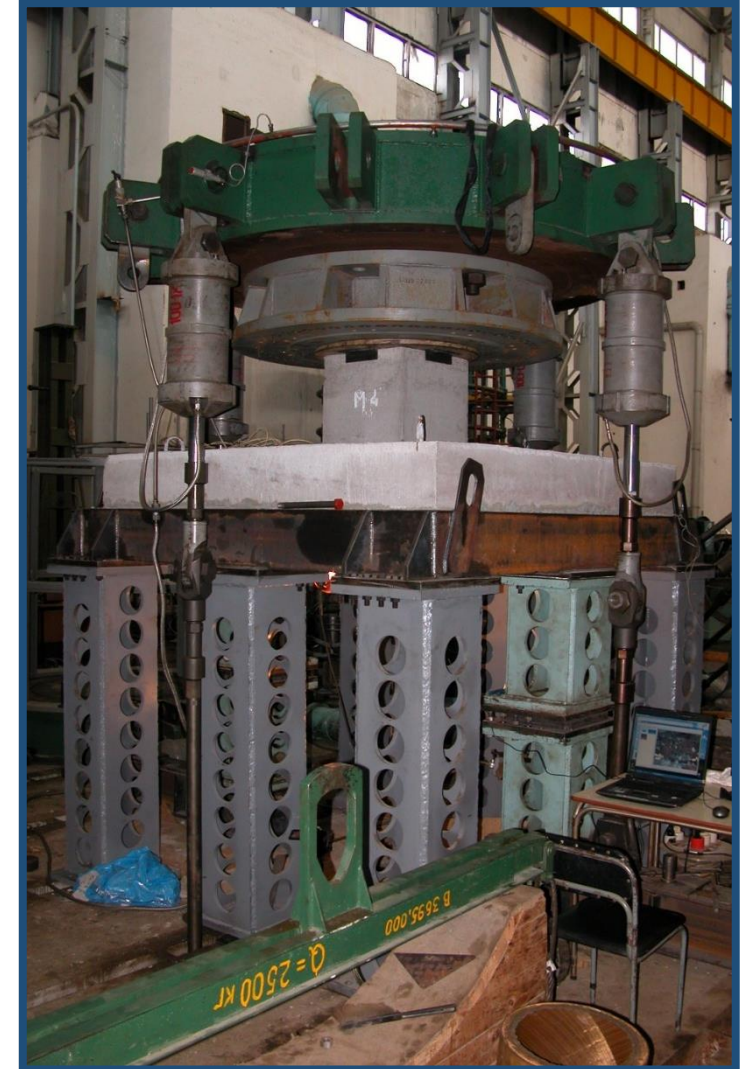
напряжения σ_x в листовой арматуре, тс/м^2



напряжения σ_s и σ_{sc} в нижней арматуре, тс/м^2

Научно-экспериментальные исследования:

- В диссертации «Несущая способность опорных зон монолитных железобетонных безбалочных перекрытий, усиленных скрытыми металлическими капителями» продолжены теоретические исследования и приведены результаты экспериментов, подтверждающих соответствие расчетных и опытных данных
- Методика расчета позволяет с точностью до **5%** в запас определить разрушающую нагрузку и соответствие I и II предельным состояниям









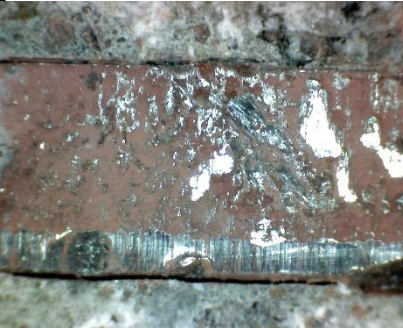
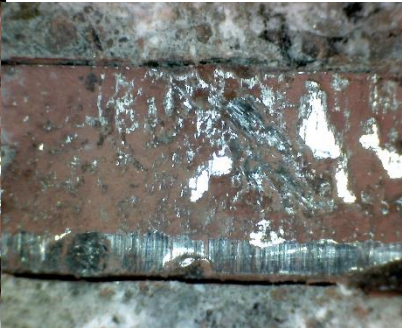
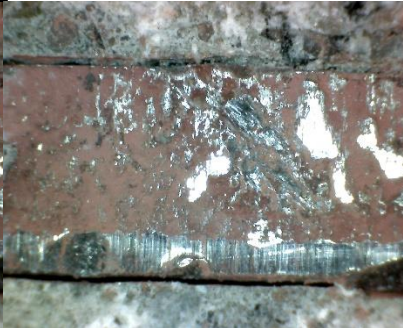

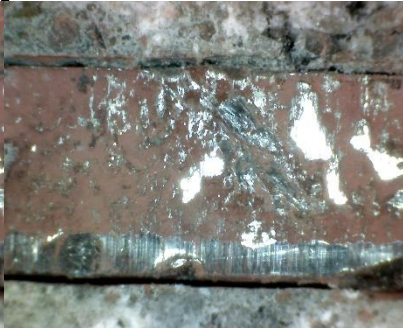
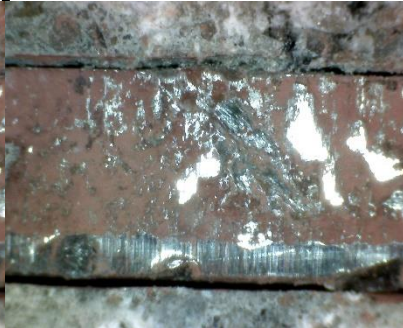
Общая характеристика испытанных образцов:

Марка образца	Марка РС	Габариты образца, м	Габарит оголовка колонны, м	Толщина листов, мм	Класс стали листов	Растянутая арматура	Сжатая арматура	Класс арматуры	E_s , ГС/М ²	Класс бетона	E_b , ГС/М ²	Разрушающая нагрузка P_f , ГС	Дата испытаний в 2010 г.	
МК-1	РС60	2,0×2,0×0,24 (h)	-	6	С345	-	-	-	2,1·10 ⁷	-	-	25,6	07.04	
ФПП-1	РС61		0,5×0,5×0,5 (h)	-	-	-	-	-		А500	В30	3,31·10 ⁶	108,0	10.06
ФПП-2	РС62			-	-	18Ø12	-	108,0					28.05	
ФПП-3	РС63			6	С345	18Ø12	-	228,0					14.05	
ФПП-4	РС64			18Ø16	-	268,0	06.05							
ФПП-5	РС65			18Ø12	18Ø8	228,0	22.04							
ФПП-6	РС66			18Ø16	18Ø8	268,0	15.04							

Образец ФПП-4 на испытательном стенде и МК-1 (решетка):



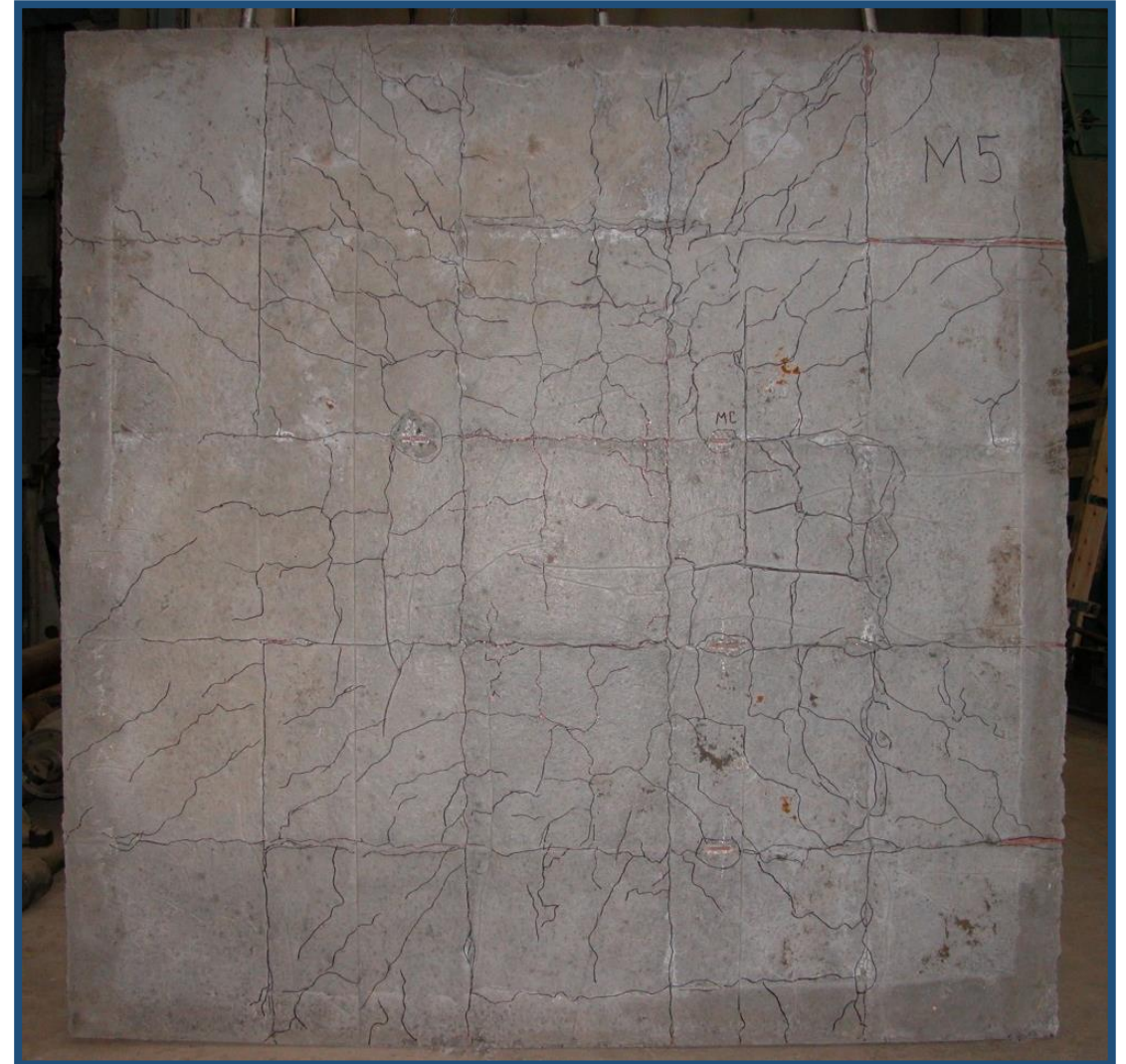
Ширина нормальных трещин в образце ФПП-4:

8,0 тс	28,0 тс	48,0 тс	68,0 тс	88,0 тс	108,0 тс
					
128,0 тс	148,0 тс	168,0 тс	188,0 тс	208,0 тс	228,0 тс
					

Образец ФПП-4 после разрушения:



верхняя грань

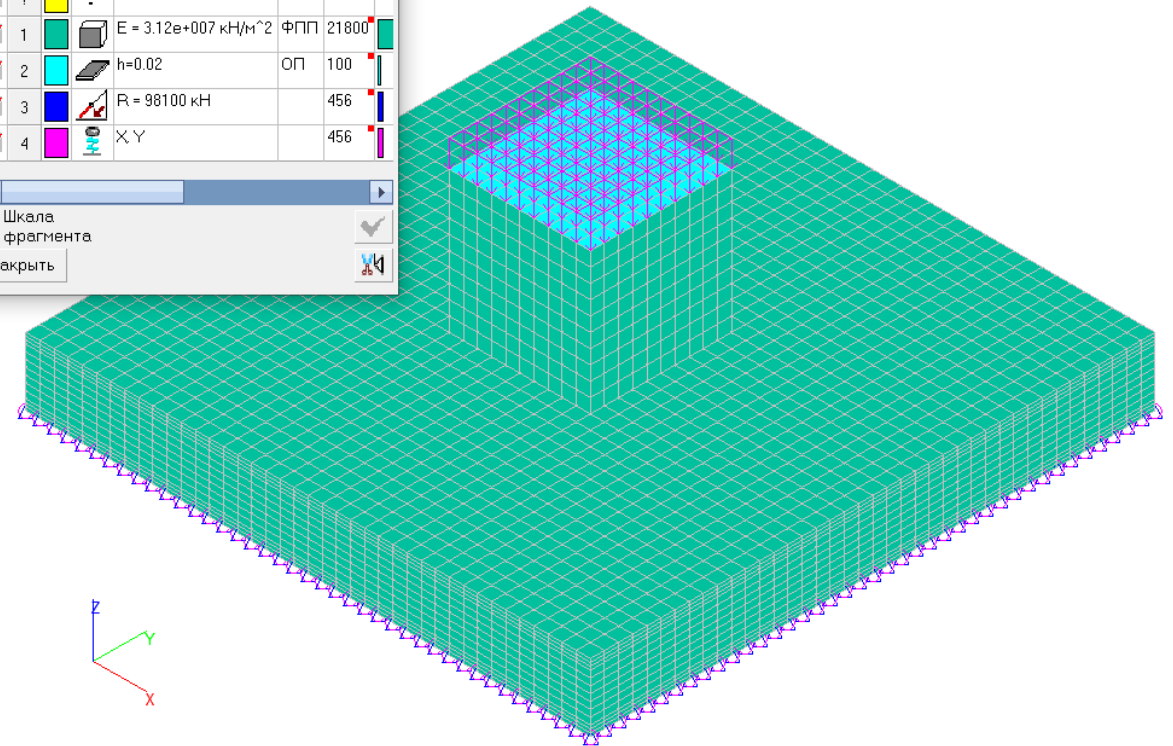
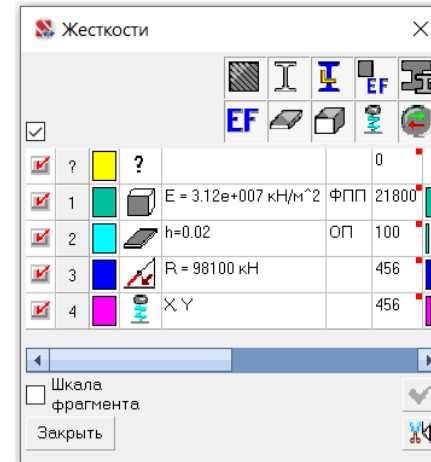
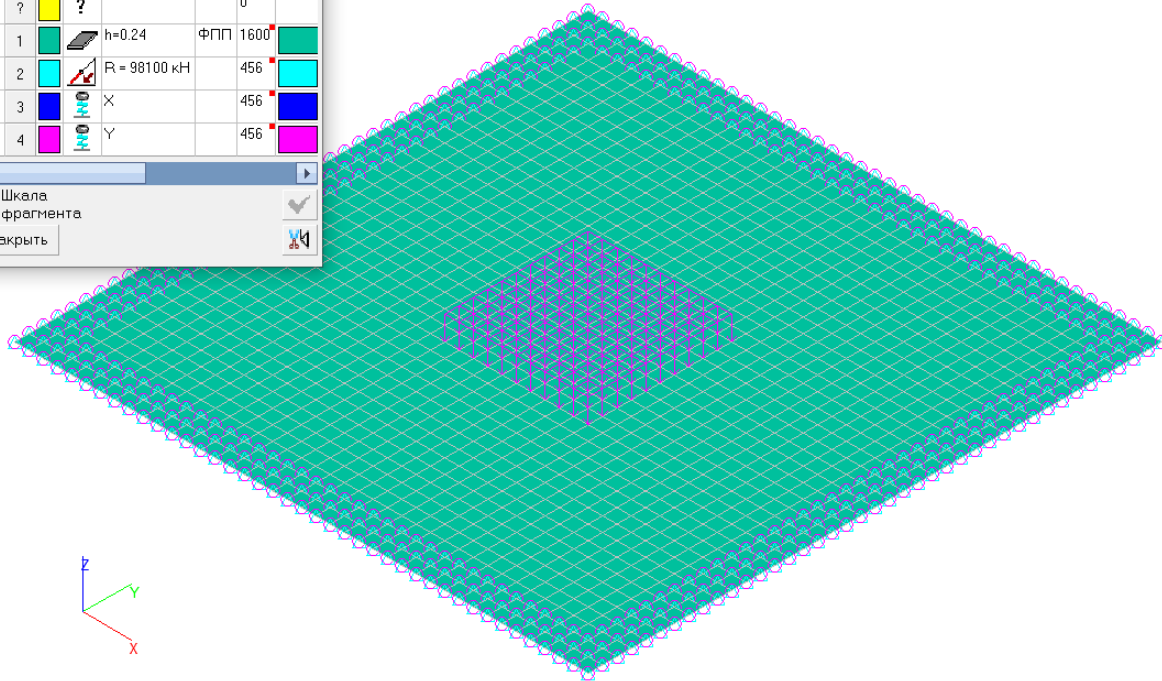
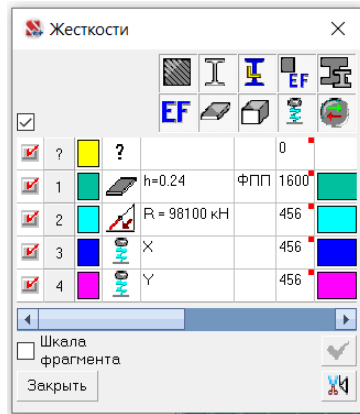


нижняя грань

Сравнение расчетных моделей натурального образца:

Теория Кирхгофа-Лява

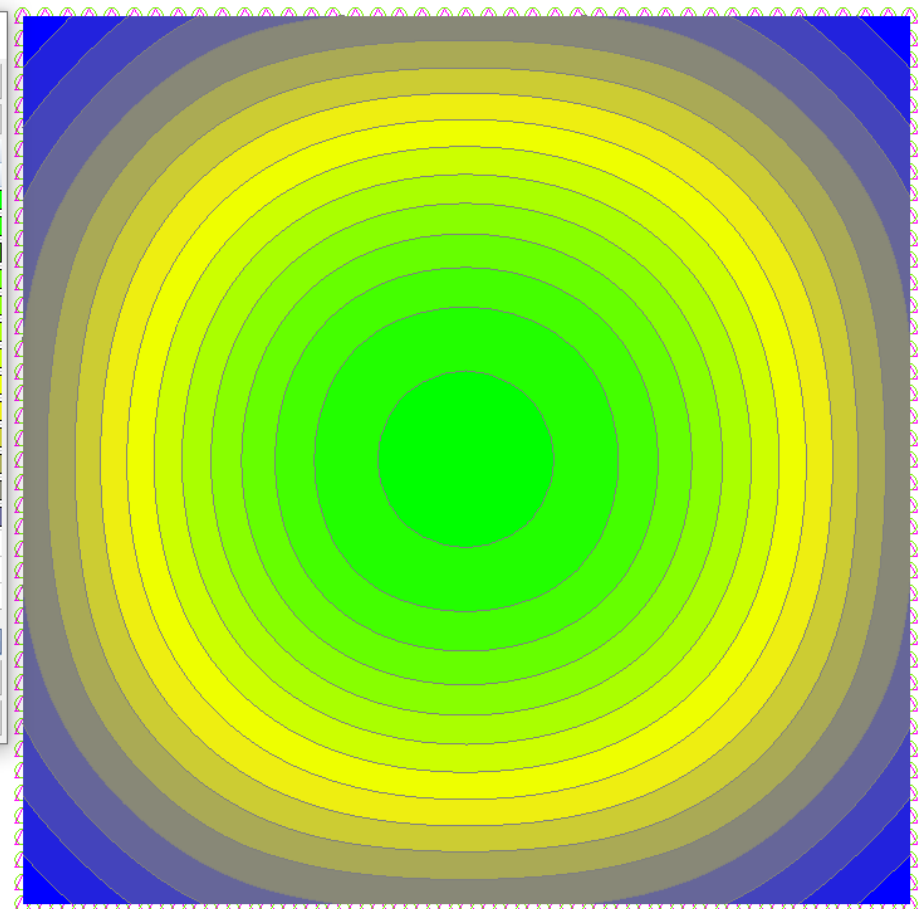
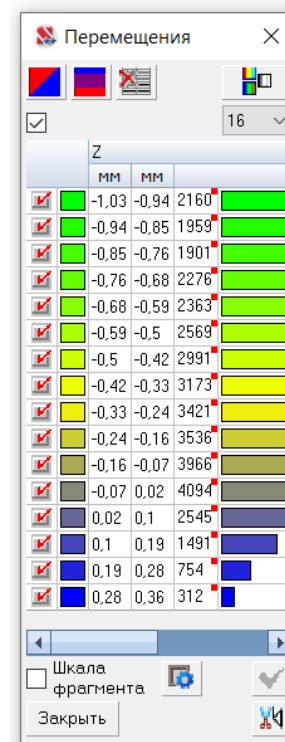
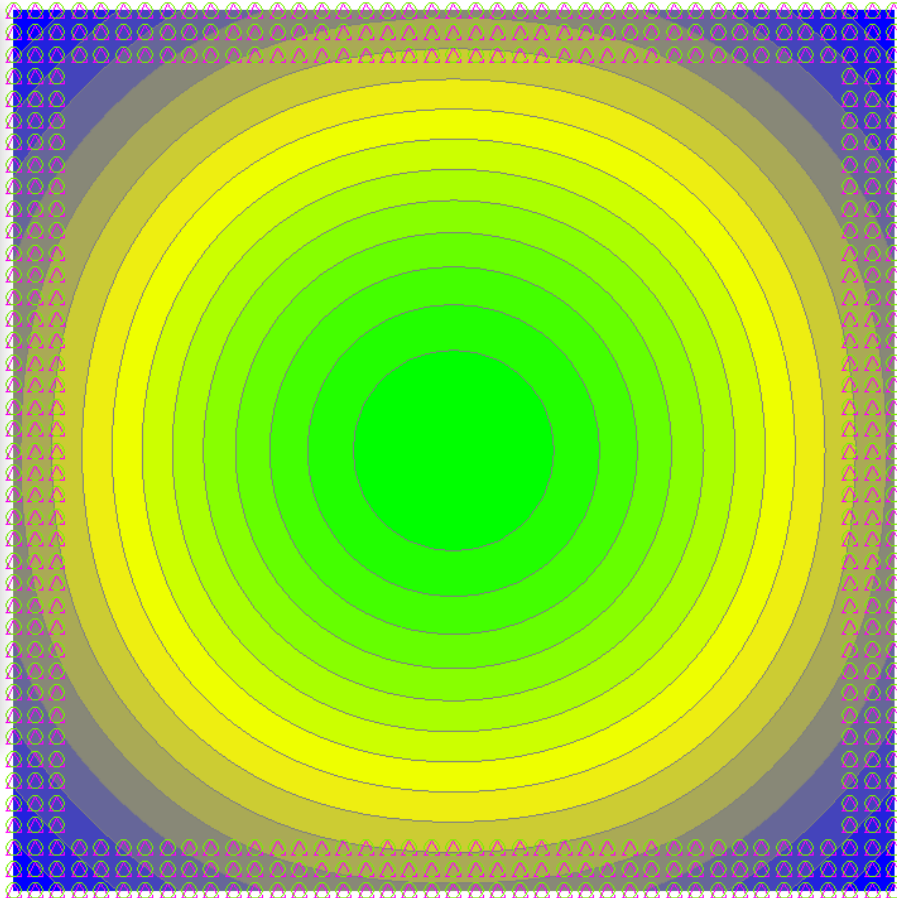
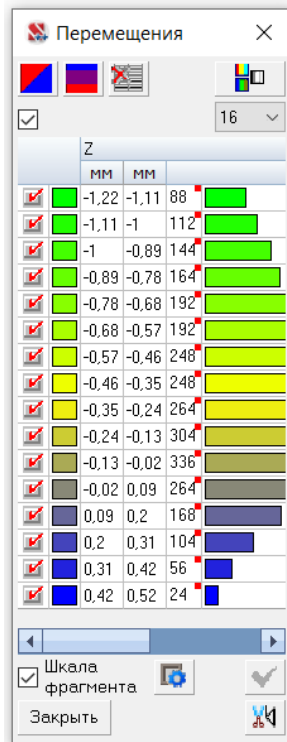
Теория упругости



Сравнение вертикальных перемещений по оси Z:

Теория Кирхгофа-Лява

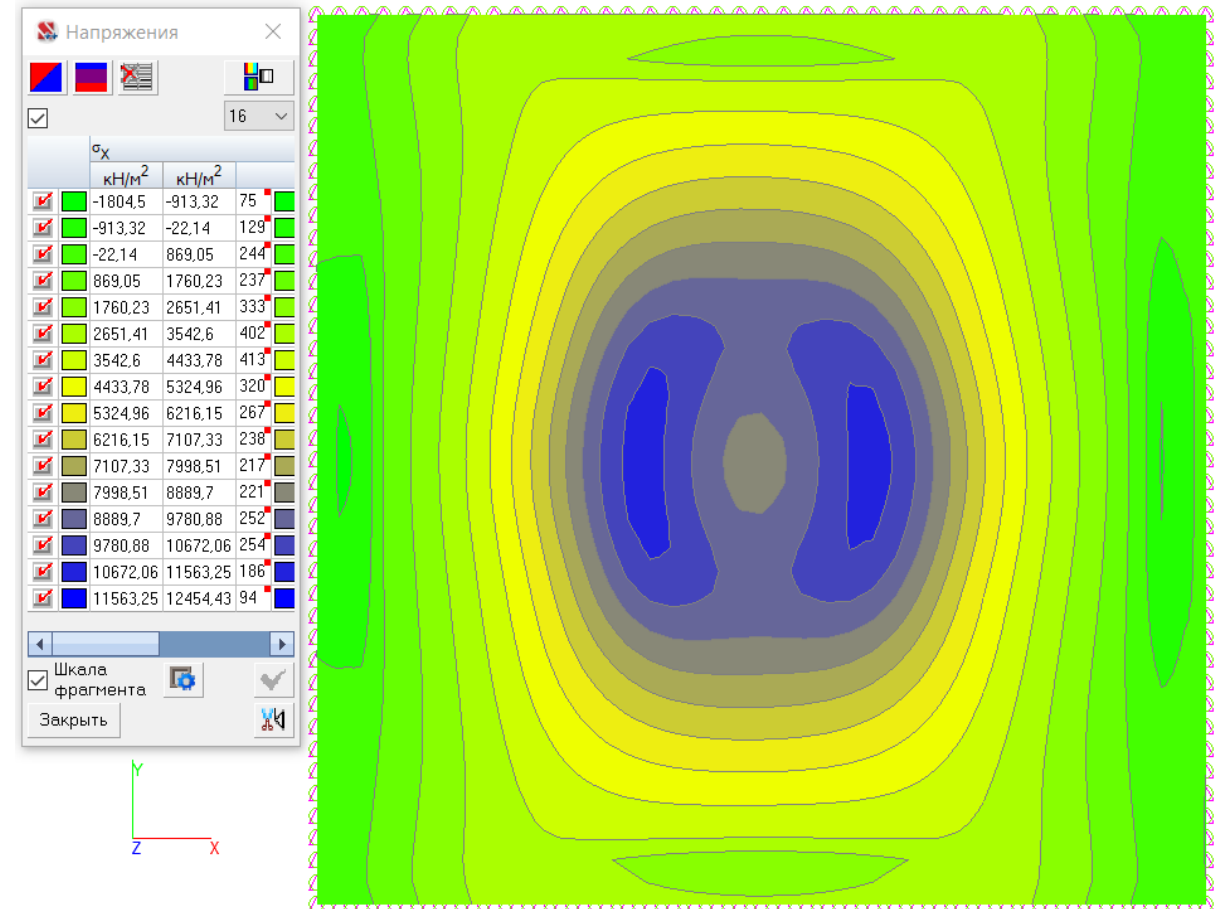
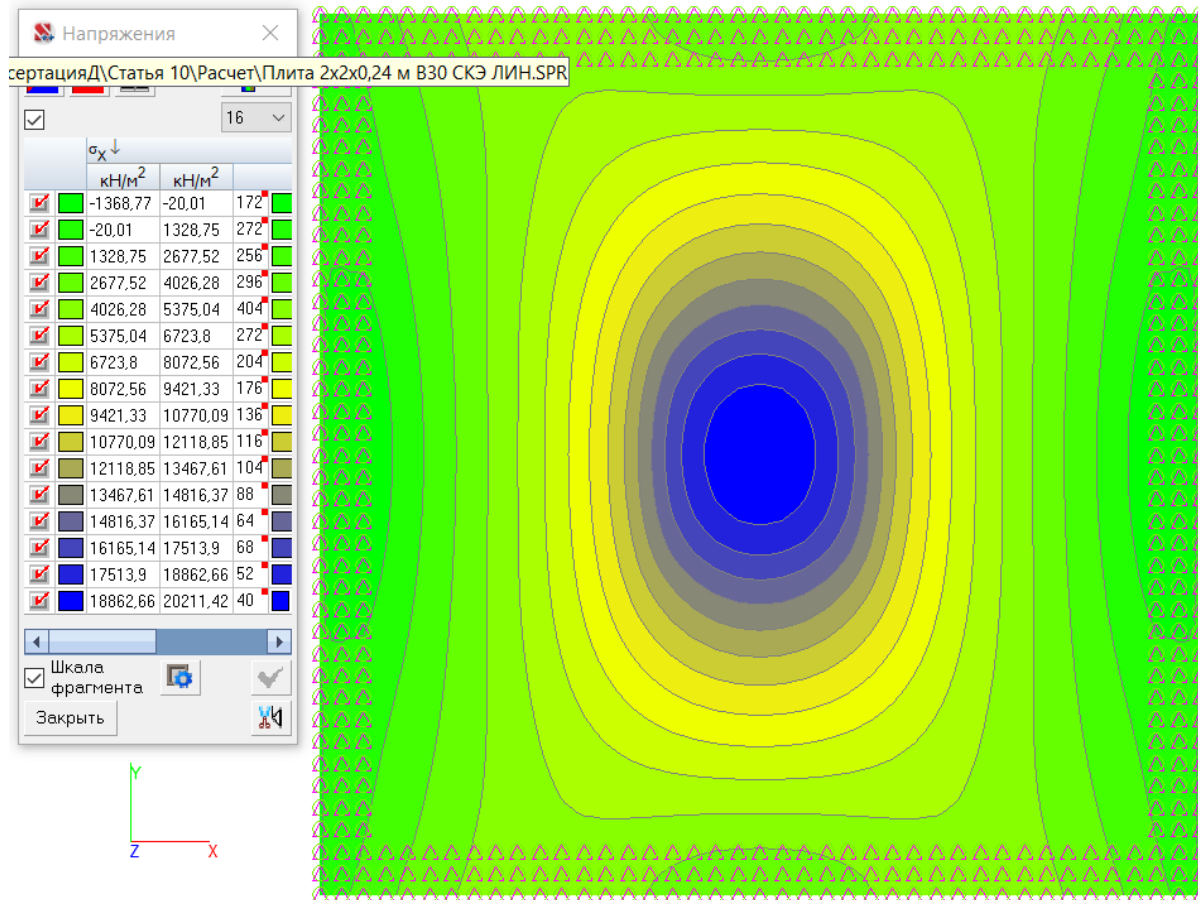
Теория упругости



Сравнение напряжений σ_x на нижней грани:

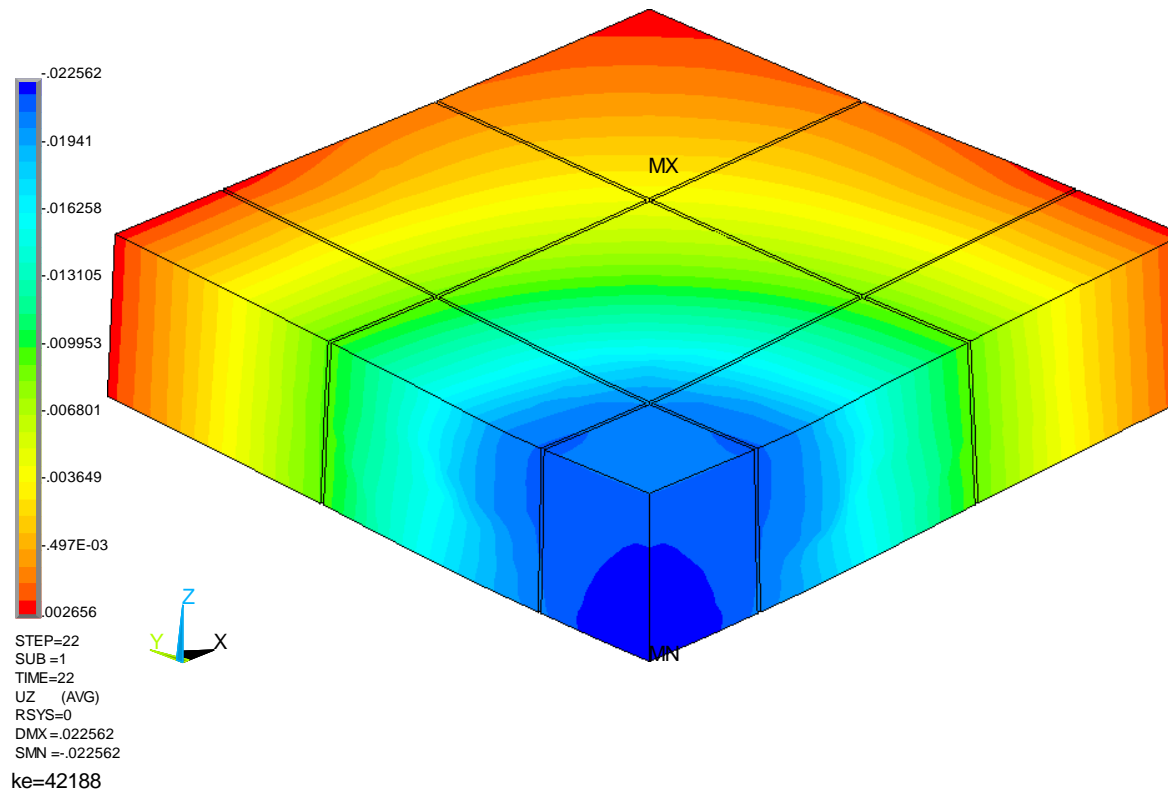
Теория Кирхгофа-Лява

Теория упругости

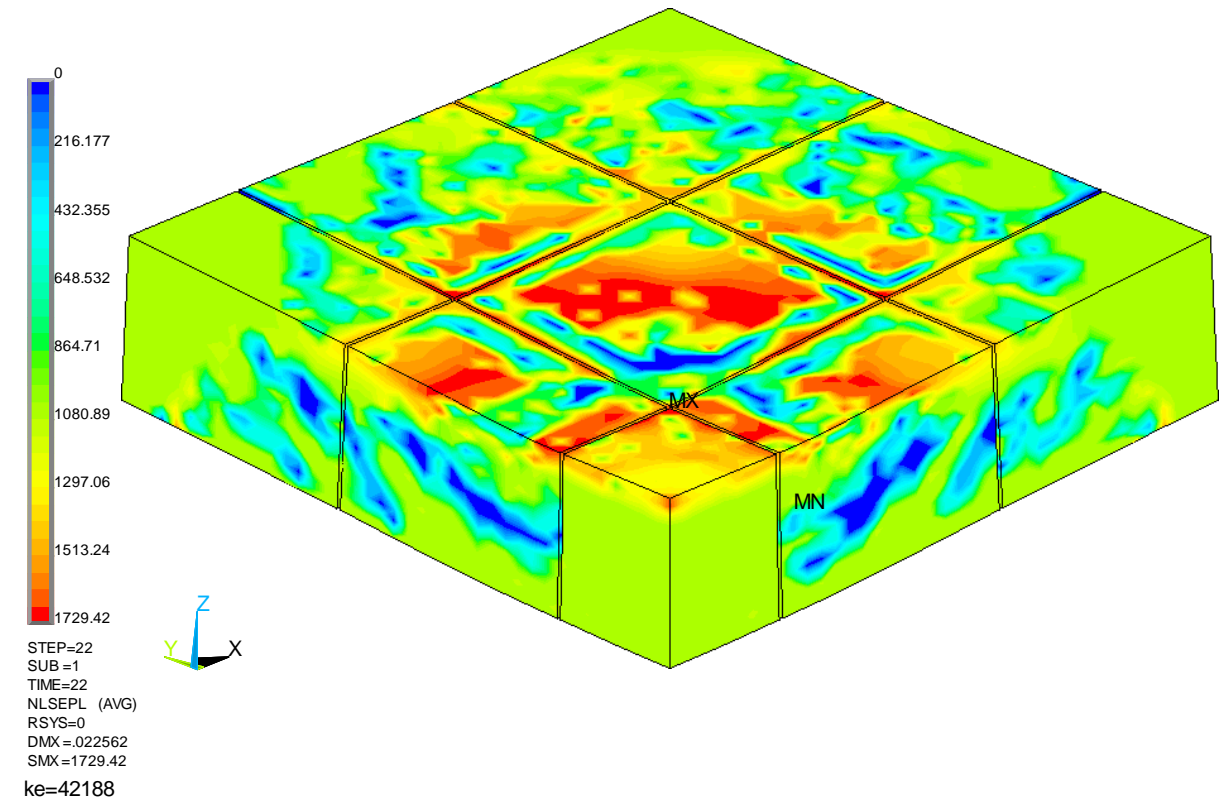


Прогибы и эквивалентные напряжения в бетоне:

Теория прочности бетона Вильяма-Варнка



максимальные прогибы 22,5 мм



эквивалентные напряжения в бетоне, тс/м²

Опытные и теоретические значения разрушающих нагрузок:

Опытная разрушающая нагрузка P_f , тс	Обозначение физической модели, величина теоретической разрушающей нагрузки P_{ult} , тс и коэффициент использования											
	ФПП-1 (РС61)		ФПП-2 (РС62)		ФПП-3 (РС63)		ФПП-4 (РС64)		ФПП-5 (РС65)		ФПП-6 (РС66)	
108,0	71,9	0,67	104,2	0,97								
128,0												
148,0												
168,0												
188,0												
208,0												
228,0					210,8	0,93			218,2	0,96		
248,0												
268,0							230,6	0,86			238,1	0,89

Расчет нормальных сечений по предельным усилиям

На основе решения уравнения равновесия суммы моментов внутренних усилий относительно нейтральной оси выполняется по формуле:

$$M_{red} \leq M_{ult} = \frac{R_b A_b x}{2} + R_{sc} A'_{sm} (x - a') + R_s A_{sm} (h_0 - x) + \frac{R_y A_{rc} x}{2} + \frac{R_y A_{rt} (h - x)}{2}$$

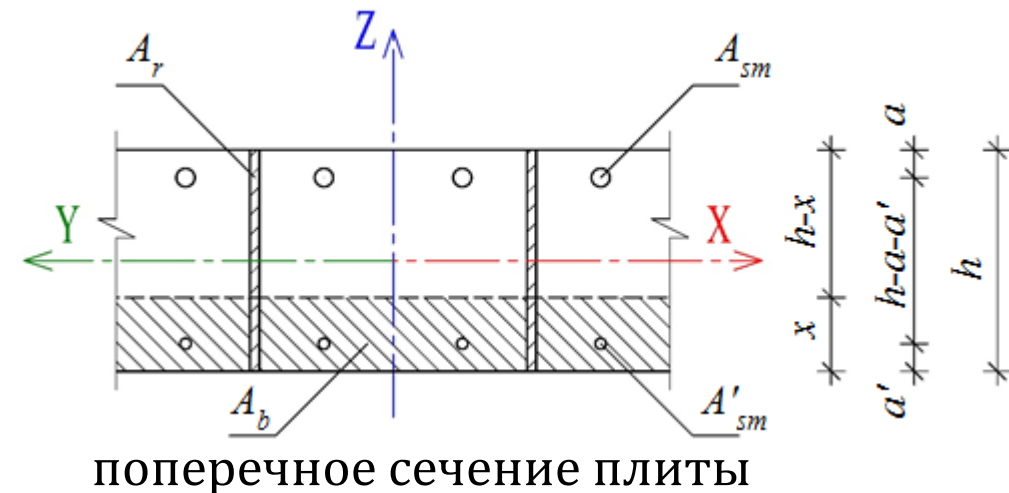
Высота сжатой зоны бетона x находится на основе решения уравнения равновесия суммы проекций внутренних усилий на ось X или Y:

$$R_b b x + R_{sc} A'_{sm} + R_y A_{rc} = R_s A_{sm} + R_y A_{rt}$$

$$x = \frac{R_s A_{sm} + R_y h b_r - R_{sc} A'_{sm}}{R_b b + 2 R_y b_r}$$

где $A_r = A_{rc} + A_{rt}$ – общая площадь листовой арматуры сжатой и растянутой зон сечения

b_r – суммарная толщина листовой арматуры



Расчет по трещиностойкости сечений

Нормальных к продольной оси элемента выполняется по формуле:

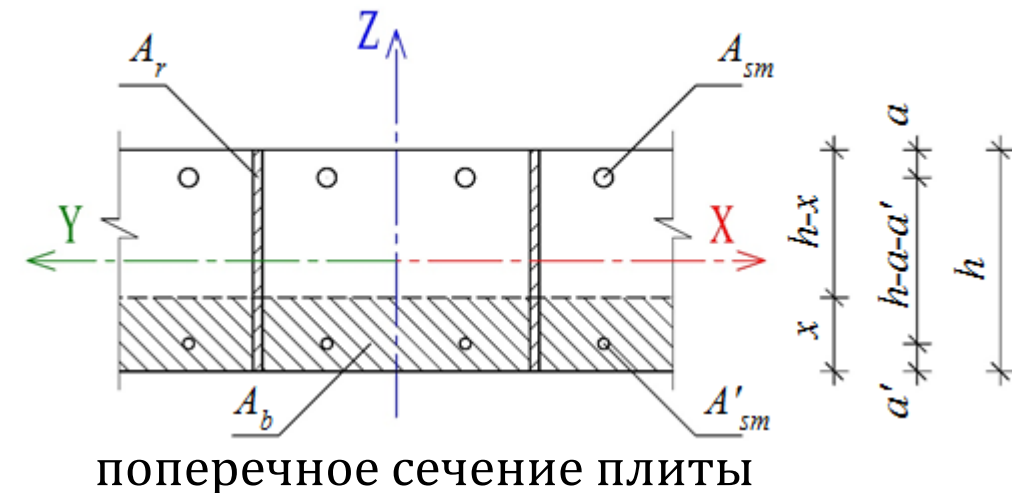
$$a_{crc(1,2,3)} = \frac{1}{2} \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s \leq a_{crc,ult}$$

где σ_s – напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки

E_s – модуль упругости арматуры

l_s – базовое расстояние между смежными нормальными трещинами

ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами



Напряжения в арматуре и высота сжатой зоны бетона:

Напряжения в растянутой арматуре изгибаемых элементов в нормальных к продольной оси сечениях определяются по формуле:

$$\sigma_{s,red} = \frac{M_{red}(h_0 - x)}{I_{red,pl}} \alpha_{s1} = \frac{I_{red,el}(\sigma_{bt,red} - \sigma_{bc,red})(h_0 - x)}{I_{red,pl} h} \alpha_{s1} \leq R_{s,ser}$$

Высота сжатой зоны бетона x находится на основе равенства нулю статического момента сечения с трещиной относительно нейтральной оси:

$$x = h_0 \left[\sqrt{\left(\alpha_{s1}\mu'_s + \alpha_{s2}\mu_s + \alpha_{s1} \frac{b_r h}{bh_0} \right)^2 + 2 \left(\alpha_{s1}\mu'_s \frac{a'}{h_0} + \alpha_{s2}\mu_s + \alpha_{s1} \frac{b_r h^2}{2bh_0^2} \right) - \left(\alpha_{s1}\mu'_s + \alpha_{s2}\mu_s + \alpha_{s1} \frac{b_r h}{bh_0} \right)} \right]$$

где b_r – суммарная толщина листовой арматуры

$\mu_s = A_{sm}/(bh_0)$ и $\mu'_s = A'_{sm}/(bh_0)$ – проценты армирования

Контроль расчетной процедуры:

По результатам исследований используется трехступенчатая независимая процедура выполнения расчетного обоснования плитных сталежелезобетонных конструкций:

- Расчет с использованием плоских конечных элементов в упругой стадии в линейной постановке на основе теории Кирхгофа-Лява
- Расчет фрагментов с использованием объемных конечных элементов в упругой стадии в линейной постановке на основе теории упругости
- Расчет фрагментов с использованием объемных конечных элементов в пластической стадии в нелинейной постановке с учетом неупругой работы бетона, образованием и раскрытием трещин (теория Вильяма-Варнка) и стали (теория малых упруго-пластических деформаций)

Область применения:

- Безбалочные (плоские) плиты перекрытий и покрытий с пролетами **более 8 м**
- Безбалочные (плоские) плиты перекрытий и покрытий с пролетами **менее 8 м** и равномерно распределенными нагрузками **более 2 тс/м²**
- Опорные зоны многопролетных неразрезных кессонных перекрытий и покрытий
- Фундаментные плиты и столбчатые фундаменты
- Свайные плитные и столбчатые ростверки
- Любые другие железобетонные конструкции, в которых возникает проблема продавливания

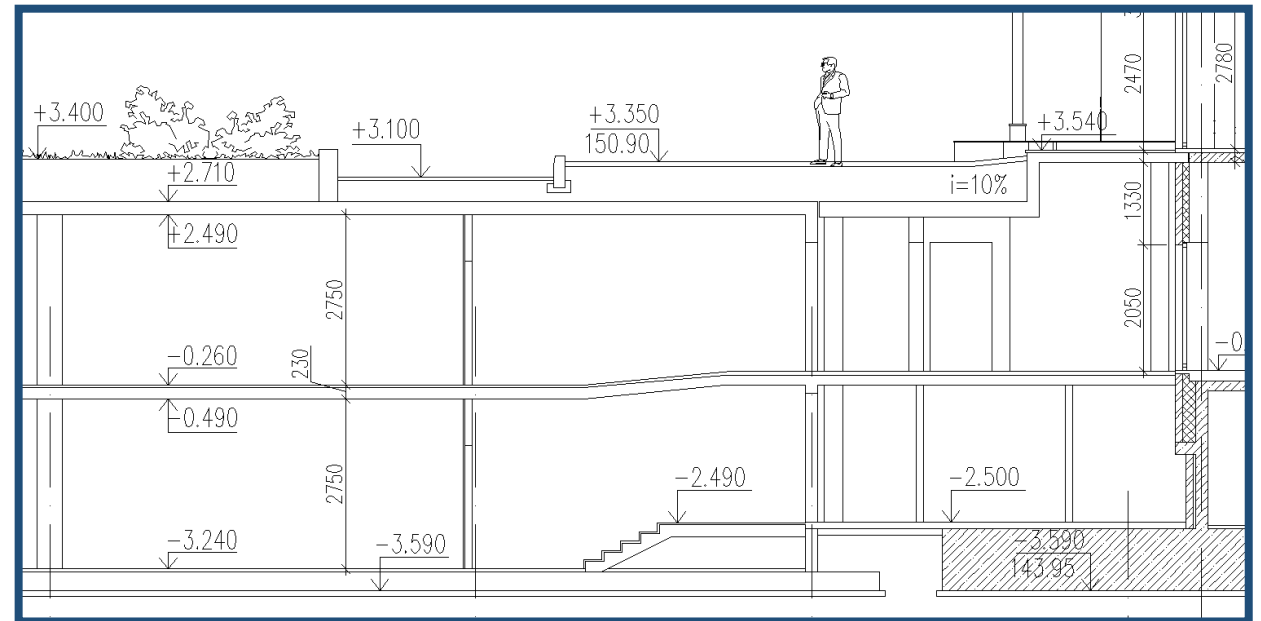
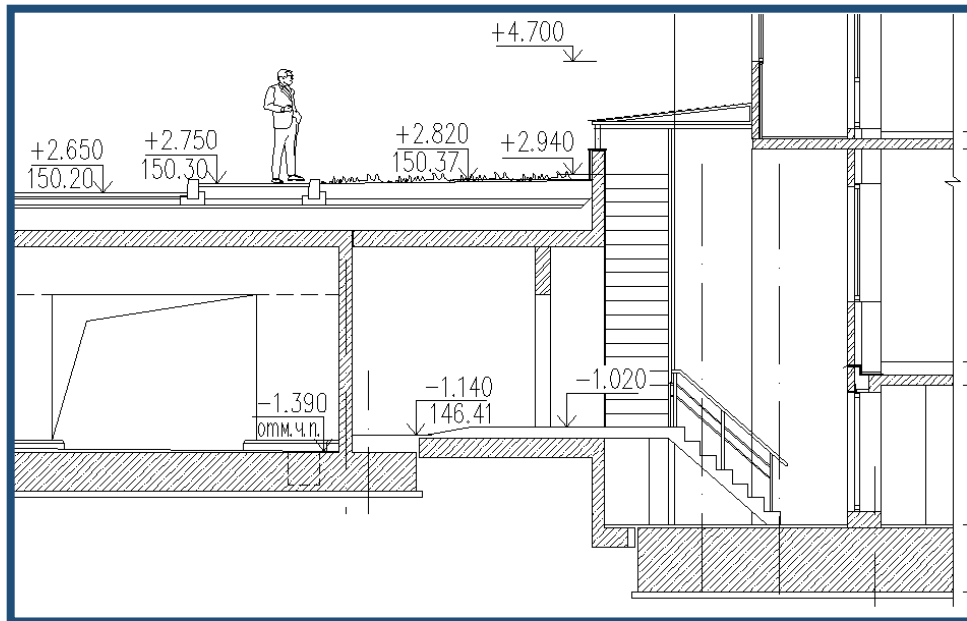
Пример 1. Многофункциональное здание в Москве

- Сталежелезобетонная фундаментная плита позволила уменьшить толщину с **600** до **400** мм при сетке колонн от 8×9 до $7,5 \times 9,7$ м и вертикальной нагрузке до ~ 800 тс, сократив расход железобетона на ~ 2000 м³ при площади плиты ~ 10000 м²



Пример 2. Подземная автостоянка в Подмосковье

- **Вариант 1** – Снижение общего расхода железобетона на **~3000 м³**
- **Вариант 2** – Сохранение общего расхода железобетона и стали при устройстве дополнительного этажа и увеличении м/м с **276 до 524 ед.**
- Для реализации заказчиком выбран **Вариант 2**



Пример 2. Фундаментная плита

- Сталежелезобетонная фундаментная плита позволила уменьшить толщину с **600** до **300** мм при сетке колонн от $5,1 \times 5,45$ до $6,9 \times 6,9$ м, сократив расход железобетона на **~2580** м³



Пример 2. Плиты перекрытия и покрытия

- Сталежелезобетонные плиты перекрытия (180 мм) и покрытия (240 мм) при сетке колонн от 5,1×5,45 до 6,9×6,9 м позволили добавить еще один этаж и увеличить м/м с **276** до **524** ед.



Другие успешные примеры реализации:

- Фундаментная плита 16-ти этажного жилого дома с нежилыми помещениями и подземной автостоянкой по адресу: Москва, ул. Наличная
- Фундаментная плита и плиты перекрытий торгово-выставочного центра с подземной автостоянкой по адресу: Тула, ул. Арсенальная
- Фундаментная плита и плиты перекрытий офисно-складского комплекса по адресу: Московская область, д. Николо-Хованское
- Фундаментная плита и плита покрытия подземной автостоянки многоэтажного жилого дома по адресу: Московская обл., г. Чехов
- Плиты перекрытий торгового центра по адресу: г. Калуга, ул. Болдина
- Общая выгода от применения данного КР – более **300** млн. руб.

Литература:

- Пекин, Д.А. Патент на изобретение №2457302. Плитная строительная конструкция / Д.А. Пекин, О.Г. Прилуцкий (РФ) – заявка № 2011108708, 2011.
- Пекин, Д.А. Плитная сталежелезобетонная конструкция // Научное издание / Д.А. Пекин. – М.: Изд. Ассоциации строительных вузов, 2010. – 440 с.
- Пекин, Д.А. Несущая способность опорных зон монолитных железобетонных безбалочных перекрытий, усиленных скрытыми металлическими капителями // Диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Д.А. Пекин. – М.: 2017. – 230 с.
- Трекин, Н.Н. Скрытые металлические капители безбалочных монолитных перекрытий / Н.Н. Трекин, Д.А. Пекин // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №7. С.17-20.

Литература:

- Трекин, Н.Н. Применение скрытых металлических капителей в безбалочных монолитных перекрытиях / Н.Н. Трекин, Д.А. Пекин // Современная наука и инновации. – 2016. – №2. С.110-115.
- Трекин, Н.Н. Скрытые металлические капители с горизонтальной листовой арматурой / Н.Н. Трекин, Д.А. Пекин // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – №6. С.24-29.
- Пекин, Д.А. Влияние изгиба на механизм продавливания опорной зоны железобетонной плиты / Д.А. Пекин // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – №10. С.20-28.

ИСА | 08.03.01 | ПГС | 6-й семестр

Железобетонные и каменные конструкции

Практическое занятие №14



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

www: mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/ZhBK/

e-mail: gbk@mgsu.ru; PekinDA@mgsu.ru

тел.: +7 495 287 49 14 доб. 3036, 3084

Пекин Дмитрий Анатольевич, доцент, к.т.н.