

## ***Краткий конспект лекций по дисциплине***

### ***«САПР конструкций зданий и сооружений»***

#### ***Лекция 1. Общие сведения***

Современные методы расчета и проектирования строительных конструкций немыслимы без применения компьютерных технологий. Это же можно сказать и о научных исследованиях в области строительной механики и механики твердого тела. Векания времени отвечает и ряд дисциплин, введенных во многих строительных вузах России: «компьютерное моделирование и автоматизированные расчеты на прочность», «Основы САПР», «Компьютерные технологии в строительстве», «Компьютерные методы в динамическом расчете зданий и сооружений».

Становится нормой выполнение диссертационных работ по следующей схеме: проведение ряда компьютерных экспериментов; выявление важных особенностей работы конструкций по исследуемой проблеме; проведение натурного эксперимента, нацеленного на исследования этих особенностей; проведение обширных компьютерных исследований с использованием данных натурного эксперимента; обобщение полученной информации и составление рекомендаций.

При проектировании уникальных объектов, как правило, проводятся обширные компьютерные исследования, включающие моделирование процессов жизненного цикла: процесс возведения, процессы нагружения, особенно при динамических воздействиях; процессы изменения НДС во времени и др. Во всех этих случаях используется тот или иной программный комплекс. И здесь инженер–проектировщик, научный исследователь, преподаватель, студент для успешного применения избранного программного комплекса, безусловно, должен быть хотя бы в общих чертах знаком с теоретическими основами этой разработки. ПК ЛИРА–САПР состоит из нескольких взаимосвязанных информационных систем.

Организация взаимосвязей между этими системами, представленная на рисунке, обеспечивает технологичность работы с комплексом так, что комплекс как бы сам ведет пользователя – от создания расчетной модели к конструированию элементов. Основной графической системой является система ВИЗОР–САПР, единая графическая среда, которая располагает обширным набором возможностей и функций для формирования адекватных конечно–элементных

и супер–элементных моделей рассчитываемых объектов. ВИЗОР–САПР позволяет произвести подробное визуальное обследование созданных моделей и их корректировку, описать физико–механические свойства материалов. В этой же среде задаются связи, разнообразные нагрузки, характеристики различных динамических воздействий, а также назначаются взаимосвязи между различными загружениями с целью определения их наиболее опасных сочетаний.

Для расчета созданной модели может быть выбран соответствующий расчетный процессор. В состав ПК ЛИРА–САПР входит несколько РАСЧЕТНЫХ ПРОЦЕССОРОВ. Все они предназначены для определения напряженно–деформированного состояния (НДС) конструкции на основе метода конечных элементов в перемещениях. Расчетные процессоры реализуют современные усовершенствованные методы решения систем уравнений, обладающие высоким быстродействием и позволяющие решать системы с очень большим числом неизвестных.

ЛИНЕЙНЫЙ ПРОЦЕССОР предназначен для решения задач, описывающих работу материала конструкций в линейно–упругой постановке.

НЕЛИНЕЙНЫЙ ПРОЦЕССОР позволяет решать задачи, связанные с физической нелинейностью материала в рамках нелинейной теории упругости и в упруго–пластической постановке (бетон, железобетон, сталебетон, металл, грунт). Решение таких задач производится шаговым и шагово–итерационным методом. НЕЛИНЕЙНЫЙ процессор позволяет решать задачи, связанные с геометрической нелинейностью (ванты, большепролетные покрытия, мембраны), а также и с конструктивной нелинейностью (контактные задачи, односторонние связи, трение). В состав библиотеки нелинейных конечных элементов входят также элементы, позволяющие производить одновременный учет физической и геометрической нелинейности. При расчетах нелинейных задач шаговым методом производится автоматический выбор шага нагружения с учетом его истории. Расчетные процессоры содержат обширную БИБЛИОТЕКУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, которая позволяет создавать адекватные расчетные модели практически без ограничений на описание реальных свойств рассчитываемых объектов. При этом возможны задание линейных и нелинейных законов деформирования материалов, учет геометрической нелинейности с нахождением формы изначально изменяемых систем, а также учет конструктивной нелинейности.

Допускается наличие абсолютно жестких вставок как в стержневых, так и в плоскостных конечных элементах. Реализованы законы деформирования различных классов железобетона. Вспомогательные расчетные процессоры позво-

ляют проводить дальнейшие исследования расчетной модели по результатам основного расчета. Система РСУ позволяет произвести выбор наиболее опасных сочетаний усилий по критерию экстремальных напряжений и в соответствии с нормативными требованиями многих стран.

Система РСН позволяет определить перемещения, усилия и напряжения от стандартных и произвольных линейных комбинаций загрузжений. Под стандартными линейными комбинациями подразумеваются комбинации (сочетания), которые установлены нормативными документами.

Система УСТОЙЧИВОСТЬ дает возможность произвести проверку общей устойчивости рассчитываемого сооружения с определением коэффициента запаса и формы потери устойчивости.

Система ЛИТЕРА реализует вычисление главных и эквивалентных напряжений по различным теориям прочности.

Система ФРАГМЕНТ позволяет определить силы воздействия одного фрагмента рассчитываемого сооружения на другой как нагрузку. В частности, могут быть определены нагрузки, передаваемые наземной частью расчетной схемы на фундаменты.

## ***Лекция 2. Признак схемы, типы КЭ***

Признак схемы метода конечных элементов назначается в соответствии с теми степенями свободы, которые задействованы при моделировании тех или иных типов конструкций. В ПК ЛИРА–САПР реализованы следующие признаки схемы:

- Признак 1 – схемы, располагаемые в плоскости  $XOZ$ ; каждый узел имеет 2 степени свободы – линейные перемещения вдоль глобальных осей  $X$ ,  $Z$  или локальных осей  $X2$ ,  $Z2$ . В этом признаке схемы рассчитываются плоские фермы и балки–стенки.

- Признак 2 – схемы, располагаемые в плоскости  $XOZ$ ; каждый узел имеет 3 степени свободы – линейные перемещения вдоль глобальных осей  $X$ ,  $Z$  или локальных осей  $X2$ ,  $Z2$ , а также поворот вокруг глобальной оси  $Y$  или локальной оси  $Y2$ . В этом признаке схемы рассчитываются плоские рамы и допускается включение элементов ферм и балок–стенок.

- Признак 3 – схемы, располагаемые в плоскости  $XOY$ ; каждый узел имеет 3 степени свободы – линейное перемещение вдоль глобальной оси  $Z$  или локальной оси  $Z2$ , а также повороты вокруг глобальных осей  $X$ ,  $Y$  или локальных

осей  $X_2$ ,  $Y_2$ . В этом признаке рассчитываются балочные ростверки и плиты, допускается учет упругого основания.

- Признак 4 – пространственные схемы, каждый узел которых имеет 3 степени свободы – линейные перемещения вдоль глобальных осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  или локальных осей  $X_2$ ,  $Y_2$ ,  $Z_2$ . В этом признаке рассчитываются пространственные фермы и объемные тела.

- Признак 5 – пространственные схемы общего вида с 6 степенями свободы в узле. В этом признаке схемы рассчитываются конструкции общего вида – пространственные каркасы, оболочки и допускается включение объемных тел, учет упругого основания и т.п.

- Признак 6 – пространственные схемы общего вида с 7 степенями свободы в узле. В этом признаке схемы рассчитываются конструкции из тонкостенных стержней с учетом деформации сечений.

- Признак 15 – плоские и пространственные схемы для моделирования стационарных и динамических процессов теплообмена. В этом признаке узлы расчетной схемы имеют одну степень свободы – температуру  $t$ .

### ***Библиотека конечных элементов для линейных задач***

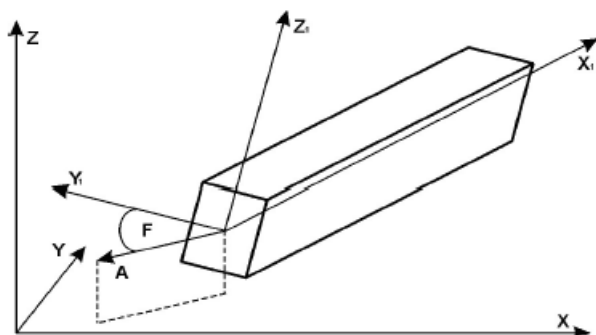
Библиотека конечных элементов (БКЭ) содержит элементы, моделирующие работу различных типов конструкций: элементы стержней, четырехугольные и треугольные элементы плоской задачи, плиты, оболочки, элементы пространственной задачи – тетраэдр, параллелепипед, трехгранная призма. Кроме того, в БКЭ имеются различные специальные элементы, моделирующие связь конечной жесткости, упругую податливость между узлами, элементы, задаваемые численной матрицей жесткости.

Все конечные элементы, включенные в БКЭ, теоретически обоснованы, для них получены оценки погрешности по перемещениям и по напряжениям  $\epsilon$  и  $\tau$ . Теоретически обоснована также возможность задания криволинейных стержней прямолинейными элементами и произвольных оболочек треугольными и прямоугольными (для цилиндрических оболочек) элементами плоской оболочки. Погрешность по напряжениям и перемещениям оценивается здесь величиной, пропорциональной  $h$ .

В БКЭ включены только такие элементы, для которых математически доказана сходимость, то есть получены  $\epsilon$  и  $\tau$ . Значения этих параметров позволяют не только обрести уверенность в результатах решения той или иной задачи, но и оценить степень приближения полученного решения к точному.

### **Универсальный стержень (КЭ 10)**

Универсальный стержень. Стержень имеет местную систему координат  $X_1, Y_1, Z_1$ , относительно которой задается местная нагрузка, а также определяются усилия.



Предусматриваются различные возможности прикрепления стержня к узлам схемы:

- при помощи абсолютно жестких вставок вдоль местных осей;
- при помощи снятия связи по любому направлению (снятие связи, соответствующей линейной степени свободы, обеспечивает проскальзывание; снятие угловой связи – свободный поворот, то есть цилиндрический шарнир).

Допускается наличие упругого основания. Может учитываться сдвиг.

**Универсальные конечные элементы балок–стенок, тонких плит и оболочек (КЭ 11, 12, 21–24, 27, 30, 41, 42, 44)**

Предназначены для решения плоской задачи теории упругости, а также прочностного расчета тонких, жестких пластин и тонких пологих оболочек. Материал однородный по толщине элемента, линейно упругий, изотропный.

Тонкими считаются пластины, у которых  $5 \leq L_{\min}/\delta$ , где  $L_{\min}$  – наименьший из размеров в плане;  $\delta$  – толщина.

Жесткими считаются пластины, у которых наибольший прогиб не превышает  $\delta/5$ . Оболочки считаются тонкими, если  $R/\delta > 20$ , где  $R$  – минимальный радиус кривизны срединной поверхности.

Оболочки считаются пологими, если  $L_{\min}/f_0 \geq 5$ , где  $f_0$  – стрела подъема свода оболочки. При решении плоской задачи теории упругости, МКЭ исходит

из общепринятых гипотез об отсутствии деформаций ( $\varepsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yz} = 0$  для случаев плоской деформации) или напряжений ( $\sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz} = 0$  для случая плоского напряженного состояния).

### **Универсальные конечные элементы пространственной задачи теории упругости (КЭ 31–34, 36)**

Предназначены для определения напряженно–деформированного состояния континуальных объектов и массивных пространственных конструкций из однородного изотропного линейно–упругого материала в постановке трехмерной задачи теории упругости

### **Специальные конечные элементы (КЭ 51, 53, 54, 55, 56)**

Предназначены для ограничения линейных и угловых перемещений по направлениям осей координат, для введения связей конечной жесткости по направлениям осей координат, а также для учета податливости материала между смежными узлами (например, податливость ростверка или металлических прокладок между элементами).

### **КЭ, моделирующие связи конечной жесткости (типы КЭ–51, КЭ–56)**

Данные КЭ применяются для введения связи конечной жесткости по направлению одной из осей (КЭ–51) или относительно всех осей (КЭ–56) глобальной или локальной системы координат узла. Так, например, для степени свободы  $Z$  конечный элемент КЭ–51 позволяет смоделировать работу пружины или упругого основания.

### **Законтурный двухузловой КЭ упругого основания (тип КЭ–53)**

Данный КЭ применяется для моделирования отпора полосы грунта за пределами плиты. Полоса грунта при этом располагается перпендикулярно контуру плиты. Учет отпора за контуром происходит за счет работы грунта на сдвиг. В каждом из узлов имеется по одной степени свободы – перемещение вдоль глобальной оси  $Z$ .

### **Законтурный одноузловой КЭ упругого основания (тип КЭ–54)**

Данный КЭ применяется для моделирования отпора угловой зоны грунта, примыкающего к углу плиты. Учет отпора в зоне, примыкающей к углу, происходит за счет работы грунта на сдвиг. В каждом из узлов имеется по одной степени свободы – перемещение вдоль глобальной оси  $Z$ .

### **КЭ, моделирующий упругую связь между узлами (тип КЭ–55)**

Данный КЭ предназначен для учета податливости связи между узлами соединения конструктивных элементов – колонны с диафрагмой, ригеля с колонной и т.п. Элемент описывается двумя узлами, в каждом из которых имеется по шесть степеней свободы, определенных относительно осей глобальной системы координат. Таким образом, элемент позволяет смоделировать как линейную, так и угловую податливость связи относительно осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  общей системы координат. Узлы, между которыми моделируется податливость, могут иметь одинаковые координаты. Конечный элемент приспособливается к признаку схемы.

## ***Лекция 3. Решение системы канонических уравнений***

После того как заданная конструкция представлена в виде конечно–элементной схемы, задача об определении перемещений узлов сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида

$$AX=B$$

где:  $A$  – симметричная положительно определенная матрица размером  $N * N$ ;

$B$  – матрица правых частей (загружений) размером  $N * k$  ( $k$ =количество загружений);

$X$  — искомая матрица перемещений размером  $k * N$ .

Поскольку в большинстве случаев матрица  $A$  является разреженной, то для уменьшения требуемой оперативной памяти, внешней памяти и времени счета предварительно производится упорядочение неизвестных системы (3.1) с целью минимизации профиля матрицы. Реализованы следующие методы упо-

рядочения: обратный алгоритм Катхилла–Макки, алгоритм «фактор деревьев», алгоритм минимальной степени. Пользователю предоставлена возможность выбора метода упорядочения. По умолчанию используется обратный алгоритм Катхилла–Макки, так как у этого метода минимальные запросы к оперативной памяти. Конкретные рекомендации для выбора метода упорядочения не могут быть даны, так как эффективность того или иного алгоритма существенно зависит от структуры конкретной матрицы  $A$ . Для решения системы предварительно производится треугольное разложение матрицы  $A$ .

Алгоритм решения разреженных матриц, реализованный в ПК ЛИРА, основывается на алгоритме Даффа и представляет собой метод Гаусса с такой нумерацией неизвестных, которая позволяет минимизировать количество вычислений, то есть, уменьшить количество элементов матрицы, заполняемых в процессе исключения. Если в процессе треугольного разложения матрицы  $A$  выясняется, что  $A$  вырождена, то производится автоматическое наложение связей, которые обеспечивают геометрическую неизменяемость. При этом пользователю предоставляется информация о номерах узлов и номерах степеней свободы, по которым произведено наложение связей. В этом случае рекомендуется внимательно проанализировать расчетную схему и выяснить происхождение геометрической изменяемости конструкции.

Дополнительным сервисным средством является контроль решения системы. При появлении сообщения о большой величине ошибки решения, которое, как правило, является следствием плохой обусловленности матрицы  $A$ , следует внимательно проанализировать величины перемещений узлов и убедиться в том, что полученное решение является приемлемым с инженерной точки зрения.

#### *Лекция 4. Суперэлементное моделирование*



В ПК ЛИРА–САПР реализована возможность работы с суперэлементной расчетной моделью. На количество неизвестных не налагается никаких ограничений. Выбор разбивки схемы на суперэлементы или только на конечные элементы остается за пользователем. Использование суперэлементов целесообразно в следующих основных случаях:

- предполагаемая размерность задачи при конечно–элементной разбивке превосходит возможности компьютера (память, быстродействие, плохая обусловленность матрицы);
- в задаче содержится большое количество одинаковых конструктивных элементов (панели, объемные блоки и т.п.);
- в задаче присутствуют конструктивные элементы, которые уже были сформированы для ранее рассчитанных объектов;
- в задаче имеет место локальное сосредоточение нелинейно деформируемых элементов.

Часто встречается ситуация, когда задача содержит несколько разнородных объектов, которые различаются по материалу, по набору конечных элементов, по геометрии и т.п. Это может быть, например, силосный комплекс, связанный галереями и опирающийся на плиту на упругом основании.

Представление такого объекта в виде конечно–элементной схемы приводит к очень большой размерности задачи, а расчленение его на суперэлементы может существенно ее уменьшить. В этом случае расчетная модель может состоять из трех типов суперэлементов: первый – плита на упругом основании, второй – силосная башня и третий – конструкция галереи.

Еще пример. При расчете панельных домов мелкая разбивка каждой панели приводит к большой размерности задачи, а применение суперэлементов позволяет существенно снизить влияние размерности подобных задач на скорость их выполнения. При этом еще следует учесть, что количество типов суперэлементов в подобных задачах, как правило, невелико.

Существенного сокращения времени счета можно достичь при решении нелинейных задач, в которых присутствуют крупные линейно деформируемые включения. Например, сложные здания (панельные или каркасные дома, силосные башни, резервуары), опирающиеся на грунтовое основание. Для таких зданий учет нелинейной работы основания имеет существенное значение. В этом случае надземное строение необходимо объявить суперэлементом, матрица жесткости которого на каждом шаге нелинейного расчета остается неизменной. Использование суперэлементов позволяет не только существенно сокращать время решения задачи, но и во многих случаях преодолевать барьер плохой обусловленности матрицы канонических уравнений МКЭ.

Справедливости ради следует все же заметить, что суперэлементная модель широко применима лишь для решения линейных задач. Задачи устойчивости, а также задачи определения частот и форм собственных колебаний в этом случае выполняются только для основной схемы.

Применение суперэлементов требует определенного навыка, поэтому рекомендуется осваивать работу с ними только после подробного ознакомления со всеми другими возможностями ПК ЛИРА–САПР.

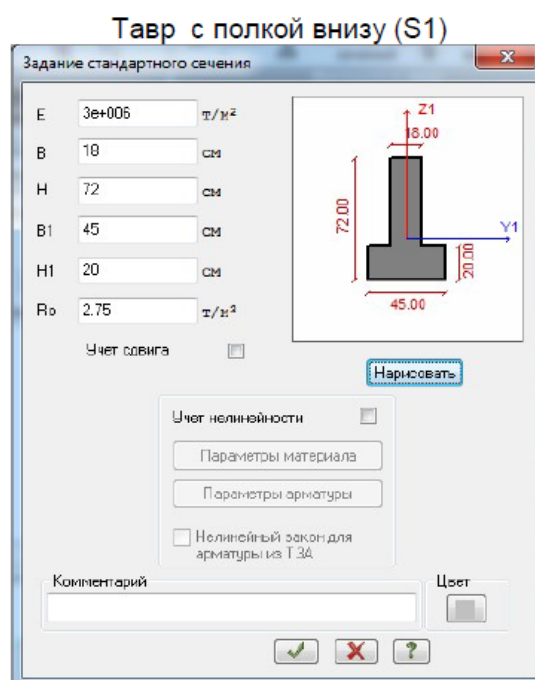
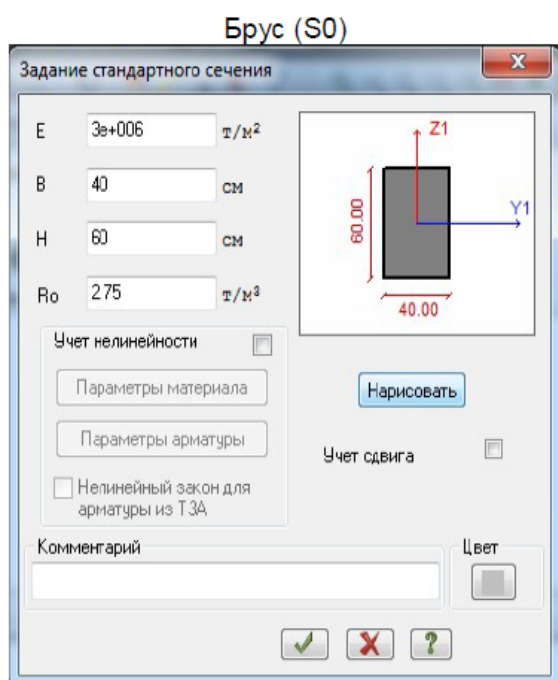
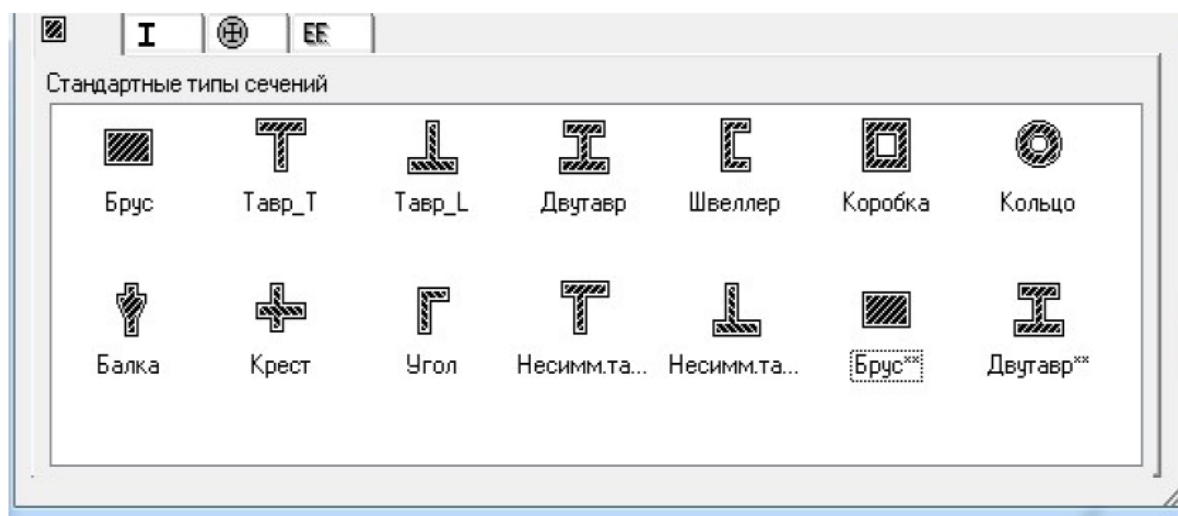
При использовании суперэлементной модели конструкции основная расчетная схема расчленяется на несколько расчетных схем, которые называются схемами суперэлементов. Узлы стыковки суперэлементов с основной схемой называются суперузлами. Алгоритм решения задачи с применением метода суперэлементов (МСЭ) основывается на расчленении исследуемого объекта на  $S$  подсхем (суперэлементов), которые объединяются в общую основную схему при помощи суперузлов.

В ПК ЛИРА–САПР реализован уникальный алгоритм визуализации развернутых суперэлементов. Как на стадии формирования расчетной схемы, так и на стадии анализа результатов пользователю предоставляется возможность визуализировать конечно–элементную модель без учета расчленения ее на супер-

элементы.

## Лекция 5. Используемые типы сечений

### Стандартные сечения



Тавр с полкой вверх (S2)

Задание стандартного сечения

E   $\text{т/м}^2$

B  см

H  см

B1  см

H1  см

Ro   $\text{т/м}^2$

Учет сдвига ☐

Нарисовать

Учет нелинейности ☐

Параметры материала

Параметры арматуры

☐ Нелинейный закон для арматуры из Т.3А

Комментарий

Цвет

✓ ✗ ?

Двутавр (S3)

Задание стандартного сечения

E   $\text{т/м}^2$

B  см

H  см

B1  см

H1  см

B2  см

H2  см

Ro   $\text{т/м}^2$

Учет сдвига ☐

Нарисовать

Учет нелинейности ☐

Параметры материала

Параметры арматуры

☐ Нелинейный закон для арматуры из Т.3А

Комментарий

Цвет

✓ ✗ ?

Швеллер (S4)

Задание стандартного сечения

E   $\text{т/м}^2$

B  см

H  см

B1  см

H1  см

Ro   $\text{т/м}^2$

Учет сдвига ☐

Нарисовать

Учет нелинейности ☐

Параметры материала

Параметры арматуры

☐ Нелинейный закон для арматуры из Т.3А

Комментарий

Цвет

✓ ✗ ?

Коробка (S5)

Задание стандартного сечения

E   $\text{т/м}^2$

B  см

H  см

B1  см

H1  см

Ro   $\text{т/м}^2$

Учет сдвига ☐

Нарисовать

Учет нелинейности ☐

Параметры материала

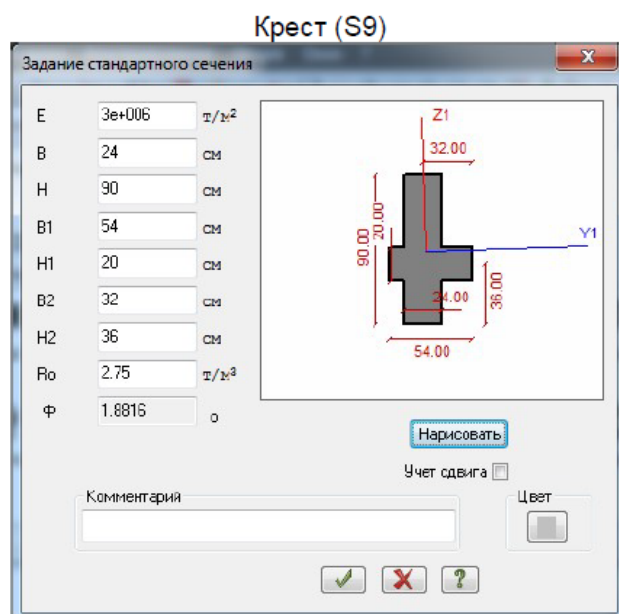
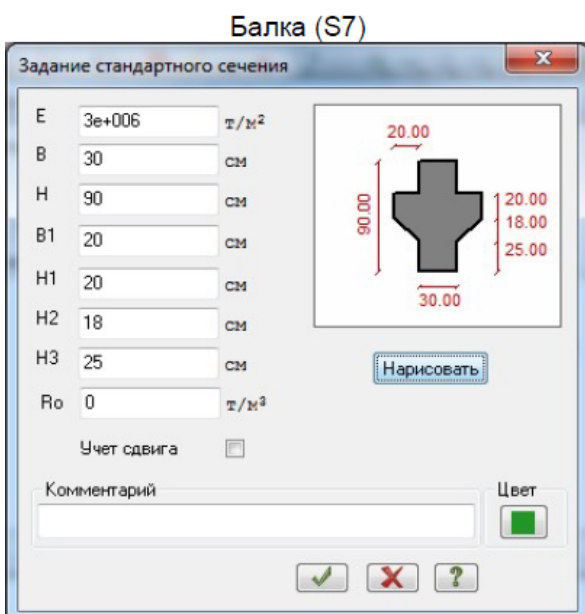
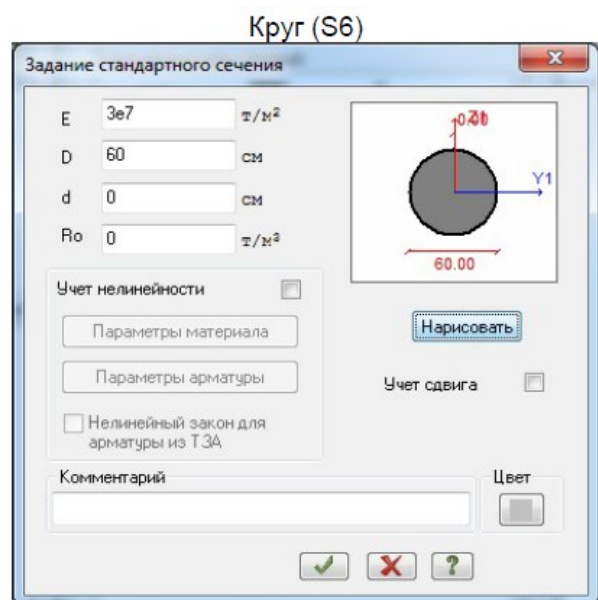
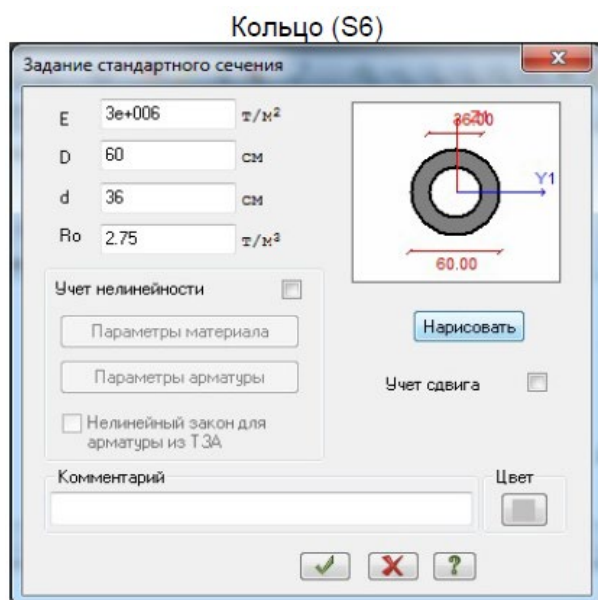
Параметры арматуры

☐ Нелинейный закон для арматуры из Т.3А

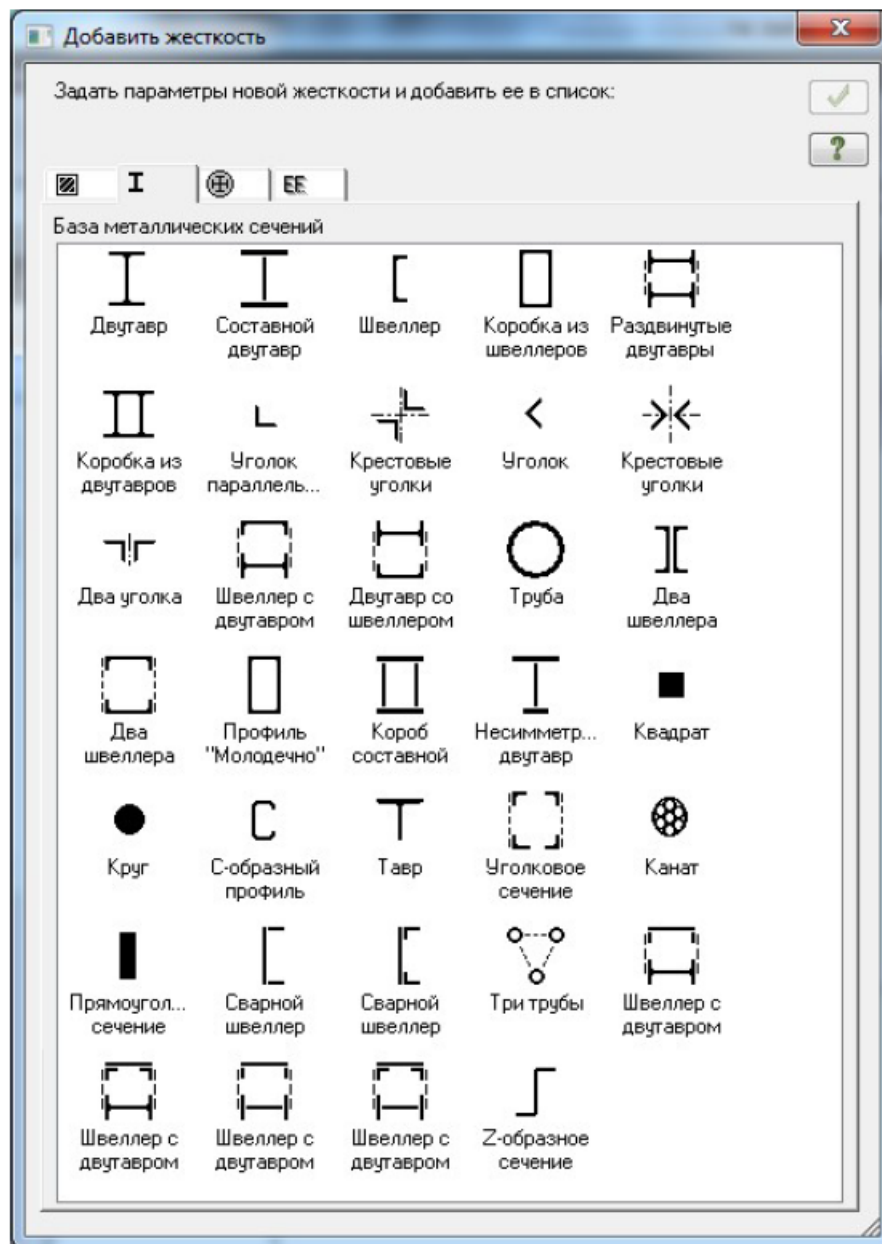
Комментарий

Цвет

✓ ✗ ?



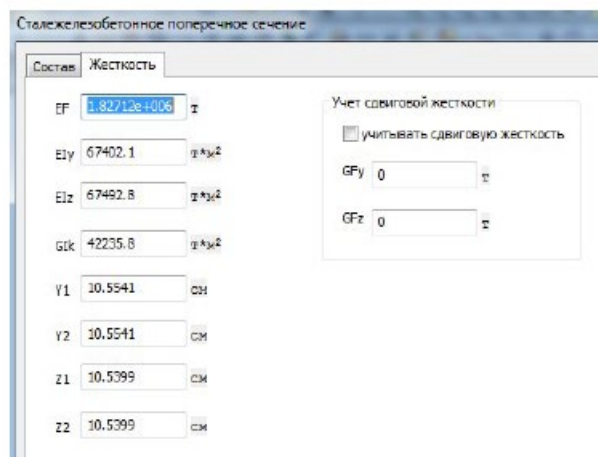
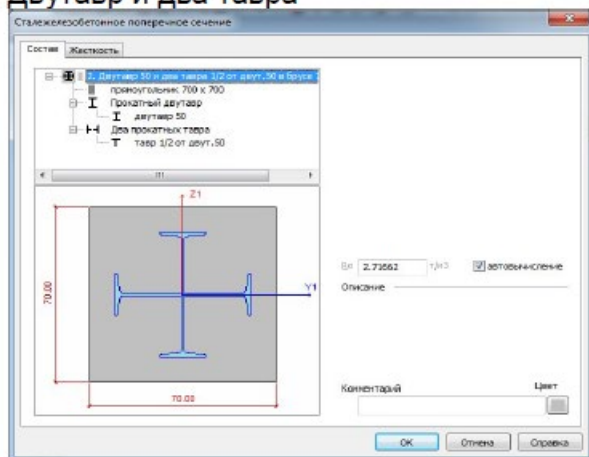
## Стальные сечения



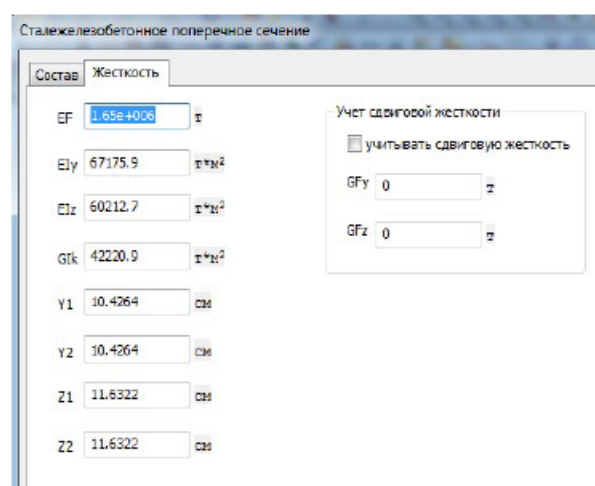
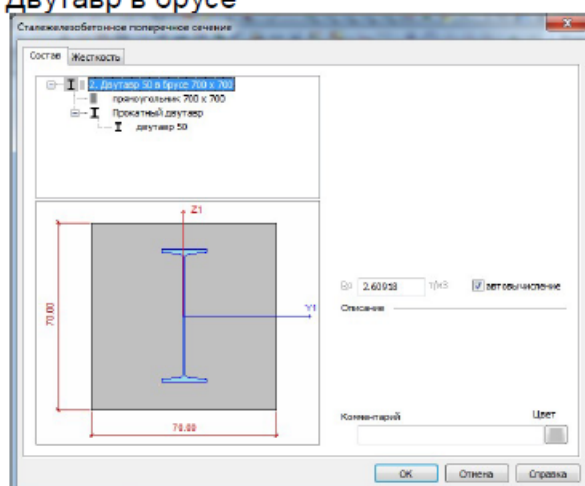
## Сталежелезобетонные сечения



## 1. Двутавр и два тавра

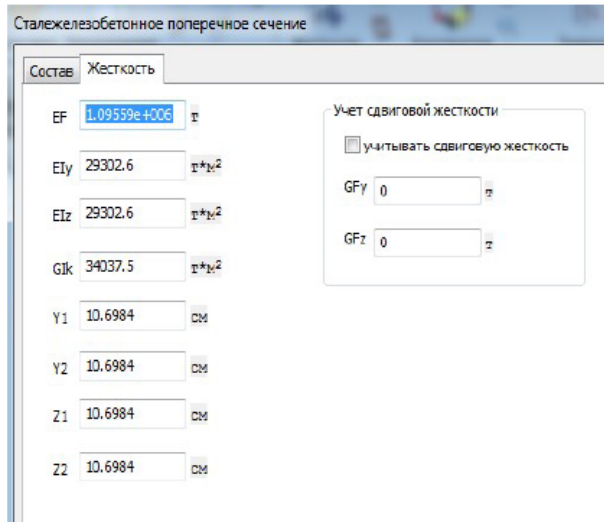
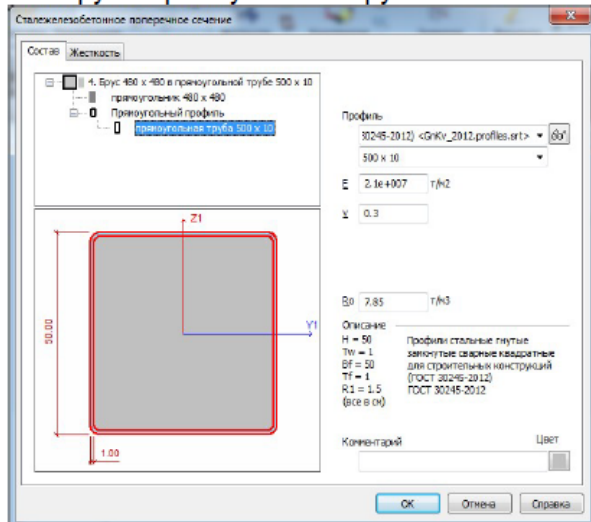


## 2. Двутавр в бресе

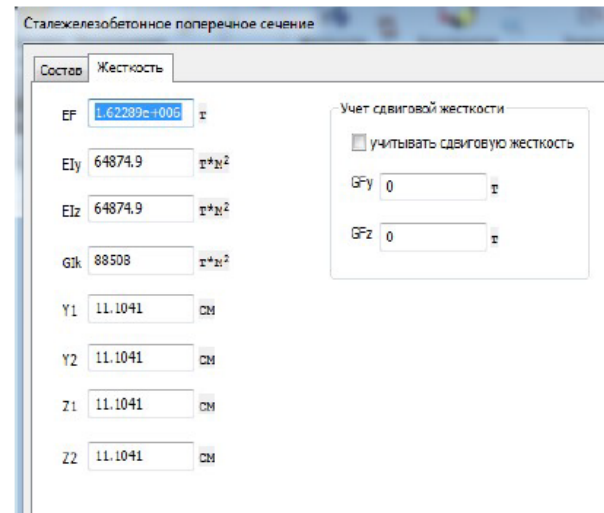
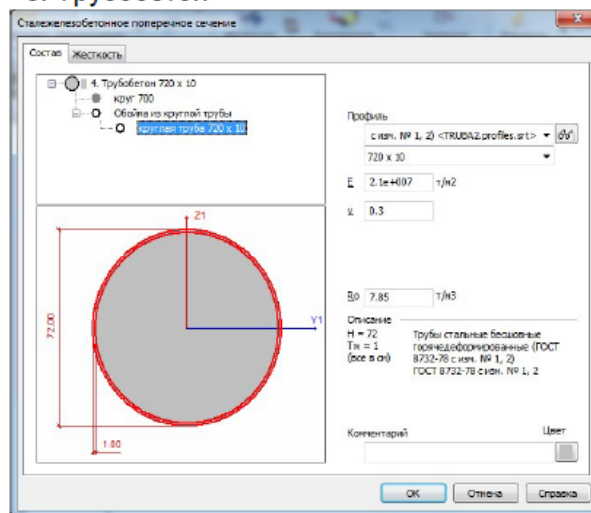




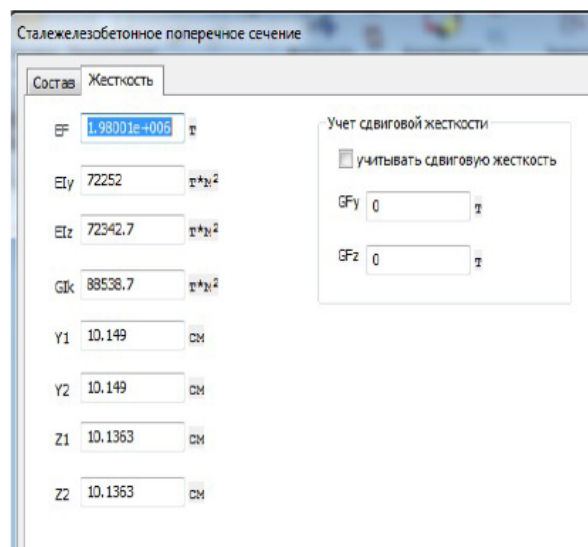
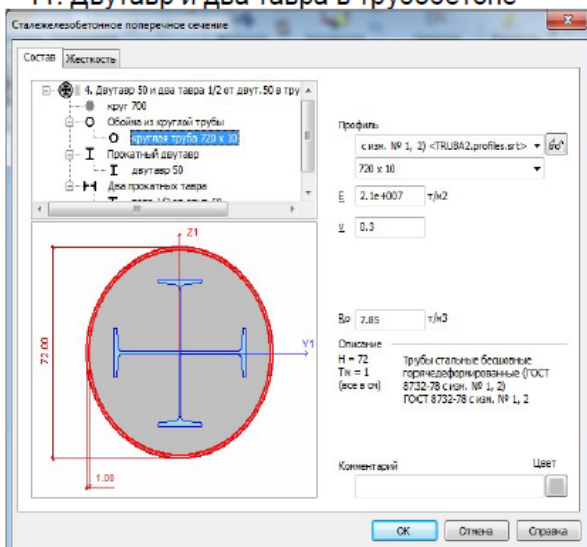
## 7. Брус в прямоугольной трубе



## 8. Трубобетон

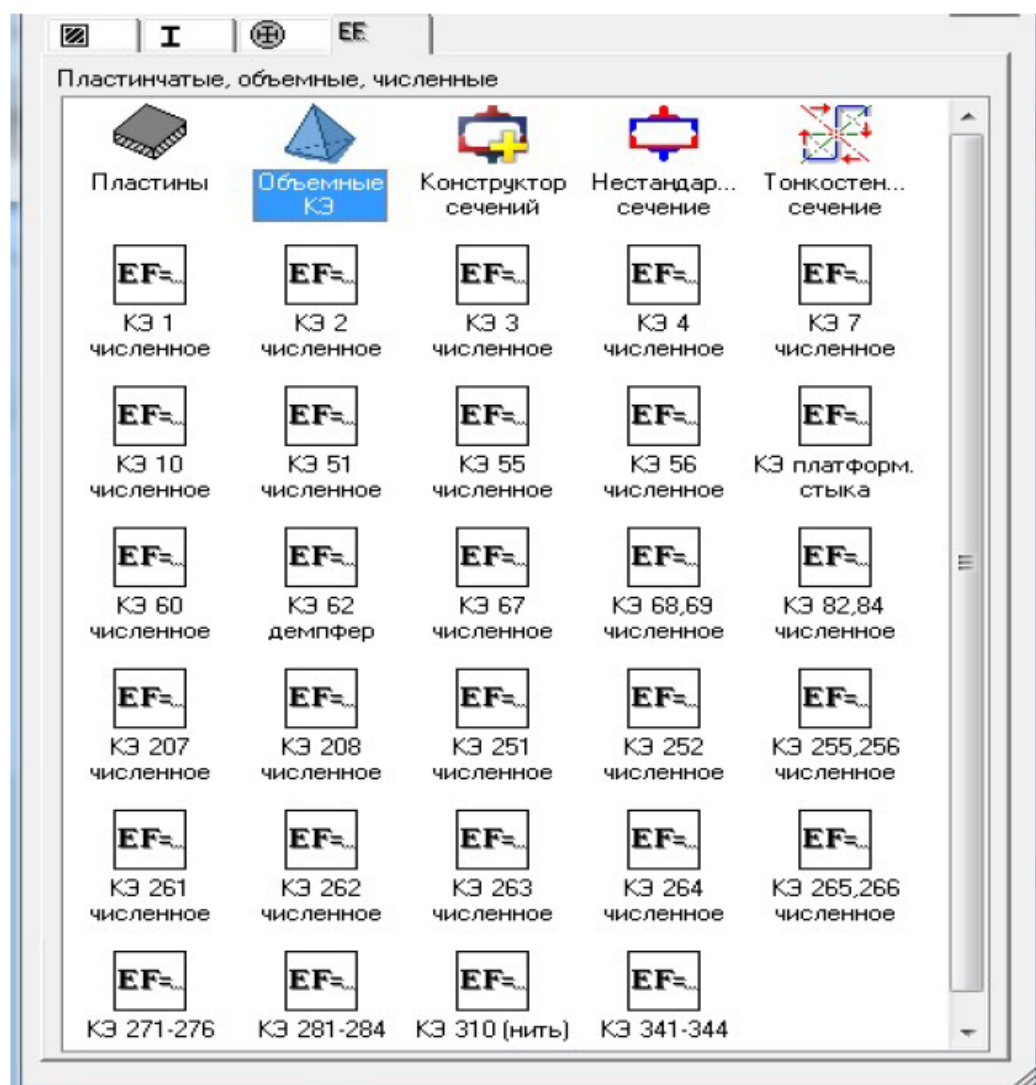


## 11. Двутавр и два тавра в трубобете





## *Численные жесткости, пластины, объемные тела.*



Численные характеристики для линейных КЭ стержней:

$EF$  – продольная жесткость;  $EI_y$  – изгибная жесткость относительно оси  $Y1$ ;

$EI_z$  – то же относительно оси  $Z1$ ;  $GIk$  – жесткость на кручение;

$GF_y$  – сдвиговая жесткость вдоль оси  $Y1$ ;  $GF_z$  – то же вдоль оси  $Z1$ ;

$EI_w$  – секториальная жесткость.

## ***Конструктор сечений***

Конструктор сечений позволяет:

- формировать геометрию произвольных многоматериальных массивных, тонкостенных и смешанных сечений стержней сложной и простой, нестандартной и стандартной формы;
- задавать физико–механические характеристики материалов, входящих в сечение, с целью определения напряжений, нелинейно зависящих от деформаций;
- вычислять жесткостные характеристики целостного сечения и его составных частей, а также выполнять экспорт этих характеристик в ВИЗОР;
- определять НДС целостного сечения при заданных или импортированных из ВИЗОРа усилиях;
- задавать законы нелинейного деформирования бетонов различных марок и арматурных сталей в соответствии с СП 63.13330.2012, СНиП 2.03.01–84\* и Еврокод 2;
- задавать законы нелинейного деформирования полосового и профильного проката;
- задавать законы нелинейного деформирования в табличном виде;
- отображать НДС в виде мозаик, изополей и эпюр напряжений;
- выполнять анимацию напряжений при пошаговом наращивании заданных усилий.

Стандартные массивные сечения задаются при помощи прототипов, хранящихся в соответствующей библиотеке – прямоугольник, тавр симметричный и несимметричный, двутавр симметричный и несимметричный, швеллер, кольцо, круг, коробка, крест симметричный и несимметричный, уголок симметричный и несимметричный. Стандартные профили стального проката задаются при помощи выбора непосредственно из обширной библиотеки соответствующих сортаментов. Сечения произвольной формы могут быть созданы с использованием широкого спектра мощных графических инструментов, предназначенных для

геометрических построений – построение по касательной, кривые Безье, сплайны, дуги эллипса и окружности и многое другое.

Комбинация этих средств позволяет формировать сложные сечения как набор контуров различного очертания, тонких полос, а также точечных и арматурных включений. Допускается формирование отверстий различной формы. При формировании сечений произвольной формы используются булевы операции.

Для задания материала сечения и/или его составных частей используется обширная библиотека различных материалов. Библиотека материалов может быть легко дополнена новыми материалами. Допускается также корректировка данных о содержащихся в библиотеке материалах.

### ***Лекция 6. Расчёты на заданное армирование***

Информация об армировании сечений стержневых и пластинчатых элементов железобетонных конструкций может теперь быть включена состав исходных данных как тип заданного армирования – ТЗА.

Каждый ТЗА описывает диаметры и расстановку арматурных стержней в прямоугольных и кольцевых сечениях стержней, а также в сечениях пластин. Назначение ТЗА выполняется аналогично заданию типов жесткости.

Реализованная возможность позволяет выполнять расчеты как линейных, так и нелинейных задач. Разработаны и реализованы разнообразные параметрические прототипы ТЗА, способы их назначения сечениям и возможности анализа полученных результатов. Параметрические прототипы позволяют применять их к различным размерам сечений элементов. Допускается также создание пользовательских прототипов ТЗА и объединение их в составные типы.

Для регулярно расположенных арматурных стержней могут быть использованы комбинированные прототипы. Для нерегулярной схемы расстановки арматурных стержней предоставляется две возможности:

- при помощи составного ТЗА в параметрическом виде;

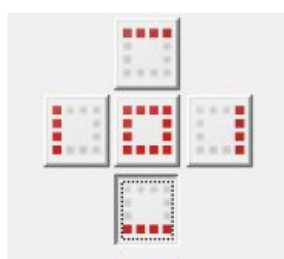
- при помощи так называемого точного прототипа, в котором расстановка стержней осуществляется по реальным размерам сечения.

Реализована технология преобразования уже подобранной арматуры из состава результатов расчета в состав исходных данных для последующего перерасчета конструкции. При этом допускается расчет как в линейной, так и в нелинейной постановке. Реализована возможность задания нелинейных законов деформирования материала для арматурных стержней, входящих в ТЗА. Данная информация имеет приоритет по отношению к информации, заданной при описании жесткостных характеристик сечения.

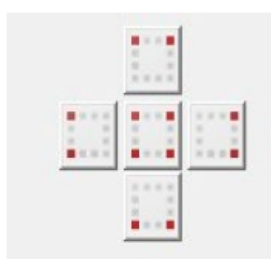
### **Стержень прямоугольного сечения**

Для стержней прямоугольного сечения реализованы несколько прототипов заданного армирования: параметрический, комбинированный, точный и поперечного армирования. ТЗА, созданные на базе этих прототипов, могут быть объединены в составной ТЗА. Параметрический прототип для продольной арматуры Реализованы следующие прототипы расстановки продольных стержней:

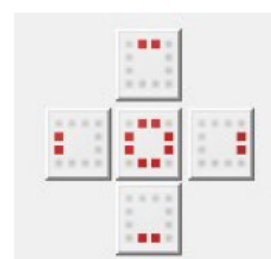
- все (угловые и промежуточные) стержни у нижней, верхней, боковых граней;
- только угловые стержни у нижней, верхней, боковых граней;
- только промежуточные стержни у нижней, верхней и боковых граней.



а)



б)



в)

У параметрических прототипов все стержни должны иметь одинаковый диаметр, и количество стержней должно быть одинаковым у каждой грани. При задании стержней у всех граней их количество должно быть кратно четырем.

Продольные арматурные стержни можно задать, выбрав их диаметр или указав

их площадь. Площадь может быть задана как отдельного стержня, так и суммарная на все сечение. Для диаметра можно задать как защитный слой, так и расстояние до центра тяжести. Для площади задается только расстояние до центра тяжести.

Имя ТЗА автоматически генерируется на основании выбранного прототипа, заданного диаметра и защитных слоев. Каждый прототип имеет свою индексацию, аналогичную той, которая используется при подборе арматуры (например, для угловых стержней – AU). Имя ТЗА автоматически дополняется записью вида  $kdD(kxAs)_{c(a)}_{c_s(a_s)}$ , где  $k$  – количество стержней,  $D$  – диаметр,  $As$  – площадь,  $c$  – защитный слой,  $a$  – привязка к центру тяжести. Если информация будет изменена, то имя регенерируется автоматически.

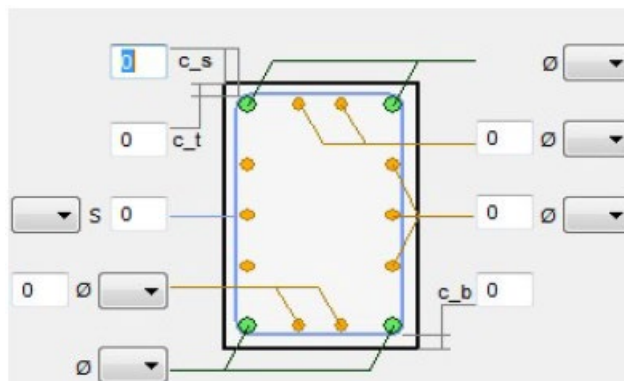
Пользовательское наименование ТЗА (комментарий) будет размещено в скобках перед или после имени ТЗА.

При расчете линейных задач информация о физической нелинейности НЕ задается. Для физически нелинейных задач информация о законах деформирования материала задается в типе жесткости. Если же группа стержней, заданная в ТЗА, подчиняется другому закону деформирования, то требуемый закон можно задать при описании этого ТЗА. При этом учет физической нелинейности, заданный для ТЗА, имеет приоритет по отношению к закону, заданному в типе жесткости конечного элемента.

### ***Комбинированный прототип ТЗА***

Комбинированный прототип позволяет задавать одновременно продольную и поперечную арматуру в параметрическом виде (рис. 7.12). Для каждой группы продольный и поперечных стержней может быть задан свой диаметр. Диаметр должен быть задан только для реально существующих стержней. Количество промежуточных стержней может быть разным у верхней и нижней граней. У боковых – одинаковым. Диаметр и шаг горизонтальной и вертикальной поперечной арматуры должен быть одинаковым. Промежуточная поперечная арма-

тура не задается.



## Пластины

Для пластин реализован комбинированный прототип. При этом задается четыре слоя армирования по X/Y у верхней/нижней (Z+/Z-) грани пластины. Каждый слой можно задать как отдельный ТЗА. Допускается задание всех 4-х слоев или любой их комбинации. Армирование слоя может быть задано как суммарная площадь всей арматуры этого слоя, либо в формульном виде. В состав формулы входит диаметр арматуры и либо количество стержней, либо их шаг. Если для задания арматуры слоя используется диаметр–шаг, то формула имеет следующий вид:  $dD1sS1+dD2sS2+...$  ( $d12s100+d10s200$ )

Если для задания арматуры слоя используется количество–диаметр, то формула имеет следующий вид:  $K1dD1+K2dD2+...$  ( $10d12+5d10$ )

		<input checked="" type="radio"/> d,s	<input type="radio"/> ΣAs	Защитный слой
		мм	см²/1м	см
<input checked="" type="checkbox"/>	X		0	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Y		0	0
<input checked="" type="checkbox"/>	X		0	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Y		0	0

Допускается в одной и той же записи использовать оба вида формул. Положение арматурных стержней по отношению к требуемой грани с учетом направ-

ления стержней задается величиной защитного слоя.

Суммарная площадь арматуры слоя задается в расчете на 1 п.м. сечения.

### ***Лекция 7. Определение расчетных сочетаний нагрузок (РСН) и усилий (РСУ)***

Решение задачи об определении наиболее опасных сочетаний нагрузок обеспечивает взаимосвязь между результатами расчета сооружения на различные нагрузки и конструированием его элементов. В общем случае полное количество сочетаний нагрузок достигает числа  $2n$ , где  $n$  – количество приложенных нагрузок. При этом имеется в виду, что расчет сооружения произведен в линейной постановке. Практически это означает, что для рассчитываемой конструкции необходимо найти  $2n$  напряженно–деформированных состояний, а это неприемлемо даже при использовании современной техники. Уже при сравнительно небольшом значении  $n$  достижение результата становится затруднительным, а объем его – необозримым. В связи с этим возникает следующая задача: найти критерий, на основании которого можно было бы ограничить количество рассматриваемых сочетаний нагрузок до числа  $m$  ( $m \ll 2n$ ). Конструирование, выполненное на основании  $m$  сочетаний, должно обеспечить прочность конструкции для всех  $2n$  сочетаний. Для решения этой задачи применяются различные подходы. Один из таких подходов основан на вычислении расчетных сочетаний нагрузок (РСН) и соответствующих им усилий на основании нормированных формул. Такой подход принят как основной в странах Европы и США. Он вытекает из вероятностной оценки вклада той или иной нагрузки в итоговое напряженно–деформированное состояние сооружения. Для каждого сооружения рассматривается всегда одинаково ограниченное количество сочетаний. При этом весьма вероятно, что наиболее опасные сочетания будут упущены. Следует отметить, что данный подход может быть применен и для решения нелинейных задач, хотя в силу несправедливости принципа суперпозиции задача сочетания нагрузок перерастает в задачу расчетных сочетаний историй

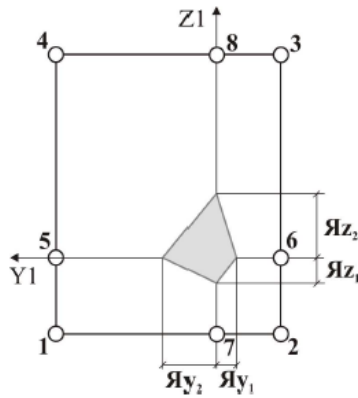
нагружения.

Отечественная школа расчета сооружений предлагает два способа решения этой задачи. Оба они основаны на принципе суперпозиции, который справедлив для линейно деформируемых систем. Вследствие этого задача определения опасных сочетаний нагрузок преобразуется в задачу определения опасных сочетаний усилий. Эти последние называются расчетными сочетаниями усилий (PCY). Первый из способов базируется на критерии экстремальных усилий в сечении, когда экстремальному значению одного из усилий ставится в соответствие сумма остальных. Например,  $N_{\max}-M_{\text{соотв}}$ ,  $M_{\max}-N_{\text{соотв}}$ . Этот способ имел в свое время широкое применение в проектной практике. Вторым способом определения PCY является общий и основан на нахождении экстремумов упругого потенциала в любой точке конструкции от действия многих нагрузок (или многих загружений). Критерий экстремальных усилий при этом рассматривается как частный случай. Применение общего способа приводит к ограниченному (гораздо менее  $2n$ ) количеству рассматриваемых комбинаций (PCY), которые и являются наиболее опасными. Определение PCY производится по нормативным формулам СНиП и/или ДБН, а вычисления выполняются на основании вышеописанного общего способа, учитывающего особенности упругого потенциала, характерные для сечений стержней, пластин, оболочек и объемных тел. Эти особенности позволяют выразить решение задачи выбора опасных сочетаний через критерий экстремальных напряжений в характерных точках сечений. Благодаря этому количество рассматриваемых сочетаний существенно ограничивается.

### ***Критерии выбора PCY для стержней***

В качестве критерия определения PCY здесь приняты экстремальные значения нормальных и касательных напряжений в контрольных точках условного прямоугольного сечения.





Для нормальных напряжений применяется следующая формула:

$$\sigma_k = \frac{N}{F} - \frac{M_y}{J_y} Z_k + \frac{M_z}{J_z} Y_k,$$

где: k – точка сечения стержня (k = 1 - 9).

Эта формула преобразуется следующим образом при  $y = \pm \frac{b}{2}; z = \pm \frac{h}{2}$ :

$$\sigma_k F = N \pm \frac{M_y}{Я_{z,i}} \pm \frac{M_z}{Я_{y,i}},$$

где: ЯY1,2 и ЯZ1,2 – ядровые расстояния в сечении стержня (i=1,2).

Такой подход позволяет определить экстремальные нормальные напряжения в сечении любой формы, приведя ее к прямоугольной.

Для касательных напряжений используется приближенная формула:

$$\tau_{y,z} F = \frac{Q_{y,z}}{2} \pm \frac{M_{kp}}{2(Я_{y1,z1} + Я_{y2,z2})}$$

Формулы вычисления экстремальных значений для каждой точки сечения приведены ниже в таблице.

№ точки сечения	Нормальные напряжения	Касательные напряжения сечения
1	$\sigma F = N + M_y / Я_{z2} + M_z / Я_{y1}$	–
2	$\sigma F = N + M_y / Я_{z2} - M_z / Я_{y2}$	–
3	$\sigma F = N - M_y / Я_{z1} - M_z / Я_{y2}$	–
4	$\sigma F = N - M_y / Я_{z1} + M_z / Я_{y1}$	–

№ точки сечения	Нормальные напряжения	Касательные напряжения сечения
5	$\sigma_F = N + M_z / J_{y1}$	$\tau_F = \frac{Q_z}{2} + \frac{M_{кр}}{2(J_{y1} + J_{y2})}$
6	$\sigma_F = N - M_z / J_{y2}$	$\tau_F = \frac{Q_z}{2} - \frac{M_{кр}}{2(J_{y1} + J_{y2})}$
7	$\sigma_F = N + M / J_{z2}$	$\tau_F = \frac{Q_z}{2} + \frac{M_{кр}}{2(J_{z1} + J_{z2})}$
8	$\sigma_F = N - M_y / J_{z1}$	$\tau_F = \frac{Q_z}{2} - \frac{M_{кр}}{2(J_{z1} + J_{z2})}$

### ***Взаимосвязь нагрузок***

При определении РСУ учитываются логические связи между нагрузками, которые отражают физический смысл нагрузок и требования, регламентируемые различными нормативными документами. Выделяются три типа нагрузок:

- независимые (собственный вес, вес оборудования и т.п.);
- взаимоисключающие (ветер слева и ветер справа, сейсмическое воздействие вдоль разных осей координат и т.п.);
- сопутствующие (тормозные при наличии вертикальных крановых нагрузок и т.п.). Предоставляется также возможность обозначить знакопеременность нагрузки при одинаковом модуле его вектора. Производится учет длительности действия нагрузок.

### ***Унификация РСУ***

Под унификацией в ПК ЛИРА–САПР подразумевается объединение группы конечных элементов с идентичными свойствами (параметрами материала и размерами сечения) в единый унифицированный элемент. Унификация выполняется на основании РСУ. Из вычисленных значений каждого критерия РСУ выбирается наибольшее и присваивается унифицированному элементу.

Унификация целесообразна при конструировании элементов и позволяет для них получить общее конструктивное решение.

Реализованы три типа унификации:

- 1 тип – группа элементов, обладающая единым сечением; при этом каждый стержневой элемент в этой группе обладает единым по длине расчетным сечением;
- 2 тип – группа элементов обладает одинаковыми расчетными сечениями в порядке возрастания номеров расчетных сечений, то есть у группы элементов одинаковые первые сечения, одинаковые вторые и т.д. расчетные сечения;
- 3 тип – группа элементов обладает одинаковыми, симметричными по длине, расчетными сечениями, то есть у группы элементов одинаковые первые и последнее сечения, одинаковые вторые и предпоследние т.д. расчетные сечения.

Для стержневых конечных элементов применимы все три типа унификации. Для плоскостных и объемных КЭ применим 1–й тип, так как эти конечные элементы имеют единственное расчетное сечение.

### ***Структура результатов работы РСУ***

Внутренние группы РСУ

В процессе вычислений для каждого критерия определяется 8 внутренних групп сочетаний для их последующего использования при конструировании – 4 группы для конструирования по 1–му предельному состоянию (1ПС) и 4 группы для конструирования по 2–му предельному состоянию (2ПС).

Внутренние группы для 1ПС – группы A1, B1, C1, D1 – формируются на основании критериев, вычисленных по полным расчетным значениям усилий. Внутренние группы для 2ПС формируются двояко:

- группы A2, B2 – на основании критериев, вычисленных по длительной части нормативных (характеристических) усилий;
- группы C2, D2 – на основании полных нормативных усилий.

Группа A1 – включает только те загрузки, которые обладают длительностью действия; в эту группу включаются постоянные, длительные и кратковременные загрузки; виды загрузок – 0, 1, 2.

Группа В1 – включает все заданные загрузки независимо от длительности действия, кроме сейсмического и прочих особых.

Группа С1 – включает группу В1 плюс сейсмическое нагружение.

Группа D1 – включает группу В1 плюс особое (не сейсмическое) нагружение.

Группа А2 – включает только постоянные и длительные загрузки; виды загрузок – 0, 1.

Группа В2 – включает постоянные, длительные и кратковременные загрузки (кроме мгновенного); виды загрузок – 0, 1, 2.

Группа С2 – включает все заданные загрузки независимо от длительности действия, кроме сейсмического и прочих особых.

Группа D2 – включает группу С2 плюс сейсмическое нагружение.

Описанная структура представлена ниже в таблице.

Вид загрузки	Код	Расчетные				Нормативные			
		Полные значения				Длительные значения		Полные значения	
		A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2
Постоянное	0	+	+	+	+	+	+	+	+
Длительное	1	+	+	+	+	+	+	+	+
Кратковременное	2	+	+	+	+		+	+	+
Крановое	3		+	+	+			+	+
Тормозное	4		+	+	+			+	+
Сейсмическое	5			+					+
Особое	6				+				
Мгновенное	7		+	+	+			+	+

Все вышеописанные группы используются при конструировании элементов как железобетонных, так и стальных конструкций. При подборе сечений стальных конструкций используется усредненный коэффициент надежности по нагрузке для перехода от расчетных значений к нормативным (характеристическим) по каждой внутренней группе.

Вычисленные сочетания образуют 4 таблицы результатов:

Таблица 1 – РСУ расчетные, вычисленные по расчетным значениям усилий.

Таблица 2 – РСУ расчетные длительные, полученные при помощи умножения

расчетных усилий на соответствующие коэффициенты длительности.

Таблица 3 – РСУ нормативные, полученные при помощи деления расчетных усилий на соответствующие коэффициенты надежности по нагрузке.

Таблица 4 – РСУ нормативные длительные, полученные при помощи умножения нормативных усилий на соответствующие коэффициенты длительности.

### ***Расчетная система РСН***

С помощью системы РСН выполняется вычисление перемещений узлов и усилий (напряжений) в элементах от стандартных и произвольных линейных комбинаций загрузок. Под стандартными линейными комбинациями подразумеваются комбинации (сочетания), которые установлены формулами нормативных документов.

В системе РСН реализованы нормативы ДБН В.1.2–2:2006 (Украина), СНиП 2.01.07–85\* и СП 20.13330.2016 (Россия), Еврокод, СТБ ЕН 1990–2007 и ТКП EN 1990–2011(02259) (Беларусь), АСІ 318–95, BAEL–91 (Франция), АСІ 318–95 и IBC–2000 (США), СН РК EN 1990:2002+A1:2005/2011 (Казахстан), EN 1990–2011. Производится учет знакопеременности и взаимоисключения.

При задании произвольных линейных комбинаций величины и знаки коэффициентов не ограничиваются. При наличии динамического воздействия должны быть заданы коэффициенты как для воздействия в целом, так и для его составляющих (форм). В результате расчета РСН образуется четыре группы сочетаний, аналогичные группам РСУ.

Полученные значения могут быть использованы при конструировании стальных и железобетонных элементов, при вычислении нагрузок на фрагмент, а также при проверках прочности и устойчивости.

### ***Лекция 8. Решение нелинейных задач***

Нелинейный процессор предназначен для решения физически и геометрически нелинейных, а также задач с наличием конструктивной нелинейности и предварительного напряжения.

В линейных задачах существует линейная зависимость между нагрузками и перемещениями вследствие малости перемещений. Напряжения (усилия) и деформациями связаны также линейным законом Гука. Поэтому для линейных задач справедлив принцип суперпозиции и независимости действия сил.

В физически нелинейных задачах отсутствует линейная зависимость между напряжениями и деформациями. Материал конструкции подчиняется нелинейному закону деформирования (нелинейная упругость). Закон деформирования может быть симметричным и несимметричным – с различными пределами сопротивления растяжению и сжатию. Решение этих задач производится шаговым методом.

В геометрически нелинейных задачах отсутствует линейная зависимость между деформациями и перемещениями. На практике наибольшее распространение имеет случай больших перемещений при малых деформациях. Решение этих задач производится шаговым методом, причем шаг выбирается автоматически.

В задачах конструктивной нелинейности имеет место изменение расчетной схемы по мере деформирования конструкции. Так, например, в контактных задачах при достижении некоторой точкой конструкции определенной величины перемещения возникает контакт этой точки с опорой.

При решении задач конструктивной нелинейности, а также при решении задач с односторонними связями и задач, учитывающих наличие трения, применяется шагово–итерационный метод.

При решении задач, моделирующих упруго–пластическую работу материала, описываемую диаграммой Прандтля, также применяется шагово–итерационный метод. Для решения нелинейных задач процессор организует пошаговое нагружение конструкции и обеспечивает решение линеаризованной системы уравнений на каждом шаге для текущего приращения вектора узловых нагрузок, сформированного для конкретного нагружения.

Для решения физически нелинейных задач шаговым методом необходимо зада-

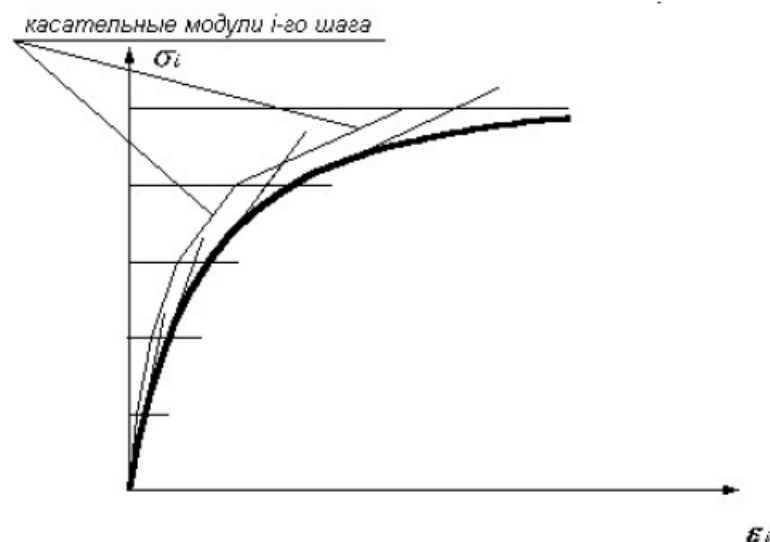
вать информацию о количестве шагов и коэффициентах к нагрузке. Схема может содержать несколько нагружений, из которых допускается формировать последовательность (историю) нагружений.

Моделирование физической нелинейности (нелинейной упругости) материалов конструкций производится с помощью физически нелинейных конечных элементов, воспринимающих информацию из развитой библиотеки законов деформирования материалов (зависимостей  $\sigma$ – $\epsilon$ ). Библиотека законов деформирования позволяет учитывать практически любые нелинейные свойства материала. Эта библиотека законов деформирования материала является библиотекой открытого типа и может пополняться новыми законами. Нелинейный процессор позволяет получить напряженно–деформированное состояние с учетом нелинейных эффектов как для мономатериальных, так и для биматериальных конструкций. Для последних предлагается определенный набор характеристик второго материала (армирующих включений). Библиотека физически нелинейных конечных элементов содержит также элементы, позволяющие моделировать одностороннюю работу твердого тела и сыпучей среды – грунта на сжатие, с учетом сдвига в соответствии с законом Кулона.

Матрица жесткости линеаризованной физически нелинейной системы формируется на основании переменных интегральных жесткостей, вычисляемых в точках интегрирования конечного элемента при решении упругой задачи на конкретном шаге. Схема численного интегрирования по области конечного элемента и набор используемых жесткостей определяются типом конечного элемента. Чтобы получить соответствующий набор интегральных жесткостей, сечение конечного элемента в точках интегрирования дробится на ряд элементарных подобластей. В центрах этих подобластей определяются новые значения физико–механических характеристик материала в соответствии с заданной диаграммой деформирования.

На каждом шаге решается линеаризованная задача с формированием век-

торов перемещений, усилий и новых интегральных жесткостей по касательному модулю для последующего шага. Количество шагов и коэффициенты к нагрузке задаются пользователем. Геометрическая интерпретация шагового метода для случая одноосного растяжения (сжатия) представлена на рисунке.



Шаговый процессор позволяет комбинировать линейные и нелинейные конечные элементы. Допускается расчет по суперэлементной схеме, если нелинейные элементы присутствуют только в основной схеме. На каждом шаге производится оценка напряженно-деформированного состояния. В разделе результатов расчета «Сведения о состоянии материалов» приводятся сообщения о развитии или достижении предельных состояний, появлении пластических шарниров или состояний разрушения.

Для стержневых конечных элементов анализируется напряженно-деформированное состояние поперечных сечений стержня в точках дробления. Напряженно-деформированное состояние в плоских и объемных конечных элементах анализируется в центральной точке элемента. В результате расчета физически нелинейных задач, кроме перемещений узлов и напряжений (усилий) в элементах, вырабатывается информация о состоянии материала в элементах конструкции. Эта информация размещается в таблице сведений о состоянии материала и содержит сообщения о поведении физически нелинейного



материала в процессе пошагового приложения нагрузки. Причем таблица формируется в том случае, если в процессе решения задачи материал сечения был частично или полностью разрушен, а также, если в процессе шагового расчета в каком-либо сечении образовался пластический шарнир. В противном случае таблица остается пустой. В сообщениях указывается процент разрушения сечений элементов, как по основному, так и по армирующему материалу. Процент разрушения материала вычисляется на основании заданной величины дробления сечения (табл. 10.3). При образовании в сечении пластического шарнира печатается соответствующий текст и величина предельного момента.

Моделирование геометрической нелинейности производится с помощью соответствующих нелинейных конечных элементов. Для геометрически нелинейных задач применяется шаговый метод с автоматическим выбором шага.

Для решения задач конструктивной нелинейности используется шагово-итерационный метод.

### ***Конечный элемент предварительного натяжения (КЭ 308)***

Элемент ориентирован на создание предварительного натяжения. Первое загрузке данного элемента (или группы элементов этого типа) в расчетной схеме обеспечивает появление в нем заданного усилия. Для последующих загрузок КЭ 308 работает как КЭ 310. Каждый узел элемента имеет одну степень свободы – перемещение вдоль местной оси  $X1$  – и воспринимает только продольное усилие.

### ***Специальные конечные элементы***

Моделирование конструктивной нелинейности обеспечивается специальными конечными элементами односторонних связей, работающими только на сжатие (растяжение). Такие задачи решаются итерационными методами. Если на какой-либо из итераций усилие в связи стало больше (меньше) нуля, то на последующей итерации связь выключается из работы. В разряд специальных конечных элементов отнесен также и физически нелинейный стержень, моде-

лирующий предварительное натяжение.

### ***Одноузловой элемент односторонней связи*** (тип КЭ – 261)

Данный КЭ применяется для введения связи конечной жесткости, работающей либо на растяжение, либо на сжатие по направлению одной из осей глобальной или локальной системы координат узла. Так, например, для степени свободы  $Z$  конечный элемент позволяет смоделировать работу пружины или упругого основания. Задание в одном узле ограничений на перемещения по двум и более направлениям моделируется несколькими конечными элементами.

### ***Двухузловой элемент односторонней связи*** (тип КЭ – 262)

Данный конечный элемент предназначен для моделирования связи, воспринимающей либо растяжение, либо сжатие вдоль местной оси  $X1$ . Правило образования местной системы координат аналогично КЭ 10. Задание в одном и том же узле ограничений на перемещения по двум и более направлениям моделируется несколькими конечными элементами.

### ***Специальные конечные элементы трения*** (тип КЭ – 263, 264)

Данные КЭ предназначены для моделирования скольжения между узлом конструкции и опорой. При расчете используется шагово–итерационный метод.

## ***Инженерная нелинейность***

По мере постепенного нагружения железобетонных элементов их начальная жесткость претерпевает изменения в силу ползучести бетона, образования в нем трещин и других специфических особенностей железобетона. Учет возникающей при этом зависимости между усилиями и изменяющимися жесткостными характеристиками физически нелинейных железобетонных сечений может быть выполнен на основе шагового метода. Однако такой подход не укладывается в рамки традиционной технологии: определение усилий от каждого нагружения – составление расчетных сочетаний усилий – конструирование элементов. В некоторых нормативах для учета указанных специфических

особенностей железобетона рекомендуется просто вводить понижающие коэффициенты для жесткостей элементов – для изгибаемых элементов 0.3 и для сжатых элементов 0.6. При этом не учитывается тот факт, что снижение жесткости зависит от величины приложенных усилий и характера НДС сечений. О снижении жесткости растянутых элементов вообще ничего не говорится. Подобные рекомендации позволяют произвести лишь грубую оценку действительной ситуации.

В реальных расчетах ситуация еще более сложная. Колонны зачастую испытывают значительные изгибные усилия. Балки испытывают значительные нормальные усилия. В пластинчатых же элементах, как правило, возникают соизмеримые мембранные и изгибные усилия. Пользуясь инженерной нелинейностью можно определить, как именно происходит перераспределение усилий в элементах, насколько увеличиваются перемещения, а также учесть многие другие особенности работы конструкции, которые невозможно обнаружить при линейно–упругом расчете. Фактически инженерная нелинейность позволяет произвести дифференцированное снижение жесткостных характеристик сечений железобетонных элементов.

Система «Инженерная нелинейность» реализует указанный метод и, с одной стороны, позволяет приближенно учесть физическую нелинейность работы железобетона, с другой стороны, провести расчет по традиционной технологии.

#### *Технология расчета*

1. Задать исходные данные как для обычного расчета (геометрия, граничные условия, жесткости, нагрузки);
2. Создать вариант конструирования и выбрать необходимый нормативный документ для расчета железобетонных конструкций;
3. Назначить материалы (тип, бетон, арматура) на элементы расчетной схемы, характеристики которых необходимы для вычисления новых – приведенных – жесткостей;

4. Сформировать «определяющее нагружение» – комбинацию нагружений, которая, по мнению пользователя, окажет существенное влияние на изменение жесткости конструкции, вызванное раскрытием трещин, изменением высоты сжатой зоны и т.п.;

5. Выполнить расчет с помощью системы «Инженерная нелинейность».

На основании усилий в определяющей комбинации (при этом РСУ и РСН не используются) выполняется шаговый расчет с подбором арматуры в сечениях элементов на каждом шаге. По результатам армирования, полученного на последнем шаге, вычисляются пониженные жесткостные характеристики. Они считаются окончательными и автоматически присваиваются элементам схемы.

После этого выполняется обычный линейный расчет на все загрузки, в том числе и динамические. При этом вычисляются перемещения, усилия, РСУ, РСН, подбирается арматура.

### ***Лекция 9. Расчетно–графическая система МОНТАЖ–плюс***

Расчетно–графическая система МОНТАЖ–плюс предназначена для компьютерного моделирования процесса возведения сооружений, в том числе и высотных зданий с монолитными железобетонными конструкциями каркаса. В процессе компьютерного моделирования сооружений из железобетона могут быть учтены климатические условия, при которых происходит замораживание или оттаивание уложенной бетонной смеси. Такой учет реализуется с помощью задания коэффициентов понижения или повышения прочности и модуля деформации бетона на различных стадиях возведения.

На каждой стадии возведения производится расчет соответствующей конструктивной схемы здания, содержащей элементы, смонтированные (или демонтированные) к этому моменту. При этом производится учет текущих прочности и модуля деформации бетона, а также наличия временных стоек опалубки. На каждой стадии такого расчета определяется количество арматуры

во всех сечениях железобетонных элементов (колонн, плит перекрытий, диафрагм жесткости). Если проектной арматуры или проектного железобетонного сечения оказывается недостаточно, то выдается информация о необходимости корректировки проектных решений.

Моделируемое здание может иметь неограниченное количество этажей.

Блоки здания могут быть разновысокими. В плане здание может иметь произвольную форму – произвольный набор прямоугольных и криволинейных в плане блоков. Плиты перекрытия также могут иметь произвольный контур (лоджии, эркеры, балконы, произвольно расположенные отверстия любой формы). Плиты перекрытий могут иметь включения различной толщины, могут быть подперты балочным ростверком или иметь безбалочную схему. Допускается задание нагрузок различных типов:

равномерно распределенных по всему перекрытию, по области, ограниченной произвольным многоугольником (штамп), или по линии, а также сосредоточенных нагрузок. Расположение временных опор (стоек опалубки), последовательность их установки и удаления могут быть произвольными.

В системе ВИЗОР–САПР создается расчетная схема законченного сооружения. Она должна содержать все элементы сооружения – как монтируемые, так и демонтируемые. Однако демонтаж элементов может быть выполнен только один раз. После того как схема со всеми ее атрибутами создана, необходимо сформировать монтажную таблицу.

Монтажная таблица содержит три набора данных.

1) Стадии. Для каждой стадии возведения указываются элементы, которые будут смонтированы и демонтированы. Допускаются пустые стадии. Обозначим общее количество стадий возведения  $m$ . Пустая стадия имеет состав элементов, соответствующих предшествующей стадии.

Используется только для задания нагрузки. Каждой стадии возведения должно соответствовать свое монтажное загружение. Таким образом, количе-

ство стадий и количество монтажных загрузок одинаково и равно  $m$ . При этом допускаются пустые монтажные загрузки.

Эксплуатационные нагрузки на завершённое сооружение задаются на последних стадиях, которые должны быть пустыми.

2) Группы. Для каждой группы элементов схемы задаются поправочные коэффициенты – к модулю деформации и к прочности бетона в соответствии с номерами стадий возведения.

Поправочные коэффициенты не могут от стадии к стадии принимать убывающие значения. Если информация о группах не указана, то характеристики материала остаются неизменными на всех стадиях.

3) Дополнительные загрузки. Для каждой стадии задаются номера дополнительных загрузок и коэффициенты (в том числе нулевые и отрицательные), с которыми эти загрузки должны учитываться при возведении.

Под дополнительными нагрузками подразумеваются такие загрузки, которые присутствуют только при возведении. Это, например, загрузки от складирования строительных материалов, от их перемещения в пределах этажа или с этажа на этаж, и т.п. Эти загрузки задаются под номерами, большими, чем  $m$ . Обозначим количество дополнительных загрузок  $d$ .

Кроме монтажной таблицы, должна быть задана таблица моделирования нелинейных загрузок, в которой обязательно должно содержаться  $m$  строк. Предыстория загрузок учитывается всегда. Наличие суперэлементов в расчётной схеме в данной версии не допускается.

В результате работы расчётного процессора системы МОНТАЖ–плюс для элементов вычисляются усилия и напряжения, накапливаемые в процессе возведения. По умолчанию перемещения узлов в процессе счёта не накапливаются, а вычисляются заново для каждой стадии.

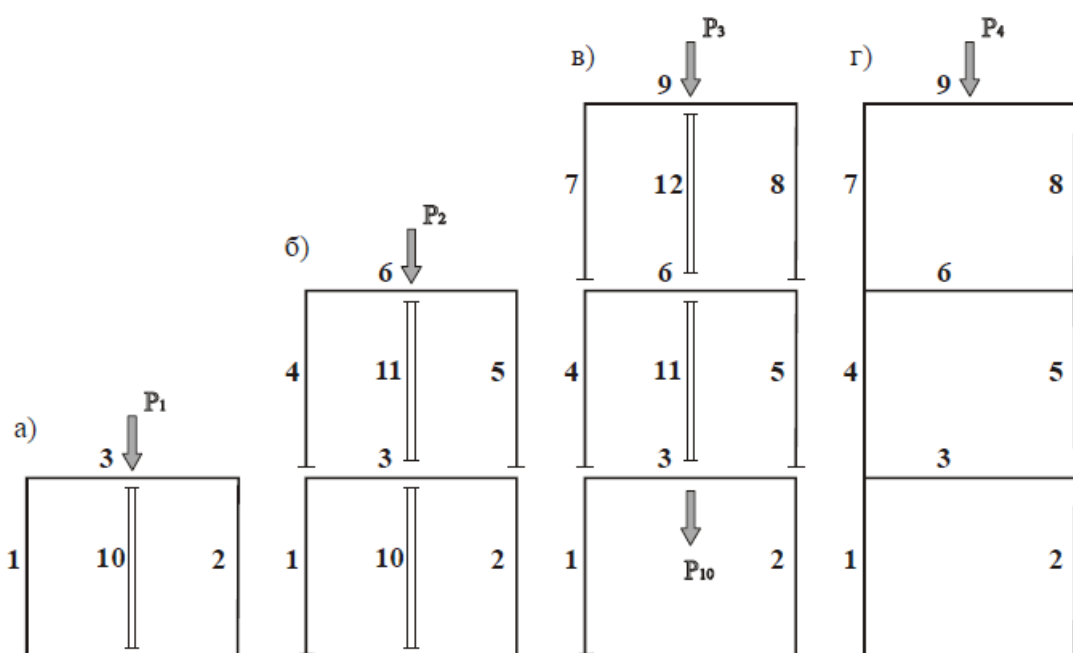
Для определения армирования в элементах усилия и напряжения должны быть импортированы в конструирующую систему ЛИР–АРМ, в которой произ-

водится отслеживание количества необходимой арматуры по каждой стадии. Результаты армирования для каждой стадии представлены в виде таблиц, по которым легко оценить, является ли проектное армирование элементов достаточным.

Если информация о группах и дополнительных загрузках не указана, то система МОНТАЖ–плюс работает как система МОНТАЖ. В этом случае может быть задана еще и таблица РСУ, даже если схема содержит нелинейные элементы. При этом количество строк в этой таблице равно  $m$ .

На рисунке ниже схематически представлен процесс возведения однопролетной трехэтажной рамы.

На каждой стадии возведения производится расчет соответствующей конструктивной схемы на действие собственного веса и монтажных нагрузок с учетом имеющихся, снятых или добавленных временных опор.



*1-я стадия монтажа – а.*

Смонтированы элементы 1, 2, 3 первого этажа и стойка опалубки – 10. Обобщенная нагрузка  $P_1$  – собственный вес смонтированных конструкций и монтажная нагрузка, соответствующая этой стадии возведения. В результате расче-

та на основании полученных усилий определяется арматура в сечениях элементов 1, 2, 3 с учетом пониженной прочности бетона, например  $K_1=0.3$ . Это означает, что на данной стадии бетон в результате замерзания набрал только 30% прочности от полного значения, соответствующего прочностному классу.

*2-я стадия монтажа – б.*

Кроме элементов первого этажа дополнительно возведены элементы 4, 5, 6 второго этажа и установлена временная стойка 11. Нагрузка  $P_2$  – собственный вес вновь возведенных конструкций и монтажная нагрузка на этом этаже. Усилия в элементах, соответствующие нагрузке  $P_2$ , суммируются с зафиксированными усилиями в элементах, присутствовавших на стадии 1 от нагрузки  $P_1$ . По полученным усилиям определяется арматура во всех элементах 1, 2, 3, 4, 5, 6 с учетом неполной прочности бетона на этом этаже, например  $K_2=0.45$ .

*3-я стадия монтажа – в.*

Кроме элементов 1, 2, 3, 4, 5, 6 первых двух этажей, возведены элементы 7, 8, 9 третьего этажа и установлена временная стойка 12, временная стойка 11 сохранена, а временная стойка 10 удалена. Нагрузка  $P_3$  – собственный вес вновь возведенных конструкций и монтажная нагрузка на 3-й стадии. Удаление временной стойки моделируется приложением силы  $P_{10}$ , равной усилию в ней.

Накопление усилий в элементах производится аналогично второй стадии, т.е. для ранее возведенных элементов 1–6 происходит суммирование зафиксированных усилий со вновь полученными усилиями. По найденным усилиям определяется арматура во всех элементах 1–9 с учетом пониженной прочности бетона на этом этапе, например,  $K_3=0.7$ .

*4-я (эксплуатационная) стадия – г.*

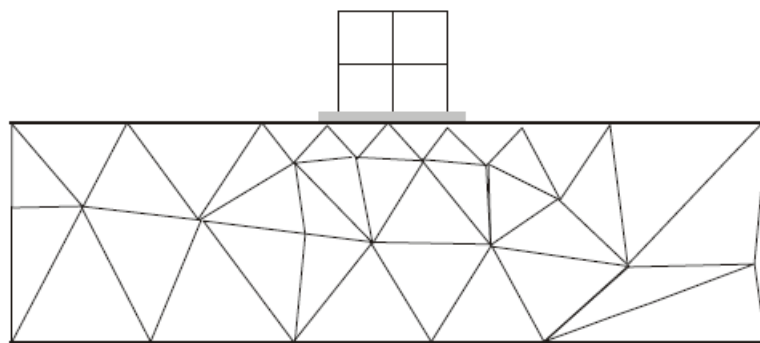
На этой стадии расчетная схема соответствует завершеному сооружению. Удаление всех временных стоек выполняется аналогично удалению стойки 10 на 3-й стадии. Обобщенная нагрузка  $P_4$  включает все полезные нагрузки и дополнительные постоянные нагрузки, за исключением нагрузок от собственного



веса, включенных в нагрузки  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ , усилия от которых зафиксированы на предыдущих стадиях. Прочность бетона на этой стадии может приниматься в соответствии с классом бетона или быть несколько заниженной, т.к. замораживание бетонной смеси в процессе монтажа может снизить окончательную прочность бетона.

### ***Лекция 10. Моделирование грунтового основания***

ПК ЛИРА–САПР предоставляет возможность обеспечить учет совместной работы наземной части сооружения с грунтовым массивом, образовав совместную конечно–элементную модель.



В этой расчетной модели грунт может быть описан плоскими или объемными конечными элементами грунта. Такой подход к решению задачи является наиболее общим, а результат ее решения является наиболее близким к действительности. При этом должно быть принято во внимание, что грунтовой массив является нелинейно–деформируемой средой, состоящей из слоев с различными свойствами. Следует учесть и тот факт, что размеры принимаемого в расчет грунтового массива должны быть такими, чтобы характер граничных условий по области, ограничивающей этот массив, не оказывал существенного влияния на напряженно–деформированное состояние всей модели. Необходимость учета обозначенных факторов приводит к существенному росту объема вычислений, который может оказаться на грани возможностей даже у современных компьютеров.

В связи с этим все еще остаются актуальными расчетные модели грунтового основания, обеспечивающие корректную связь методов механики грунтов с методами строительной механики и позволяющие при расчетах конструкций заменить большой грунтовый массив ограниченным числом параметров, отражающих его свойства. Возможность такой замены предоставляет модель линейно упругого полупространства [78], которая применяется при вычислении осадок основания, а также модели основания, предложенные Винклером–Фуссом и Пастернаком.

В модели Винклера–Фусса распределительные свойства грунта описываются при помощи коэффициента постели  $C_1$ , который отражает работу грунта на сжатие и связывает вертикальный отпор грунта с осадкой основания под подошвой фундамента. Модель Пастернака основывается на двух независимых коэффициентах постели, один из которых является коэффициентом сжатия  $C_1$  (аналог коэффициента постели Винклера), а другой – коэффициентом сдвига  $C_2$ , который связывает интенсивность вертикального сдвига, возникающего вследствие внутреннего трения между частицами грунта, с осадкой грунта под подошвой фундамента. Реализованы две технологии вычисления коэффициентов постели  $C_1$  и  $C_2$ :

1) С помощью программы Расчет  $C_1$ ,  $C_2$ , которая вычисляет коэффициенты постели  $C_1$  и  $C_2$  для центральной точки фундамента или плиты в предположении одинаковой равномерно распределенной нагрузки и одинаковых грунтовых условий по глубине под всей подошвой фундамента или плиты;

2) С помощью системы ГРУНТ на основе построения пространственной модели грунта.

### ***Программа «Расчет $C_1$ , $C_2$ »***

Программа предназначена для вычисления коэффициентов постели грунтового основания  $C_1$  и  $C_2$  под центром отдельно стоящего фундамента или фундаментной плиты по нескольким методикам, основанным на вычислении

осадки в соответствии с различными нормативными документами.

Исходные данные разделены на две группы.

1-ая группа исходных данных относится к конструктивному решению фундамента и выбору схем расчета.

Для описания конструктивного решения необходимо указать:

- размер меньшей стороны и форму фундамента, а также отношение большей стороны к меньшей;
- полную нагрузку на фундамент;
- эксцентриситет приложения нагрузки;
- глубину заложения;
- удельный вес грунта выше подошвы фундамента.
- необходимо также выбрать требуемую схему расчета осадок:
- схему линейно упругого полупространства (схема ЛПП) в соответствии с п.п. 1–6 Приложения 2 СНиП 2.02.01–83\* или п.п. 5.5.31–5.5.45 СП 50–101–2004;
- схему линейно деформируемого слоя (схема ЛДС) в соответствии с п.п. 7–8 Приложения 2 СНиП 2.02.01–83\*.

При наличии динамических воздействий можно воспользоваться эмпирической формулой О.А. Савинова для вычисления коэффициента  $C_1$ .

Для определения нижней границы сжимаемой толщи по СНиП 2.02.01–83\* необходимо задать допускаемое отношение  $\lambda$  между дополнительным вертикальным напряжением и вертикальным напряжением от собственного веса грунта. Для определения нижней границы сжимаемой толщи по СП 50–101–2004 отношение  $\lambda$  может быть вычислено автоматически и выдано в результатах расчета.

2-ая группа исходных данных относится к инженерно–геологическим условиям. Здесь задается количество слоев грунта и его характеристики:

- $E$  – модуль деформации грунта (по ветви первичного нагружения);
- $k$  – коэффициент перехода к модулю деформации грунта по ветви вторичного

нагружения

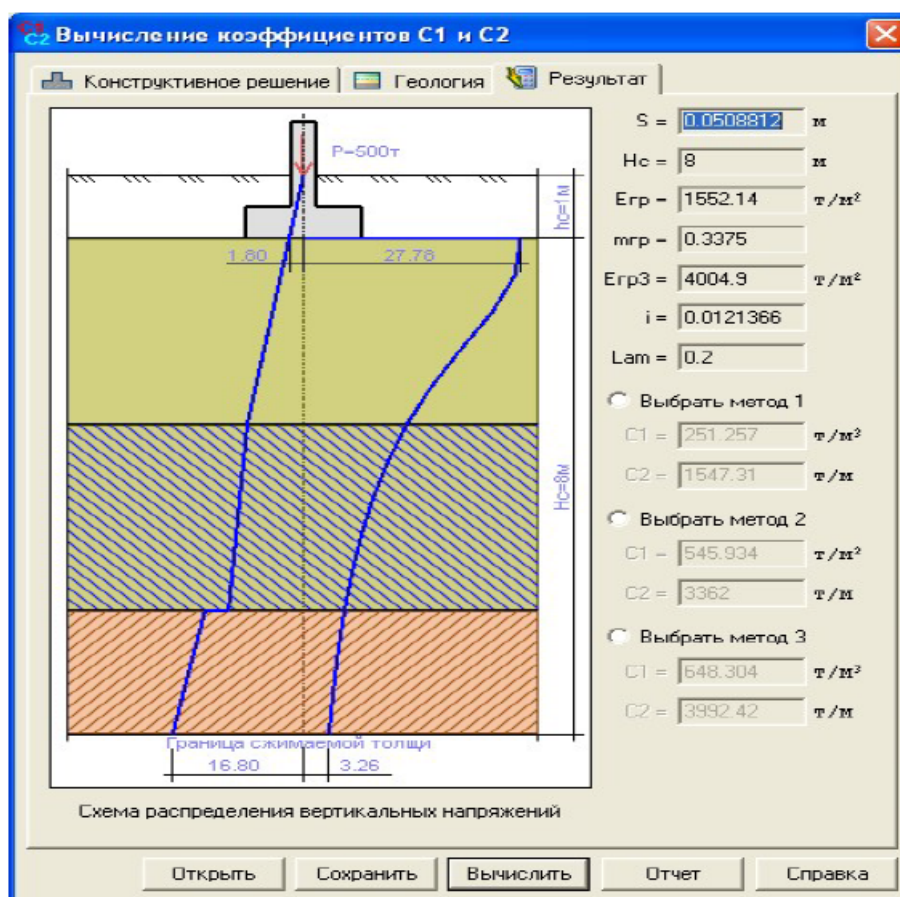
$E_e = k \cdot E$  (задается только при расчете по СП 50–101–2004);

-  $\nu$  – коэффициент Пуассона;

-  $h$  – толщина слоя;

-  $\gamma$  – удельный вес грунта.

Для расчета по схеме ЛДС необходимо задать также признак грунта – песчаный или пылевато–глинистый. Нужно также указать, является ли соответствующий слой грунта водонасыщенным или водоупорным. Чтобы воспользоваться эмпирической формулой О.А. Савинова, необходимо указать коэффициент жесткости  $C_0$ , соответствующий виду грунта.



В результате отображаются следующие величины см. рис. выше:

-  $S$  – осадка фундамента;

-  $H_c$ ,  $H_L$  – граница сжимаемой толщи соответственно для схем ЛПП и ЛДС;

-  $E_{GP}$  – усредненный модуль деформации грунта;

- $m_{ГР}$  – усредненный коэффициент Пуассона;
- $E_{ГР3}$  – усредненный модуль деформации грунта, вычисляемый из предположений об увеличении модуля деформации грунта по глубине и о равномерном распределении дополнительного напряжения;
- $C_1, C_2$  – коэффициенты постели грунтового основания на сжатие и сдвиг;
- $i$  – крен фундамента по формуле 10 приложения 2 СНиП 2.02.01.–83\* или по формуле 5.22 СП 50–101–2004;
- коэффициент  $\lambda$ .

### ***Расчетно–графическая система ГРУНТ***

Расчетно–графическая система ГРУНТ предназначена для определения коэффициентов постели  $C_1$  и  $C_2$  грунтового основания под плитой с произвольным контуром и нагрузкой. С этой целью в системе ГРУНТ выполняется автоматическое построение пространственной модели грунта.

ПК ЛИРА и система ГРУНТ информационно взаимосвязаны. В системе ЛИР–ВИЗОР задается расчетная конечно–элементная схема плиты и равномерная нагрузка на ее элементы. Затем выполняется импорт расчетной схемы с нагрузкой в систему ГРУНТ, и задание информации, относящейся к свойствам грунтов, производится в среде этой системы.

Система ГРУНТ выполняет следующие операции:

- формирование в графическом режиме пространственной модели грунта в соответствии с заданными инженерно–геологическими условиями площадки строительства;
- обработка заданных нагрузок от проектируемых и существующих сооружений, а также произвольно приложенных нагрузок;
- определение глубины сжимаемой толщи и поля осадок грунта в соответствии с заданными нагрузками и инженерно–геологическими условиями;
- вычисление коэффициентов постели упругого (грунтового) основания в соответствии с моделями Винклера–Фусса и Пастернака.

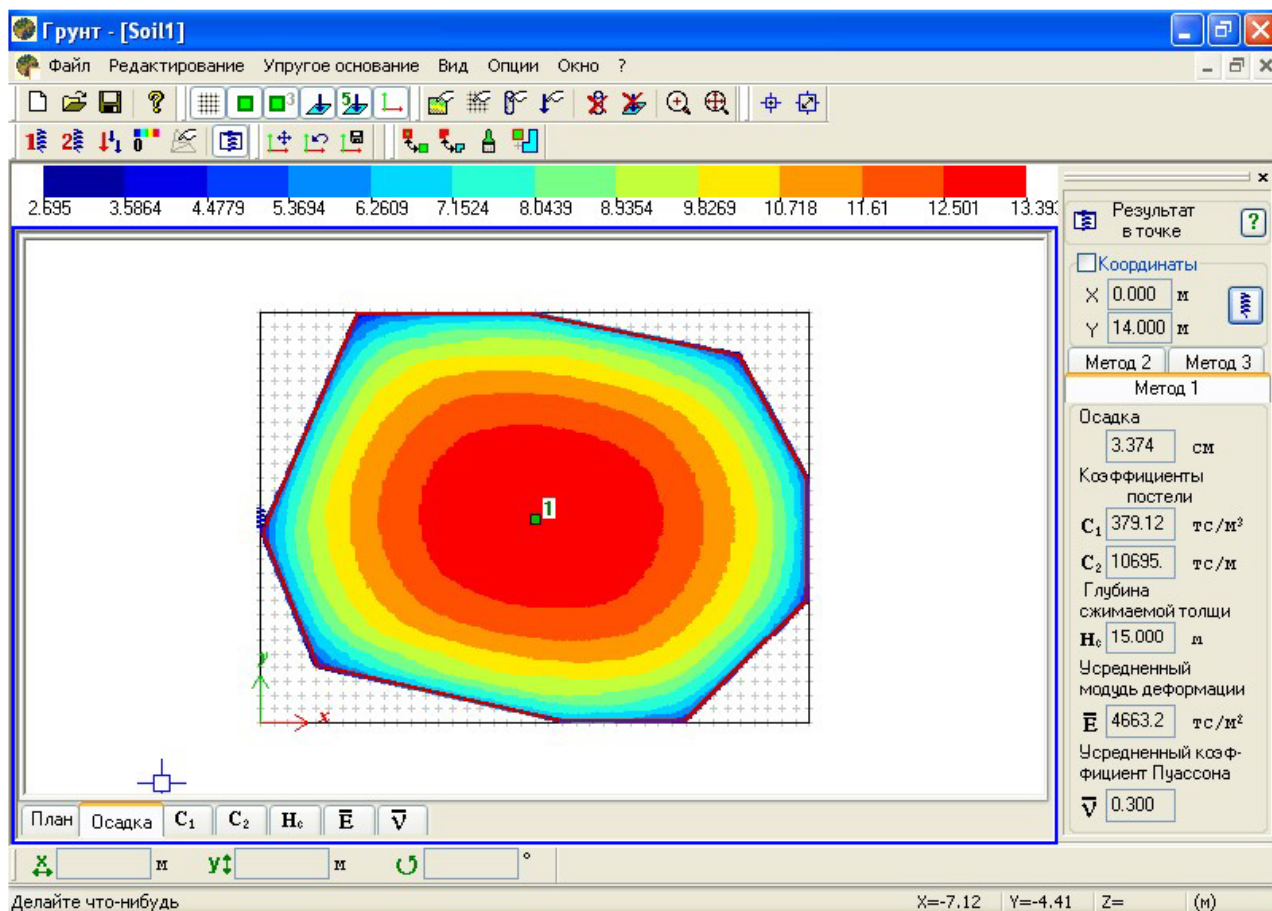
Для описания площадки строительства в графическом режиме задается база характеристик грунта (ИГЭ), указываются координаты и отметки устьев скважин, а также характеристики слоев грунта в каждой скважине. Выполняется также привязка к площадке строительства импортированного из системы ЛИР–ВИЗОР контура плиты. На основании этих данных формируется пространственная модель грунта, а по отметкам устьев скважин выстраивается рельеф дневной поверхности. При этом предполагается, что рельеф является достаточно гладким. Контроль заданных параметров может осуществляться с помощью отображения геологических разрезов, которые выстраиваются вдоль отрезка прямой, проведенной в любом месте заданной площадки строительства.

На заданной площадке строительства помимо произвольного полигонального контура фундамента проектируемого сооружения (импортированного из системы ЛИР–ВИЗОР) могут быть расположены также и контуры фундаментов строящихся и существующих зданий.

В пределах каждого контура задаются нагрузки, приложенные в уровне отметки подошвы соответствующего фундамента. Нагрузки могут быть заданы и в произвольном месте площадки. При этом допускаются следующие виды нагрузок – сосредоточенные силы, равномерно распределенные нагрузки по всей области контура и равномерно распределенные нагрузки по произвольно очерченному контуру (штамп). Для выполнения вычислений производится триангуляция областей, ограниченных заданными контурами. В узлах триангуляции, шагом которой можно управлять, вычисляются все необходимые параметры. Осадки вычисляются по схеме линейно упругого полупространства (ЛПП) с учетом требований конкретных нормативных документов. При этом, производится усреднение модуля деформации и коэффициента Пуассона по заданным слоям грунта.

Результаты работы системы ГРУНТ отображаются в виде и изополей коэффициентов постели  $C_1$  и  $C_2$ , а также осадок, глубин сжимаемой толщи,

усредненных значений модуля деформации и коэффициента Пуассона (см. рис ниже).



Кроме того, информация о результатах может быть считана в любой точке площадки строительства. Вычисленные коэффициенты постели  $C_1$  и  $C_2$  автоматически импортируются в систему ЛИР–ВИЗОР, а их значения присваиваются соответствующим конечным элементам расчетной схемы. После выполнения расчета задачи в ПК ЛИРА результаты отображаются в системе ЛИР–ВИЗОР виде мозаик и изополей коэффициентов постели  $C_1$  и  $C_2$ , а также и отпора грунта  $R_z$ .

### ***Лекция 11. Система МЕТЕОР (вариация моделей)***

Система МЕТЕОР (МЕТОд Единого Обобщенного Результата) предназначена для объединения результатов расчета нескольких расчетных схем с одина-

ковой топологией в единый обобщенный результат (ЕОР). Одинаковая топология расчетных схем подразумевает одинаковую геометрию, одинаковое количество и одинаковые типы элементов. При этом расчетные схемы могут иметь различные граничные условия, связи, жесткостные характеристики, параметры грунтового основания, статические и динамические загрузки и т.п. Количество загрузок в топологически одинаковых задачах также может быть различным. При этом количество усилий в сечении элементов должно оставаться постоянным. Для успешной работы системы МЕТЕОР необходимо, чтобы все объединяемые задачи были рассчитаны и для них были получены файлы результатов, имеющие расширения ИМЯ#00.ИМЯ, ИМЯ#04.ИМЯ, ИМЯ#07.ИМЯ, ИМЯ#08.ИМЯ. Эти файлы содержат информацию соответственно о внутренних форматах, о внутреннем представлении динамических загрузок, о вычисленных перемещениях и усилиях. Наличие файлов ИМЯ#10.ИМЯ, содержащих информацию о вычисленных РСУ, не является обязательным. Исходными данными для системы МЕТЕОР служат данные об именах исходных задач и информация для вычисления обобщенных расчетных сочетаний усилий (РСУ). Имена исходных задач вносятся в исходную таблицу системы МЕТЕОР. Строки исходной таблицы для каждой выбранной задачи заполняются автоматически в соответствии с информацией, заданной в Редакторе загрузок этой задачи – наименование загрузки, его вид и т.д. При этом автоматически заполняются данные для вычисления РСУ. Если в исходных задачах были сформированы таблицы РСУ, то данные для вычисления РСУ берутся из них.

По мере заполнения исходной таблицы производится последовательная нумерация ее строк, начиная с единицы. Эти номера будут соответствовать нумерации загрузок в ЕОР. При необходимости данные в исходной таблице могут быть откорректированы. Задача, имя которой является первым в таблице, приобретает статус базовой задачи. Вычисление ЕОР будет произведено на ос-



новании исходных данных базовой задачи, а именно на основании параметров сечений базовой задачи.

Файл базовой задачи получает название ИМЯ\_NVM.РМО (имя, подчеркивание, суффикс NVM и расширение РМО). Этот файл содержит имена объединяемых задач. Образуется также файл ИМЯ\_NVM.t8m, который содержит заданные коэффициенты РСУ для базовой задачи. При необходимости имя базовой задачи можно изменить. Объединение результатов выполняется при помощи вычисления РСУ. При этом предусматривается два варианта.

Первый вариант – ЕОР по усилиям. В этом случае производится вычисление РСУ в соответствии с нумерацией загружений в исходной таблице, а РСУ вычисляются аналогично обычной задаче. При формировании ЕОР объединяются также результаты статического расчета всех объединяемых задач.

Второй вариант – ЕОР по РСУ, если в объединяемых задачах были заданы таблицы РСУ и были получены по ним результаты (файлы ИМЯ#10.ИМЯ). В этом случае выполняется унификация результатов РСУ – выбор для всех сечений из всех задач таких РСУ, которые вызывают экстремальное значение каждого критерия. При этом все РСУ по соответствующим критериям автоматически становятся взаимоисключающими.

### ***Исходные данные для формирования ЕОР***

1. Имя задачи – имена задач из перечня объединяемых задач. Первым выбирается имя базовой задачи.
2. Номер загрузки по сквозной нумерации загружений для объединенной задачи. Сквозная нумерация загружений производится подряд от 1 до номера последнего загружения в последней описываемой задаче.
3. Номер загрузки, соответствующий нумерации загружений в каждой из объединяемых задач.
4. Имя загрузки – присвоенное имя загрузки, содержащееся в Редакторе загружений описываемой задачи.

5. Вид загрузки – присвоенный вид загрузки, содержащийся в Редакторе загрузок и совпадающий с видом загрузки в таблице РСУ выбранной задачи. Первоначальный вид загрузки может быть изменен при помощи предлагаемого списка видов загрузки.
6. Номер группы объединения – номер группы загрузок, суммируемых при вычислении РСУ.
7. Знакопеременность – признак знакопеременного загрузки; признак выбирается из списка.
8. Номер группы взаимоисключения – номер группы загрузок, которые не должны входить в РСУ одновременно.
9. Номер 1–го сопутствующего загрузки из сквозной нумерации загрузок.
10. Номер 2–го сопутствующего загрузки из сквозной нумерации загрузок.
11. Коэффициент надежности по нагрузке.
12. Признак учета второго предельного состояния при определении РСУ объединенной задачи.
13. Доля длительности загрузки.
14. Коэффициент сочетания для 1–го основного сочетания.
15. Коэффициент сочетания для 2–го основного сочетания.
16. Коэффициент сочетания для особого сочетания с учетом сейсмического загрузки.
17. Коэффициент сочетания для особого сочетания с учетом особого (не сейсмического) загрузки.

Предоставляется возможность выбора способа расчета базовой задачи – по усилиям или по РСУ.

Кроме того, задаются:

- номер варианта конструирования базовой задачи (в текущей версии не реализовано);

- количество одновременно учитываемых крановых загрузок,
- количество одновременно учитываемых тормозных загрузок.

Перед формированием списка объединяемых задач следует убедиться, что все эти задачи посчитаны, а файлы с результатами расчета не удалены.

Число задач может быть от 2 до 96. При формировании РСУ обобщенной задачи выполняются следующие проверки:

- количество элементов в задачах должно быть одинаковым;
- типы конечных элементов в задачах должны совпадать;
- количество промежуточных сечений в стержнях должно совпадать;
- количество усилий в сечении элемента должно совпадать;
- суммарное количество загрузок не должно превышать 96.

Обнаруженные ошибки или несоответствия в исходных данных отображаются в протоколе прохождения задачи.

После окончания расчета посчитанная ЕОР задача открывается автоматически.

Формирование пакета моделей обобщенной задачи

на базе: ☐ РСУ ☒ усилий Норматив: СНиП 2.01.07-85\* номер варианта: 1 кол-во крановых: 2 кол-во тормозных: 1

Выбрать задачу Удалить задачу

Имя задачи	№ эл. за сч.	Имя загрузка	Вид загрузка	№ гр. обвод	Знак	гр. взаим.	№1 сопут.	№2 сопут.	Кэфд. надеж.	Второ. преде. состоян.	Доля длите.	1	2	3	4
метеор_01.lir	1	Собств. вес	Постоян...	0	+	0	0	0	1.1	+	1	1	1	0.9	1
	2	Узловая_на...	Временн...	0	+	0	0	0	1.2	+	1	1	0.95	0.8	0.95
	3	Узловая_на...	Временн...	0	+	0	0	0	1.2	+	1	1	0.95	0.8	0.95
	4	Боковая_на...	Кратков...	0	+	0	0	0	1.2	+	0.35	1	0.9	0.5	0.8
метеор_02.lir	5	Собств. вес	Постоян...	0	+	0	0	0	1.1	+	1	1	1	0.9	1
	6	Статич. вет...	Неактив...	0	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0
	7	Пульсация...	Мгновен...	0	+	0	0	0	1.4	+	0	1	0.9	0.5	0.8
метеор_03.lir	8	Собств. вес	Постоян...	0	+	0	0	0	1.1	+	1	1	1	0.9	1
	9	Сейсм. X	Сейсмич...	0	+/-	0	0	0	1	-	0	0	0	1	0
	10	Сейсм. Z	Сейсмич...	0	+/-	0	0	0	1	-	0	0	0	1	0

ВНИМАНИЕ:  
Задача, заданная первой в списке файлов обобщенной задачи является базовой, т.е. на ее основании будет создана обобщенная задача с результирующим файлом расчетных сочетаний усилий.  
Имя файла обобщенной задачи указывает пользователь.  
Все дальнейшие действия должны производиться только над обобщенной задачей (например, подбор арматуры).

☒ Автоматически заполнять строки

Вид таблицы обобщённой задачи

### *Литература для самостоятельного изучения*

1. ЛИРА–САПР. Книга I. Основы. Е.Б Стрелец–Стрелецкий, А.В. Журавлев, Р.Ю. Водопьянов. Под ред. Академика РААСН, докт. техн. наук, проф. А.С. Городецкого. – Издательство LIRALAND, 2019.– 154с. (книга взята за основу при разработке краткого курса лекций)
2. Вайнберг Д.В., Городецкий А.С., Киричевский В.В., Сахаров А.С. Метод конечных элементов в механике деформированных тел.//Прикладная механика.–т.8, в.8.–К.: Наука, 1972.–С.3–38.
3. Варвак П.М., Городецкий А.С., Пискунов В.Г. и др. Метод конечных элементов.//К.: Вища школа, 1981.–С.176.
4. Гензерский Ю.В., Барабаш М.С., Марченко Д.В., Титок В.П. Программный комплекс ЛИРА 9.2. Примеры расчета и проектирования. Учебное пособие.– К.: ФАКТ, 2005.– 140с.
5. Горбовец А.В., Евзеров И.Д.. Приближенные схемы для стационарных и нестационарных задач с односторонними ограничениями. Вычислительные технологии, 2000., т.5, №6, стр.33–35
6. Городецкий А.С., Горбовец А.В., Стрелецкий Е.Б., Павловский В.Э. и др., «МИРАЖ» – программный комплекс для расчета и проектирования конструкций на персональных компьютерах.//К.: препринт НИИАСС.–1991.– С.95.
7. Городецкий А.С. К расчету тонкостенных железобетонных конструкций в неупругой стадии.//Строительные конструкции. –К.:Будівельник, 1965.–С.
8. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелец–Стрелецкий Е.Б. и др. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс ЛИРА–Windows.//К.: Факт, 1997.–С.137
9. Городецкий А.С., Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Интеллектуальная программная система – прогноз новых возможностей.//Системы автоматизированного проектирования объектов строительства.– К.: Будівельник, 1989.–

С.43–56.

- 10.Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций – К.: ФАКТ, 2007, 394с.
- 11.Городецкий А.С., Батрак Л.Г., Городецкий Д.А., Лазнюк М.В., Юсипенко С.В. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона. – К.: ФАКТ, 2004, 104с.
- 12.Городецкий А.С., Здоренко В.С., Елсукова К.П., Сливкер В.И. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций на упругом основании с двумя коэффициентами постели.//Сопротивление материалов и расчет сооружений. –К.: Будівельник, 1975.–С.180–192.
- 13.Городецкий А.С., Здоренко В.С. К расчету физически нелинейных плоских рамных систем.//Строительная механика и расчет сооружений. – М.: Издательство литературы по строительству, 1969.–С.26–30.
- 14.Городецкий А.С. Вопросы расчета конструкций в упругопластической стадии на ЭЦВМ.// ЭЦВМ в строительной механике. –М.: Издательство литературы по строительству, 1966.–С.169–174.
- 15.Городецкий А.С., Заворицкий В.И., Лантух–Лященко А.И., Рассказов А.О. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений.//М.: Транспорт, 981.–С.143.
- 16.Городецкий А.С., под ред. ЛИРА версия 9.0. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Справочно–теоретическое пособие. – М.– К.: ФАКТ, 2003, 472с.
- 17.Городецкий А.С. К расчету тонкостенных железобетонных конструкций в неупругой стадии //Строительные конструкции. – Киев, НИИСК, – Вып.3, 1965.
- 18.Городецкий А.С., Здоренко В.С. Расчет железобетонных балок–стенок с учетом образования трещин методом конечных элементов //Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев, 1975, – Вып.27, С.56–66.

- 19.Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1981.–216с.
- 20.Дмитриев Л.Г., Касилов А.В. Вантовые покрытия //Расчет и конструирование. – Киев: Будівельник , 1968. – 171 с.
- 21.Евзеров И.Д. Метод конечных элементов при расчете на длительное действие нагрузки// Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1990, – Вып.56, С.98– 103.
- 22.Евзеров И.Д. Неконформные конечные элементы в нелинейных и нестационарных задачах строительной механики // Дис. докт.техн.наук.: 01.02.03. – Киев, КИСИ, 1993. – 249с.
- 23.Железобетонные стены сейсмостойких зданий : Исследования и основы проектирования: Совм. изд. СССР – Греция/ Г.Н.Ашкинадзе, М.Е.Соколов, Л.Д.Мартынова и др. – М.: Стройиздат, 1988.–504с.
- 24.Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: «МИР», 1971.–542с.
- 25.Инструкция по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки. М.: Стройиздат, 1970.–288с.
- 26.Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. – М.: Стройиздат, 1976. – 208с.
- 27.Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416с.
- 28.Качурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчет. – М.:Госстройиздат,1962.– 224с.
- 29.Клепиков С.Н. Расчет конструкций на упругом основании. К.: Будівельник, 1967.
- 30.Кодекс–образец ЕКБ–ФИП для норм по железобетонным конструкциям (перевод с французского). М., НИИЖБ, 1984.– 284с. 153
- 31.Козачевский А.И. Модификация деформационной теории пластичности бетона и плоское напряженное состояние железобетона с трещинами

- //Строительная механика и расчет сооружений. – 1983.– № 4. – С.12–16.
- 32.Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. – М.: Стройиздат, 1984. – 149с.
- 33.Круглов В.М. Нелинейные соотношения и критерий прочности бетона с трехосном напряженном состоянии //Строительная механика и расчет сооружений. – 1987.– № 1. – С.40–44.
- 34.Лантух–Лященко А.И. ЛИРА. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. – Учебное пособие. К.–М., ФАКТ, 2001, 312с.
- 35.Максименко В.П. Численное моделирование работы железобетонных конструкций в многоосных напряженных состояниях// Дисс. канд. техн.наук.: 05.23.01 – Киев, НИИСК, 1988. – 205с.
- 36.Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М.: Госстройиздат, 1954.
- 37.Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01–84). М., ЦИТП, 1986, – 194с.
- 38.Сахновский К.В., Железобетонные конструкции. Москва, 1959, 825с.
- 39.СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия.– М.: Стройиздат, 1986.–36с.
- 40.СНиП 2.03.01–84.Бетонные и железобетонные конструкции.– М.: Стройиздат, 1985.–80с.
- 41.СНиП II–7–81.Строительство в сейсмических районах.– М.: Стройиздат, 1982.–48с.
- 42.СНиП II–23–81\*. Стальные конструкции. М.: Стройиздат, 1984.–90с.
- 43.СНиП 2.02.01–83. Основания зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1984г.
- 44.СНиП II–21–75. Бетонные и железобетонные конструкции. М., Стройиздат, 86с.
- 45.СНиП 2.05.03–84. Мосты и трубы. М., ЦИТП, 1985, 200с. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие (в двух то-

- мах) /В.Т.Трощенко, А.Я.Красовский и др.// Институт проблем прочности АН Украины. Киев, Наукова думка, 1994.
- 46.Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
- 47.Стрелец–Стрелецкий Е.Б. Расчетные сочетания напряжений для конструкций типа балки– стенки и плиты.//Строительная механика и расчет сооружений.– 1986.– №3.–С36–38.
- 48.Стрелец–Стрелецкий Е.Б. Методы определения опасных комбинаций напряжений при оценке прочности элементов конструкций.// Дисс. канд. техн. наук.: 01.02.03. – Москва, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1987. –125с.
- 49.Съярле Ф., Метод конечных элементов для эллиптических задач. М.: «МИР», 1980. (гл.8, 8.1, с.418–423), с.512.
- 50.Тимошенко С.П. Войновский–Кригер С. Пластины и оболочки/ Пер. с англ. – М: МИР, 1966. – 635 с.
- 51.Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М., Наука, 1975, .575с.
- 52.Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер–Мартirosян З.Г., Чернышев С.М. Механика грунтов, основания и фундаменты. М., АСВ, 1994, 524с.
- 53.Яшин А.В. Критерии прочности и деформирования бетона при простом нагружении для различных видов напряженного состояния//Расчет и конструирование железобетонных конструкций. – М., НИИЖБ. – Вып.39, 1977. – С.48–