МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО - СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра мостов и транспортных тоннелей

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным занятиям по курсу «Основы систем автоматизированного проектирования (САПР)»
для студентов по направлению подготовки 270800.62 «Строительство», профиль «Автодорожные мосты и тоннели»

Казань
2014

УДК 721.01:624.04:681.3.06
ББК 30.2-5-05
З63

З63. Методические указания к лабораторным занятиям по курсу «Основы систем автоматизированного проектирования (САПР)» / сост. Т.А. Зиннуров. Казань: – Издательство Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2014. – 25 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В настоящих указаниях рассматриваются основы и принципы автоматизированного проектирования транспортных сооружений при помощи расчётного комплекса “ЛИРА”. Методические указания предназначены для использования в учебном процессе студентами по направлению подготовки 270800.62 «Строительство» – профиль «Автодорожные мосты и тоннели».

Рецензент:
доцент кафедры «ОФДСиИГ», к.т.н. Д.М. Нуриева

УДК 721.01:624.04:681.3.06
ББК 30.2-5-05

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2014
© Зиннуров Т.А., 2014

Введение

Программный комплекс *“ЛИРА”* – это многофункциональный программный комплекс для расчёта, исследования и проектирования конструкций различного назначения. ПК “ЛИРА” с успехом применяется в расчётах объектов строительства, мостостроения и во многих других сферах, где актуальны методы строительной механики. *ПК “ЛИРА”* автоматизирует ряд процессов проектирования: определения расчётных сочетаний нагрузок и усилий, назначения конструктивных элементов, подбора и проверки сечений стальных и железобетонных конструкций с формированием эскизов рабочих чертежей колонн и балок. *ПК “ЛИРА”* позволяет исследовать общую устойчивость рассчитываемой модели, проверить прочность сечений элементов по различным теориям разрушений. *ПК “ЛИРА”* предоставляет возможность производить расчёты объектов с учётом физической и геометрической нелинейностей, моделировать процесс возведения сооружения с учетом монтажа и демонтажа элементов.

ПК “ЛИРА” состоит из нескольких взаимосвязанных информационных систем. Основные: система *“ЛИР-ВИЗОР”* – это единая графическая среда, которая располагает обширным набором возможностей и функций для создания и расчёта строительных моделей; *“ЛИР-СТК”* и *“ЛИР-АРМ”* – подбор и проверка сечений стальных элементов и арматуры в железобетонных элементах соответственно.

1. Принципы построения конечно-элементных моделей

Любая строительная конструкция представляется в виде расчётной схемы. Расчётная схема выступает в виде идеализированной модели. Модель разбивается на конечные элементы. В результате такой разбивки появляются узлы, которые указывают на соединение элементов. В опорные узлы вводятся соответствующие связи, которые обеспечивают соединение с неподвижным основанием. Нумерация узлов и элементов определяет последовательность задания исходной информации и чтение результатов счёта. Конечные элементы, имеющие одинаковые жёсткостные характеристики, объединяются по типам жёсткости.

Координаты расчётной схемы

Расчётная схема располагается в правой декартовой системе координат X, U, Z. Для фиксации местоположения конечного элемента в схеме служит местная система координат – X_1, U_1, Z_1. Местная система координат необходима для ориентации местной нагрузки, главных осей

инерции в сечении стержня, усилий и напряжений, возникающих в элементе.

Каждый узел схемы имеет свою локальную систему координат – X_2, U_2, Z_2, которая является правой декартовой, как и местная система. По умолчанию локальная система координат узла совпадает с глобальной. Локальная система координат узла позволяет задавать нагрузки и заданные перемещения в направлении, не совпадающем с глобальными осями. Каждый узел схемы в общем случае имеет 6 степеней свободы: три линейных перемещения вдоль осей X или X_2; U или U_2; Z или Z_2 и три поворота вокруг X или X_2, U или U_2, Z или Z_2.

Для расчётных схем, в которых количество степеней свободы в узле заведомо меньше 6 (плоские фермы, плоские рамы и т.п.), применяется так называемый признак схемы. В *ПК "ЛИРА"* задействованы пять признаков схемы. Признак 1 – 3 – для двухмерных задач, а признак 4 и 5 – для трёхмерной задачи.

Признак 1 – схемы, располагаемые в плоскости XOZ; каждый узел имеет 2 степени свободы - линейные перемещения вдоль осей X, Z или X_2, Z_2. 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 осей X, Z или X_2, Z_2 и поворот вокруг оси Y или Y_2. 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 оси, Z или Z_2 и повороты вокруг осей X, Y или X_2, Y_2. В этом признаке рассчитываются балочные ростверки и плиты; допускается учёт упругого основания.

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

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

Граничные условия в расчётной схеме могут быть заданы непосредственно на узел, а также смоделированы при помощи связей конечной жёсткости.

Построение расчётной модели

Представляя расчётную схему сооружения в виде конечно-элементной модели, пользователь всегда стремится достичь компромисса

между двумя противоречивыми желаниями: получить как можно более точное решение задачи и за короткое время. Желательно также получить обозримый объём результатов. Для достижения такого компромисса необходимо уметь оценивать оба указанных фактора. Так, время решения задачи легко прогнозируется по количеству узлов, элементов, загружений, а также быстродействию компьютера. *ПК "ЛИРА"* автоматически даёт прогноз времени решения задачи для всех этапов расчета. Однако оценка точности решения задачи является вопросом очень сложным, так как зависит от многих слабо формулируемых факторов:

- **густота сетки** – с одной стороны, сгущение сетки повышает точность, с другой – неограниченное сгущение может повлечь слабую обусловленность матрицы канонических уравнений и потерю точности;
- **физико-механические свойства расчётной модели** – расчетная схема может быть близка к геометрически изменяемой, содержать элементы с сильно различающимися жёсткостями, что также влечёт за собой потерю точности;
- **геометрия конечных элементов** – если стороны элементов сильно различаются по длине, то это приведёт к плохой обусловленности матрицы накопленных уравнений и также к потере точности;
- **свойство конечных элементов** – использование высокоточных элементов часто приводит к более точному решению, чем использование простых элементов на значительно более густой сетке.

Назначение сетки надо проводить на основе многих факторов. Так, например, густоту сетки предпочтительно увеличивать только в местах предполагаемого большого градиента напряжений (входящие узлы, места сосредоточенных нагрузок и т.п.). Кроме того, знание свойств конечных элементов также часто помогает рационально построить конечную модель.

Иногда приходится решать большие задачи, в которых густая сетка недопустима из-за ограниченных ресурсов компьютера, а укрупнённая разбивка не дает достаточно полной картины напряжённо-деформированного состояния конструкции.

В этом случае предлагается совместить укрупнённую и густую сетку. Решая задачу несколько раз, можно использовать расчёт укрупнённой схемы с последующей *фрагментацией* её частей.

Фрагментация заключается в последовательном вырезании, уменьшении и детальном расчёте некой области конструкции. Такой подход применяется при исследовании областей концентрации напряжений – вокруг отверстий, в местах резкого изменения сечений элементов и т.д. Этот подход применим также при решении больших задач. Первоначально рассчитывается схема из укрупнённых конечных

элементов. Затем вырезаются отдельные фрагменты этой схемы и дробятся более мелко. Расчёт фрагмента производится на воздействия, полученные в результате расчёта крупной схемы.

Практическое задание 1. Создать расчётную схему согласно размерам на рис. 1. 1. Используя цельные стержневые элементы 2. Разбить элементы на пять частей.

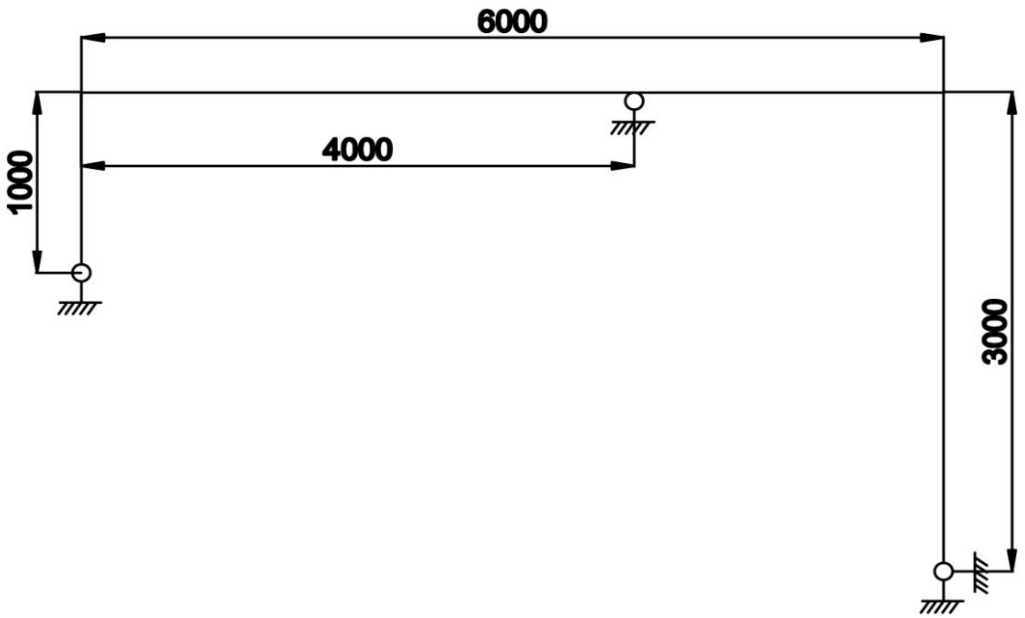


Рис. 1

Построить стержневую расчётную схему можно двумя способами. Первый способ – открыть вкладку *“Схема”* → *“Создание”* → *“Регулярные фрагменты и сети”* (фермы, пространственные рамы – это частные случаи строительных конструкций). Первый столбик – горизонтальные элементы, второй столбик – вертикальные элементы (*L* – длина, *N* – количество). Второй способ – найти вкладку *“Схема”* → *“Корректировка”* → *“Добавить узел”* или *“ Добавить элемент”*. Сначала устанавливаются узлы согласно указанным координатам, которые соединяются элементами. Вкладки “*Добавить узел или элемент”* содержат дополнительные функции: добавлять узлы по различным законам, делить на равные участки и т.д. Граничные условия задаются вкладкой *“Схема”* → *“Связи”*. Для этого указываются требуемые ограничения и требуемый узел “*Отметка узла”*. Отметка узлов или элементов выполняется с помощью одиночного указания курсором или растягиванием вокруг нужных узлов “резинового окна”.

Не нужно забывать, если выбрали двухмерную задачу, тогда не следует задавать элементы и узлы по оси *Y*, за исключением поворота.

2. Нагрузки и характеристики элементов

Нагрузки и воздействия

Статистические воздействия задаются в виде сосредоточенных сил и моментов как в узлы схемы (узловая нагрузка) по направлениям осей глобальной и локальной систем координат, так и на элементы (местная нагрузка) по направлениям местной или глобальной систем координат.

Динамические воздействия задаются в виде узловых нагрузок, действующих вдоль осей глобальной или локальной систем координат, а также в виде колебаний масс, сосредоточенных в точках сооружения, заданных как собственный вес конструкций, оборудования и т. п. Реализована возможность формирования весов масс для динамического воздействия непосредственно из статического загружения.

Действие одной нагрузки или группы нагрузок может быть объявлено, как отдельное загружение – *статическое или динамическое*. При наличии нескольких загружений может быть произведён выбор наиболее опасных их сочетаний, которые формируют так называемые *расчётные сочетания усилий* (РСУ), необходимые при конструировании элементов схемы.

Жёсткостные характеристики элементов

Для каждого типа конечного элемента задается определённый набор жёсткостных характеристик. Для стержневых элементов жёсткостные характеристики могут быть заданы одним из следующих способов: в подборке сечений (в частности, бетонного сечения) или стальных профилей и их комбинаций из базы типовых сечений стального проката; численным; назначением сечений нестандартной формы, вычисляемых с помощью системы *“ЛИР-КС”* «Конструктор сечений».

Кроме того, могут быть заданы следующие характеристики: жёсткие вставки вдоль осей местной системы координат; ядровые расстояния сечений – по два числа для каждой из осей инерции; при задании численных характеристик; величина угла чистого вращения; параметры упругого основания *A, C1, C2*, где *A* – ширина или высота сечения; *C1* и *C2* – коэффициенты постели по модели Пастернака; признак учёта сдвига при составлении матрицы жёсткости.

Для плоскостных конечных элементов задаются следующие характеристики: *E* (модуль упругости), *V* (коэффициент Пуассона) и *H* (толщина элемента). Для объёмных конечных элементов задаются *E* и *V*.

Система «Конструктор сечений» *“ЛИР-КС”* предоставляет возможность компоновать в графической среде сечение сложной формы. Сложное сечение может включать в себя стандартные сечения, сечения прокатных профилей и сечения произвольного контура. Сечение

произвольной формы задаётся внешним контуром и набором внутренних контуров (отверстий). Контуры являются замкнутыми ломаными, которые описываются узлами или задаются графически на масштабной сетке узлов.

Практическое задание 2. Построить расчётную схему согласно рис. 2. Задать жёсткость элементов, назначить нагрузки в загружениях 1, 2, 3. Сечение нижнего и верхнего пояса – двутавр, высота 40 см, ширина 23 см, толщина 3 см, сечение раскосов и стоек – прямоугольник, высота 15 см, ширина 14 см. Загружение 1 – собственный вес, загружение 2, 3, рис. 2. Выполнить расчёт.

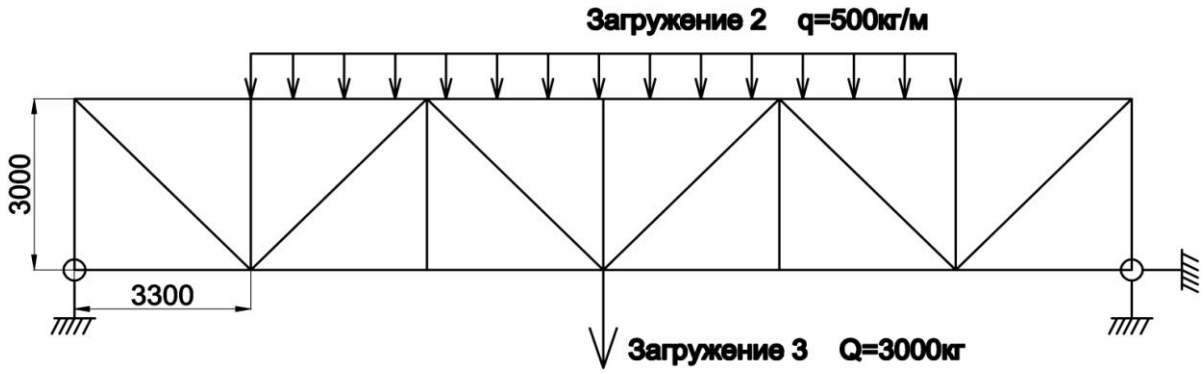


Рис. 2

После построения расчётной схемы для расчёта необходимо задать жёсткостные характеристики элементов. К ним относятся: модуль деформации *E*, размеры сечения, удельный вес R_0, например, для железобетона $E=3000000$ *т/м*^{3} и $R_0=2.45$ *т/м*^{3}.

Общая схема назначения жёсткостных характеристик такова. *“Жёсткости”* → *“Жёсткости элементов”* → *“Добавить”*. Вводятся числовые значения жёсткостных характеристик. Каждый набор характеристик мы будем называть “типом жёсткости”, или просто “жесткость”. Каждому типу жёсткости будет присвоен порядковый номер. Один из типов жёсткости назначается “текущим”. Отмечаются элементы, которым будет присвоена текущая жёсткость. Кнопкой *“Назначить”* всем выделенным элементам присваиваются жёсткостные характеристики, содержащиеся в текущем типе жёсткости.

Диалоговое окно *“Жёсткости элементов”* имеет три закладки графического меню, дающие доступ к библиотеке жёсткостных характеристик. По умолчанию открывается закладка *“Стандартные типы сечений”*. Две других закладки содержат: диалоговые окна для задания характеристик из базы типовых сечений стального проката и диалоговые окна для задания параметров пластин и объемных элементов.

Назначение нагрузок начинается с выбора загружения. Допускается задание до 99 загружений. Номер и имя загружения присваиваются с

помощью диалогового окна «Активное загружение», которое вызывается из меню *“Нагрузки” → “Выбор загружения”*. Нагрузки на узлы и элементы задаются с помощью диалогового окна *“Задание нагрузок”*, которое вызывается из меню *“Нагрузки” → “Нагрузка на узлы и элементы”*.

Диалоговое окно содержит закладки для задания нагрузок на узлы, стержни, пластины, объёмные элементы и суперэлементы, а также для задания динамических нагрузок во времени. По умолчанию принимается, что нагрузки принадлежат одному и тому же текущему загружению, номер которого был задан заранее. Окно содержит также закладку для корректировки или удаления нагрузок текущего загружения.

В окне содержатся кнопки для задания систем координат – глобальной, местной (для элемента), локальной (для узла) и направления воздействия – *X, Y, Z,* а также кнопки для задания статической нагрузки (коричневый цвет), заданного смещения (жёлтый цвет) и динамического воздействия (розовый цвет) – меню этих кнопок изменяется в зависимости от типа загружаемого конечного элемента. При нажатии этих кнопок вызывается диалоговое окно для задания параметров нагрузки. Нужно помнить: узловая нагрузка назначается в *тс* или *кН,* а распределённая – *тс/м* или *кНм*. Собственный вес *«Загружение 1»* задаётся: *“Нагрузки” → “Добавить собственный вес”* с коэффициентом надёжности 1.05.

После того как задана нагрузка, можно выполнить расчёт *“Режим” → “Выполнить расчёт”,* но при наличии повторяющихся узлов или элементов появится ошибка “геометрически изменяемая система”, поэтому для её избежания нужно выполнить упаковку *“Схема” → “Корректировка” → “Упаковка схемы”*.

3. Моделирование соединений элементов

Задача любой расчётной схемы – объективно смоделировать соединение элементов от шарнирного до жёсткого. По умолчанию в узле назначается жёсткое соединение, которое можно заменить на податливое или шарнирное.

Моделирование шарниров в стержневых и плоскостных элементах

Под словом "*шарнир*" подразумевается освобождение от линейной или угловой связи между узлом схемы и входящим в этот узел концом стержня или узлом конечного элемента. В стержнях шарниры задаются непосредственно при создании схемы и ориентируются относительно осей местной системы координат X_1, Y_1, Z_1. Шарнирное крепление стержня к узлам может быть реализовано также при помощи нулевой изгибной жёсткости.

При задании шарниров в плоскостных элементах рекомендуется использовать следующий приём: в месте задания шарнира произвести двойную нумерацию узлов разбивки (один из узлов относится к одному, а другой – к другому конечному элементу). Затем объединить соответствующие линейные перемещения этих узлов.

Моделирование податливости узлов сопряжения элементов. В этом случае рекомендуется использовать специальный конечный элемент упругой связи между узлами (тип 55).

Объединение перемещений

В *ПК “ЛИРА”* предусмотрена возможность задания информации об узлах, имеющих одинаковые перемещения по заданному направлению. Эти перемещения получают один порядковый номер, то есть происходит объединение нескольких неизвестных в системе линейных алгебраических уравнений.

Такой приём позволяет объединять горизонтальные перемещения узлов, принадлежащих перекрытию в плоских многоэтажных рамах, показывая тем самым, что перекрытия представляет собой жёсткий диск, что является разновидностью жёсткого соединения.

Очень удобен такой приём в задачах с динамическими воздействиями от ветра или сейсмики в горизонтальном направлении. В этом случае инерционная масса всего перекрытия собирается в один (любой) узел перекрытия.

Абсолютно жёсткие вставки

Абсолютно жёсткие вставки используются, как правило, при нарушении соосности стыковки стержней в узле. Жёсткие вставки ориентируются вдоль осей местной системы координат X_1, U_1, Z_1. Нагрузки, задаваемые на стержень с жёсткими вставками, привязываются к началу упругой части. Заданный шарнир располагается между жёсткой вставкой и упругой частью.

Усилия вычисляются только в упругой части, поэтому при проверке равновесия в узле, где присутствует такой стержень, следует производить перенос усилий из упругой части в узел с учётом заданной нагрузки на вставку.

Введение связей конечной жесткости

Связь конечной жёсткости (или упруго податливая связь) применяется при моделировании упругого основания и любого упругого опирания узлов расчётной схемы. *КЭ* типа 51, реализующий такой тип связи, является одноузловым, ориентируется относительно осей глобальной системы координат и имеет единичную длину.

Допускается применение этого *КЭ* и в случае абсолютно жёстких связей, совпадающих с осями глобальной системы координат. При назначении жёсткостей необходимо иметь в виду, что большие величины их могут ухудшить точность счёта. Поэтому обычно рекомендуется задавать жёсткости на 1 – 2 порядка больше, чем погонные жёсткости примыкающих стержней или цилиндрические жёсткости пластин. Вычисленные в результате счёта усилия в таких элементах облегчают проверку глобального равновесия схемы.

*Практическое задание 3. Построить расчётные схемы, изображённые на рис. 3. Создать загружение 1. Жёсткость элементов задать в виде прямоугольника сечением 30*20 см. Проанализировать изменение основных параметров двух расчётных схем.*

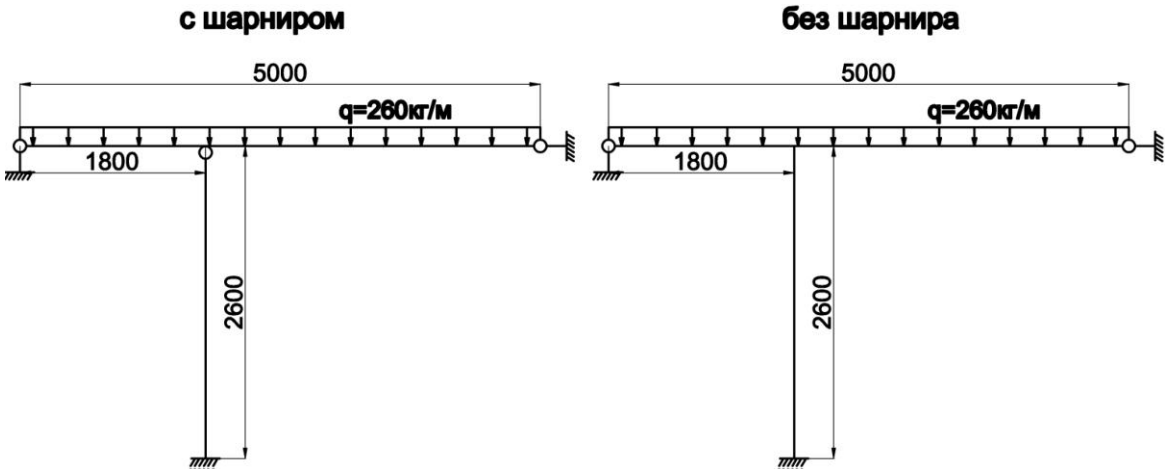


Рис.3

Для решения поставленной задачи нужно собрать расчётную схему, приложить нагрузку, назначить жёсткости и выполнить расчёт, после чего сохранить результаты. Теперь внесём некоторые изменения, установим шарнир: *“Жёсткости” → “Шарниры”* и в появившемся окне разрешим поворот относительно оси *UY* второго узла вертикального элемента. Выполним расчёт и также сохраним результаты в отдельный файл.

Следующий этап – это сравнение полученных данных.

Принципы анализа результатов расчёта

ПК “ЛИРА” предоставляет пользователю достаточный набор функций для оценки достоверности напряженно-деформированного состояния схемы в каждом загружении или по комбинациям загружений, для получения цифровой информации по каждому узлу и элементу. Результаты работы расчетных процессоров могут быть представлены как в исходных единицах, так и в отличных от них.

Если в результате счета перемещения некоторых узлов очень велики, то, скорее всего: отсутствуют необходимые связи; в узле сходятся разнородные конечные элементы, воспринимающие разные степени свободы; система мгновенно изменяема. Необходимо проверить: координаты узлов; наличие связей между элементами; жёсткостные характеристики элементов; шарниры и закрепления.

Когда, наконец, для расчетной схемы получено приемлемое решение от контрольных загружений, можно переходить к решению задачи с реальными загружениями. Результатами статического расчёта схемы являются перемещения узлов схемы по осям *X, Y, Z, UX, UY, UZ* и усилия *N* – продольное, *Q* – поперечное и *M* – изгибающий момент или (напряжения) в сечениях элементов.

Результатами динамического расчёта являются периоды, частоты и формы собственных колебаний для каждого тона, а также инерционные силы и соответствующие им перемещения узлов и усилия (напряжения) в элементах.

Предоставляется возможность получения результатов счёта в виде стандартных и интерактивных таблиц, которые снабжаются необходимой и привычной индексацией. Или в виде мозаик, или эпюр рассчитываемых параметров.

Линейные перемещения положительны, если они направлены вдоль соответствующих осей глобальной или локальной систем координат. Угловые перемещения (повороты) положительны, если они вращают узел против часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующих осей глобальной или локальной систем координат.

4. Расчётные сочетания нагрузок или усилий

В соответствии со строительными нормами расчёт армирования, подбор и проверка металлических сечений производятся по наиболее опасным сочетаниям усилий. Поэтому для дальнейшей работы в подсистемах *“ЛИР–АРМ”* и *“ЛИР–СТК”* нужно производить расчёт *РСУ* или *РСН*.

Вычисление *расчётных сочетаний усилий (РСУ)* производится по критерию экстремальных значений напряжений в характерных точках сечений элементов, на основании правил, установленных нормативными документами (в отличие от вычисления *РСН*, где вычисления производятся непосредственным суммированием соответствующих значений перемещений и усилий в элементах).

Система *РСН* предназначена для вычисления перемещений в узлах и усилий (напряжений) в элементах от стандартных и произвольных линейных комбинаций загружений. Под стандартными линейными

комбинациями подразумеваются комбинации (сочетания), которые установлены нормативными документами. В процессоре *РСН* реализованы следующие нормативы: СНиП 2.01.07-85 (Россия, СНГ), ЕвроКод, ACI 318-95, IBC-2000 (США), BAEL-91 (Франция). При задании произвольных линейных комбинаций величины и знаки коэффициентов не ограничиваются.

Результаты расчета *РСН* могут быть использованы при конструировании элементов, вычислении нагрузок на фрагмент и проверке прочности. В программном комплексе предусмотрено автоматизированное формирование *расчётных сочетаний усилий (РСУ)*.

Вычисление *РСУ* заключается в следующем. В общем случае напряженно-деформированного состояния критерием определения опасного *РСУ* служит экстремум упругого потенциала в какой-либо точке тела при действии на него усилий от многих загружений. В такой постановке легко учитываются особенности напряженного состояния конечных элементов различного типа. Это позволяет значительно сократить количество рассматриваемых *РСУ*, не утратив наиболее опасных из них. Так, например, для стержневых элементов задача выбора РСУ сводится к нахождению экстремальных значений нормальных и касательных напряжений, вычисленных в характерных точках сечения. Поэтому и критериями здесь являются экстремальные напряжения в этих точках сечения.

В *РСУ* реализовано 8 видов загружений, с помощью которых программно обеспечивается их корректная логическая взаимосвязь. При этом существует возможность учёта знакопеременности, взаимоисключения и сопутствия загружений. Каждому из видов загружений присвоен номер: (0) – постоянное; (1) – временное длительное; (2) – кратковременное; (3) – крановое; (4) – тормозное; (5) – сейсмическое; (6) – особое (кроме сейсмического); (7) – мгновенное; (9) – ветровое статическое при учете пульсации ветра.

Программным комплексом автоматически генерируются параметры, соответствующие текущему виду загружения. Однако пользователь может по своему усмотрению изменить любой из параметров. Все операции по формированию *РСУ* выполняются с помощью диалогового окна *“Нагрузки” → “Расчетные сочетания усилий (РСУ)” → “Генерация таблиц РСУ”*. Для назначения параметров использовать *СП* или *СНиП.*

Таблица *РСУ* должна быть составлена для всех загружений, принятых в задаче. Номер загружения устанавливается в первый столбец заполняемой таблицы. Полностью вы её видите в нижней части диалогового окна, а частично – в списке поля *“Коэффициенты для РСУ”*. Параметры *РСУ* включают: *Коэффициенты надежности по нагрузке* γ_f. *Доля длительности* ψ_g. Коэффициент, показывающий, какая часть

нагрузки в рассматриваемом загружении принимается как длительно действующая.

Сопутствующие загружения, имеются в виду загружения (не более двух), которые могут рассматриваться совместно с основным для данного вида загружением. Номером группы взаимоисключающих загружений вводится ограничение на те загружения, которые в одно сочетание не могут входить одновременно. Установленный флажок на *“Учитывать знакопеременность”* означает, следует учесть вероятность изменения знака основного усилия сочетания.

На логические связи между загружениями все же налагаются некоторые ограничения: загружения видов (0) и (3) не могут быть знакопеременными; объединение загружений допускается для видов (1), (2), (7); загружение вида (4) (тормозное) может сопутствовать только загружению вида (3) (крановое); загружения видов (1), (2), (5), (6), (7) могут быть объявлены сопутствующими для загружений (1), (2), (5), (6), (7) в любой комбинации; двойное сопутствие (сопутствие одного и того же загружения двум другим и более не допускается) – никакое сопутствующее загружение не может быть включено в группы объединения и взаимоисключения; допускается вводить до 9 групп объединения или взаимоисключения; динамическое загружение не может быть сопутствующим.

Практическое задание 4. Создать расчётную схему по рис. 4. Ввести в таблицу РСУ четыре загружения: собственный вес, нагрузка от оборудования, снеговая нагрузка, ветровая нагрузка. Все жёсткостные характеристики – по своему усмотрению. Выполнить расчёт.

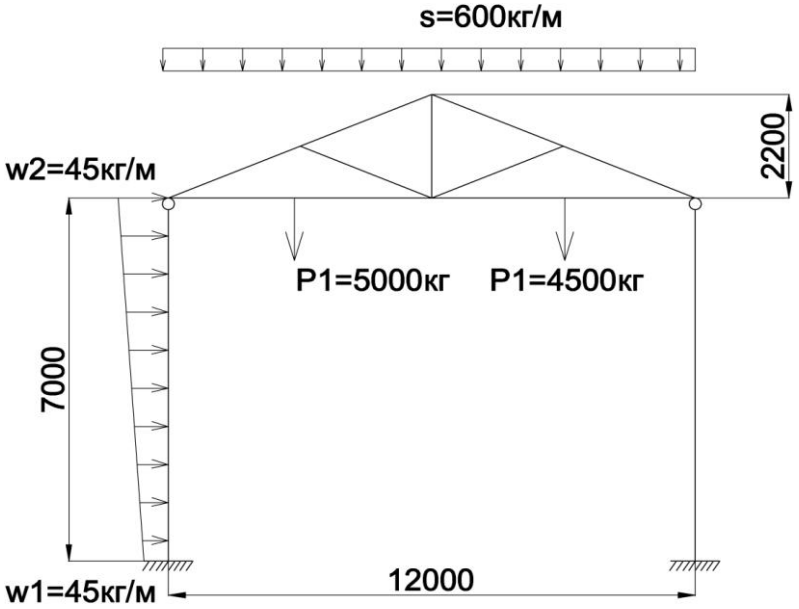


Рис. 4

5. Нелинейный расчёт

Существует несколько вариантов нелинейности – это физическая, геометрическая и совместная геометрическая и физическая нелинейность. Физическая нелинейность использует нелинейные законы деформирования материалов, а геометрическая нелинейность находит формы изначально изменяемых систем. Реализованы законы деформирования различных классов железобетона. При расчётах нелинейных задач производится автоматический выбор шага нагружения с учётом его истории. Возможности процессора позволяют смоделировать поведение сооружения в процессе возведения при многократном изменении расчётной схемы. Также данная функция позволяет оценить предельную нагрузку, при которой произойдёт разрушение конструкции или элемента.

Практическое задание 5. Составить расчётную схему двухпролётной балки, сформировать таблицу моделирования нелинейных загружений. Схема балки и её закрепление показаны на рис. 5. Сечения элементов балки показаны на рис. 6. Материал рамы – железобетон В25, арматура А-III. Загружения балки, распределённое по всей длине, 250 кг/м, и 450 кг/м.

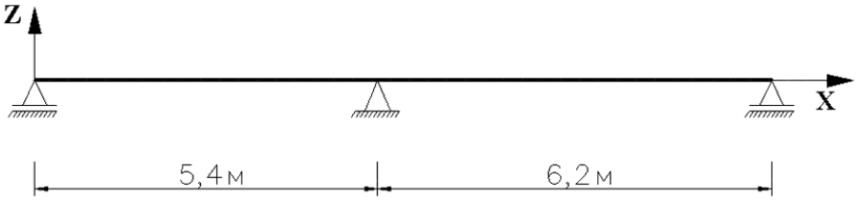


Рис.5. Схема балки

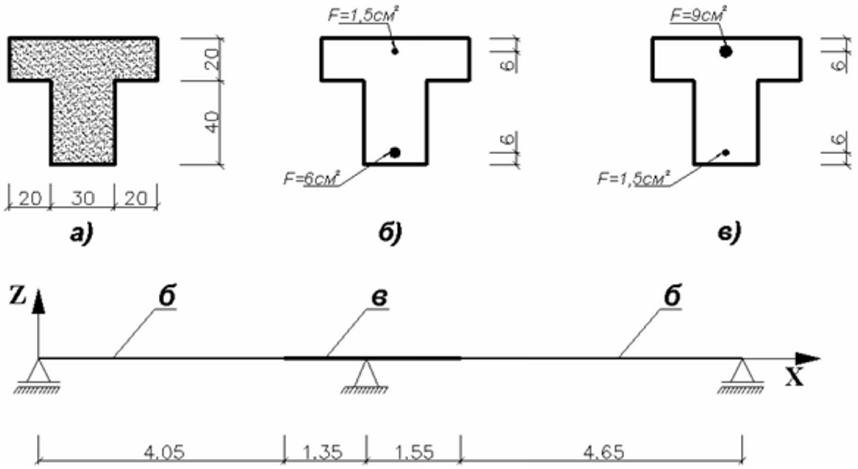


Рис.6: а) размеры сечения; б) пролётное сечение; в) опорное сечение.

При создании расчётной схемы следует разбивать элементы на более мелкие, особенно в тех местах, где будут максимальные усилия. На рисунке 6 жирной линией показан опорный участок.

С помощью меню *“Жёсткости”* → *“Жёсткости элементов”* вызовите диалоговое окно. В этом окне щёлкните по кнопке *“Добавить”* для того, чтобы вывести список стандартных типов сечений. Выберите двойным щелчком мыши элемент графического списка – тип сечения *“Тавр_Т”* геометрические размеры – B = 30 см; H = 60 см; $B1$ = 70 см; $H1$ = 20 см; удельный вес – R_0 = 2.45 тс/м^3.

Далее установите флажок *“Учёт нелинейности”*. Для задания материала щёлкните по кнопке *“Параметры материала”*. Появится диалоговое окно *“Характеристики физической нелинейности основного и армирующего материалов”*. В этом окне, для основного материала, в раскрывающемся списке *“Закон нелинейного деформирования”* выберите «*25 – экспоненциальная зависимость (расчётная прочность)*». В поле ввода *“Характеристики материала”* задайте параметры основного материала (бетона): класс бетона – *B25;* тип бетона – *ТБ.* Далее в этом же окне щёлкните по кнопке *“Армирующий”*. В поле ввода *“Характеристики материала”* задайте параметры: модуль упругости – *E- = 2e7 тс/м*^{2}; модуль упругости – *E+ = 2e7 тс/м*^{2}; предельное напряжение *σ- = -36000 тс/м*^{2}; предельное напряжение *σ+ = 36000 тс/м*^{2}.

Для назначения расположения и площади арматуры в диалоговом окне *“Задание стандартного сечения”* щёлкните по кнопке *“Параметры арматуры”*. Вызывается диалоговое окно “*Характеристики физической нелинейности стержней”*. В этом окне, для выбора арматурных включений, щёлкните по кнопке *“Точечная арматура”*. Задайте параметры арматуры для первого слоя арматуры: площадь арматуры Fa = 6 см^2, координаты привязки y = 0 см; z = 6 см. В раскрывающемся списке *“Номер слоя арматуры”* выберите номер *2*. Задайте параметры арматуры для второго слоя арматуры: площадь арматуры Fa = 1.5 см^2, координаты привязки y = 0 см; z = 54 см. Для выбора типа дробления поперечного сечения щёлкните по кнопке *“Дробление на элементарные полосы”*.

Обязательно нужно произвести смену типа конечных элементов, для этого выберете все элементы балки. Выполните пункт *“Меню”* → *“Схема* → *“Корректировка”* → *“Смена типа конечного элемента”*. В диалоговом окне *“Смена типа конечного элемента”* с помощью курсора выделите строку *Тип 210 – физически нелинейный универсальный пространственный стержневой КЭ.*

Формирование последовательности загружения начинается с пункта *“Меню”* → *“Нагрузки”* → *“Моделирование нелинейных загружений конструкции”*. В этом окне для формирования первого загружения задайте следующие параметры:_№ загружения – *“1”*; в раскрывающемся списке

выберите метод расчёта – *“Простой шаговый (1)”;* в раскрывающемся списке *“Печать”* выберите *“Перемещения и усилия после каждого шага”;* активизируйте кнопку *“Равномерные шаги”* и задайте количество шагов *“5”*. Для формирования второго загружения задайте следующие параметры: номер загружения – *“2”;* установите флажок “*Учёт предыстории”;* в раскрывающемся списке выберите метод расчёта – *“Простой шаговый (1)”;* в раскрывающемся списке *“Печать”* выберите *“Перемещения и усилия после каждого шага”;* активизируйте радио-кнопку *“Равномерные шаги”* и задайте количество шагов – *“30”;*

После выполните расчёт. В нелинейном расчёте возможно формирование и просмотр таблицы сведений о состоянии материала. Для этого нужно вызвать расчетный процессор. Закройте все рабочие окна в системе *“ЛИР-ВИЗОР”*. Выполните пункт *“Меню”* → “*Расчёт”* → *“Расчётный процессор”*. В диалоговом окне *“Параметры расчётного процессора”* щёлкните по кнопке “*Таблицы результатов”*.

В диалоговом окне “*Открыть”* в раскрывающемся списке выберите тип файлов *“Состояние материалов (*_13.*)”*. Выделите файл *“Название файла”*. В шапке таблицы *“Состояние материалов”* имеются такие позиции: (1) – номер цепочки; (2) – номер загружения, при котором произошло разрушение конструкции; (3) – шаг, на котором произошло разрушение конструкции; (4) – суммарный коэффициент нагрузки. (5) – сведения о состоянии материалов.

6. Подбор и проверка сечений в стальных элементах

Подсистема *“ЛИР-СТК”* предназначена для подбора и проверки сечений стержневых стальных элементов в соответствии со *СНиП II.23-81* и *СНиП 2.01.07-85*. Расчёт выполняется на одно или несколько расчётных сочетаний усилий *(РСУ)*, нагрузок *(РСН)* или усилий, полученных из статического расчёта конструкций. Производится подбор и проверка следующих типов сечений: элементы ферм и связей, работающие на центральное сжатие и растяжение; балки, подверженные поперечному изгибу; колонны, подверженные сжатию с изгибом.

Подбор и проверка может производиться в двух режимах: сквозном режиме, в процессе которого производится расчёт для всех указанных пользователем элементов в автоматическом режиме; локальном режиме, в процессе которого пользователь может производить многовариантное проектирование – изменять размеры сечения, менять марку стали, варьировать расстановку рёбер жёсткости и т.п.

Результатами расчёта являются размеры сечений элементов и коэффициент использования несущей способности сечений элементов. Подбор сечений прокатных элементов происходит простым перебором от

наименьшего по площади сечения в порядке возрастания. Таким образом, первое сечение, удовлетворяющее всем проверкам, будет наименьшим.

Для того чтобы начать работу с модулем *“ЛИР–СТК”*, выполните следующую команду: *“Пуск” → “Программы” → “ЛИРА” → “ЛИР-СТК”*, но для этого должна быть рассчитана и сохранена расчётная схема решаемой задачи. Для импорта расчётной схемы выполните пункт меню *“Файл” → “Импорт”*. В диалоговом окне введите имя импортируемого файла.

Старт процесса подбора и проверки сечений можно начинать после назначения дополнительных характеристик для элементов. С помощью *“Меню” → “Редактировать” → “Сечения”* вызовите диалоговое окно *“Жёсткости элементов”*. В этом окне в списке типов жёсткостей выделите одну из строк стального проката, затем щёлкните по кнопке *“Изменить”*. В диалоговом окне *“Стальное сечение”* в раскрывающемся списке – *“Сталь”* задайте марку стали. После этого щёлкните по закладке *“Дополнительные характеристики”* и откройте закладку *“Балка, Колонна, Ферма”*, в которой задайте следующие характеристики в зависимости от назначенного типа элемента.

Балка: установите флажок *“Использовать коэффициент к длине конструктивного элемента”*, задайте коэффициент *Lef* в зависимости от количество раскреплений на конструкционном элементе согласно формуле *l/L*, где *l* – расстояние между раскреплениями, *L* – полная длина конструкционного элемента; для задания вида раскреплений сжатого пояса, установите флажок *“Делят пролет на равные части”*; задайте максимально допустимый прогиб в пределах *(L/250 – L/400)*. *Колонна:* установите флажок *“Использовать коэффициенты к геометрической длине конструктивного элемента”*, в данном случаи задаётся наибольшая длина между раскреплениями относительно оси Z1 и относительно оси Y1; коэффициент φ_b используется для расчёта колонны при внецентренном сжатии. *Ферма:* для начало нужно уточнить, где находится элемент в конструктивной схеме фермы и относительно этого задавать его характеристики..

Конечные элементы, объединённые в конструктивный элемент, при конструировании рассматриваются как единое целое. Между элементами, входящими в конструктивный элемент, не должно быть разрывов, они должны иметь один тип жёсткости, не должны входить в другие конструктивные элементы и унифицированные группы, а также иметь общие узлы и лежать на одной прямой.

Создание конструктивного элемента подразумевает следующие процедуры. Выполните пункт *“Меню” → “Выбор” → “Отметка элементов”*. Для создания конструктивного элемента воспользуйтесь

пунктом меню *“Редактировать” → “Создать конструктивные элементы”*.

Назначение раскреплений в узлах изгибаемых элементов. С помощью пункта *“Меню” → “Редактировать” → “Раскрепления для прогибов”* вызовите диалоговое окно *“Раскрепление стержней”*. В этом окне, при установленных флажках раскреплений – *Y1, Z1,* выберите в раскрывающемся списке строку *“В каждом узле каждого конечного элемента”*.

Подбор и проверка сечений элементов производиться, с помощью *“Меню” → “Расчет” → “Выполнить Расчет”*. В открытом окне, при установленных флажках “*Проверка”* и *“Подбор сечений”* и активной кнопке *“По РСН”* или *“По РСУ”*, получаем изополя процента использования несущей способности подобранного или проверяемого сечения. Следующим этапом является проектирования рассчитанной конструкции при помощи программы *“ЛИР–КМ”*.

Практическое задание 6. Подобрать и проверить сечения элементов конструкции рассчитанной ранее задачи.

7. Подбор и проверка армирования в железобетонных элементах

Подбор арматуры и проверка заданного армирования в стержневых и пластинчатых элементах для различных случаев напряжённого состояния производится при помощи конструирующей подсистемы *“ЛИР - АРМ”*. Расчёт производится в соответствии с нормативными требованиями.

Площади арматуры по первой и второй группе предельных состояний вычисляются по усилиям от отдельных загружений, по расчётным сочетаниям нагрузок *(РСН)* или расчетным сочетаниям усилий *(РСУ)*, полученным в результате расчета конструкции.

Определение армирования осуществляется на базе нормативных данных, которая содержит сведения о расчётных характеристиках арматуры и бетона, диаметрах и площадях арматурных стержней и т.п.

Подбор армирования в подсистеме *“ЛИР-АРМ”* происходит в интерактивном режиме, где задаются дополнительные данные: нормативные и расчётные характеристики бетона и арматуры, назначаются конструктивные элементы, задается унификация элементов и т. п. Расположение арматуры в элементах расчетной схемы организуется согласно разработанным модулям армирования: “*Стержень”; “Балка-стенка”; “Плита”; “Оболочка”*.

Модуль армирования “*Стержень”* предназначен для армирования стержневых элементов, он производит подбор арматуры от следующих

усилий: нормальной силы; крутящего момента; изгибающих моментов в двух плоскостях; перерезывающих сил в двух плоскостях.

Допустимые формы сечения: прямоугольник, тавр с полкой внизу, тавр с полкой вверху, двутавр, коробчатое сечение, кольцо, круг, крестовое сечение, уголок, тавр со смещённой стенкой, полка внизу, тавр со смещенной стенкой, полка вверху. Производится контроль процента армирования. Если превышены 5%, выдается сообщение с рекомендацией увеличить размеры сечения или повысить классы материалов.

По требованию пользователя выполняется расчёт ширины раскрытия трещин. Допускаемая ширина продолжительного и непродолжительного раскрытия трещин задается пользователем. Нулевую ширину раскрытия трещин задавать запрещено.

Предусмотрен признак особых условий работы стержня: обычный стержень; балка; нижние колонны первого этажа многоэтажного каркасного здания; другие колонны многоэтажного каркасного здания.

В общем случае результаты для каждого сечения выдаются в трёх строчках: полная арматура, подобранная по первой и второй группам предельных состояний; арматура, подобранная по первой группе предельных состояний; часть арматуры, обусловленная кручением.

В необходимых случаях печать сопровождается сообщениями об ошибках или предупредительными сообщениями. В выходных таблицах выдаются также проценты армирования, сечения поперечной арматуры в двух направлениях и ширина раскрытия трещин.

Основной алгоритм, реализованный в модуле *“Стержень”*, при подборе арматуры отдаёт предпочтение угловым стержням. Кроме этого, угловые стержни, как правило, устанавливаются по условиям конструирования железобетонного элемента. При проектировании колонн не рекомендуется ограничивать сортамент арматуры, так как при этом алгоритм не будет иметь возможности расположить в углах стержни большого диаметра, что представляется наиболее целесообразным.

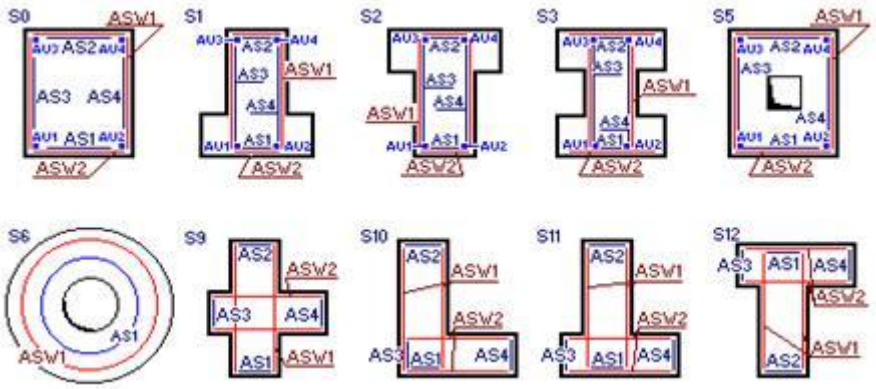


Рис. 7

В результате подбора арматуры выдаются следующие величины (рис. 7): продольная арматура AU1, AU2, AU3,·AU4; угловая арматура·AS1,·AS2,·AS3,·AS4; поперечная арматура (площади поперечной арматуры (см^2), подобранной при шаге хомутов 100 см)·ASW1, ASW2.

Расчёт и конструирование сечений в системе *“ЛИР-АРМ”* начинается с *“Пуск”* → *“Программы”* → *“ЛИРА”* → *“ЛИР-АРМ”* (с этого момента в отдельном окне работает модуль *“ЛИР-АРМ”*). Для импорта расчётной схемы выполните пункт меню *“Файл”* → *“Импорт”* и выделите нужный файл *“Название файла”*. Модуль *“ЛИР-АРМ”* также можно открыть из режима результатов расчета *“ЛИР-ВИЗОР”* с помощью меню “*Окно”* → *“ЛИР-АРМ”*. В этом случае импортирование расчётной схемы производится автоматически.

В *“ЛИР-АРМ”* до начала подбора следует ввести дополнительные данные с помощью меню *“Редактирование”* → *“Задание и выбор материала”*, вызовите диалоговое окно *“Материалы”*. В этом диалоговом окне активизируйте кнопку *“Тип”* и щёлкните по кнопке “*Добавить”*. На экран выводится диалоговое окно *“Общие характеристики армирования”*, в котором задайте следующие параметры: в поле *“Расчётные длины”* отметьте галочку *“Коэффициент расчётной длины”*; задайте параметры *LY, LZ* (аналогично подбору стальных сечений**)**; в раскрывающемся списке выберите модуль армирования – *“Стержень”* (все остальные параметры остаются заданными по умолчанию).

Система возвращается к диалоговому окну *“Материалы”*. В этом окне щёлкните по кнопке *“Назначить текущим”*. В диалоговом окне *“Материалы”* активизируйте радио кнопку *“Бетон”*. Щёлкните по кнопкам *“Добавить умолчание”* и *“Назначить текущим”* (этой операцией по умолчанию принимается бетон класса B25). В этом же окне активизируйте вкладку *“Арматура”*. Щёлкните по кнопкам *“Добавить умолчание”* и *“Назначить текущим”* (этой операцией по умолчанию принимается арматура класса *A-III*). Если вы не согласны с текущими настройками, их можно редактировать.

Назначение конструктивного элемента. Выделите нужные элементы. С помощью меню *“Редактирование”* → *“Назначить конструктивный элемент”* вызовите диалоговое окно *“Конструктивные элементы”*. В этом окне, при активной кнопке *“Балка”* или *“Колонна”*, щёлкните по кнопке *“Подтвердить”*.

Подбор арматуры осуществляется запуском задачи *“Меню”* → *“Режим”* → *“Расчёт арматуры”*. В диалоговом меню *“Расчёт”* активизируйте кнопку *“Расчёт по РСУ”*.

Формирование таблиц результатов подбора арматуры выполняется пунктом *“Меню”* → *“Результаты”* → *“Таблицы результатов”* для выбранных элементов. Для просмотра результатов подбора арматуры в

текстовом формате выполните пункт *“Меню” → “Результаты” → “Текстовые файлы” → “Результаты армирования”*.

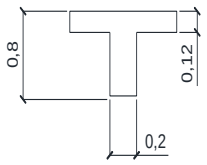
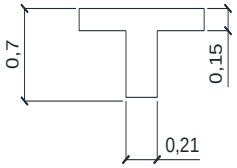
Конструирование железобетонной рамы осуществляется вызовом чертежа балки. Выполните пункт *“Меню” → “Результаты” → “Конструирование балки”*. Укажите курсором на нужный элемент. Выполните полный расчёт балки с помощью меню “*Расчёт”*. Выведите эпюру материалов, воспользовавшись пунктом *“Меню” → “Результаты” → “Эпюра материалов”*. Чтобы посмотреть чертеж балки, выполните пункт *“Меню” → “Результаты” → “Чертеж”*.

Практическое задание 7. Подобрать арматуру в сечении элементов конструкции рассчитанной задачи.

Задание для выполнения расчётно-графической работы

По итогам пройденного курса “Системы автоматизированного проектирования” самостоятельно рассчитать конструкцию и подберите арматуру (рис. 8, табл. 1)

Таблица 1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
q (т/м)	5	7	5,5	6	4,5	6,5	6,3	5,8
L (м)	16	12	13	12	15	17	14,5	10
H_0 (м)	5	7	6,6	6,4	6,2	5,5	7,1	4,6
B	Сами							
S	Сами							
Количество опор	5	4	3	4	3	4	5	3
Количество балок	5	6	5	7	6	5	6	7
L	10	10	8	7	6	8	10	8
Сечение балок								
Ригель	Сечение ригеля 300*300 ☐ Сечение стоек 400*400 ☐				Сечение ригеля 400*400 ☐ Сечение стоек 300*300 ☐			

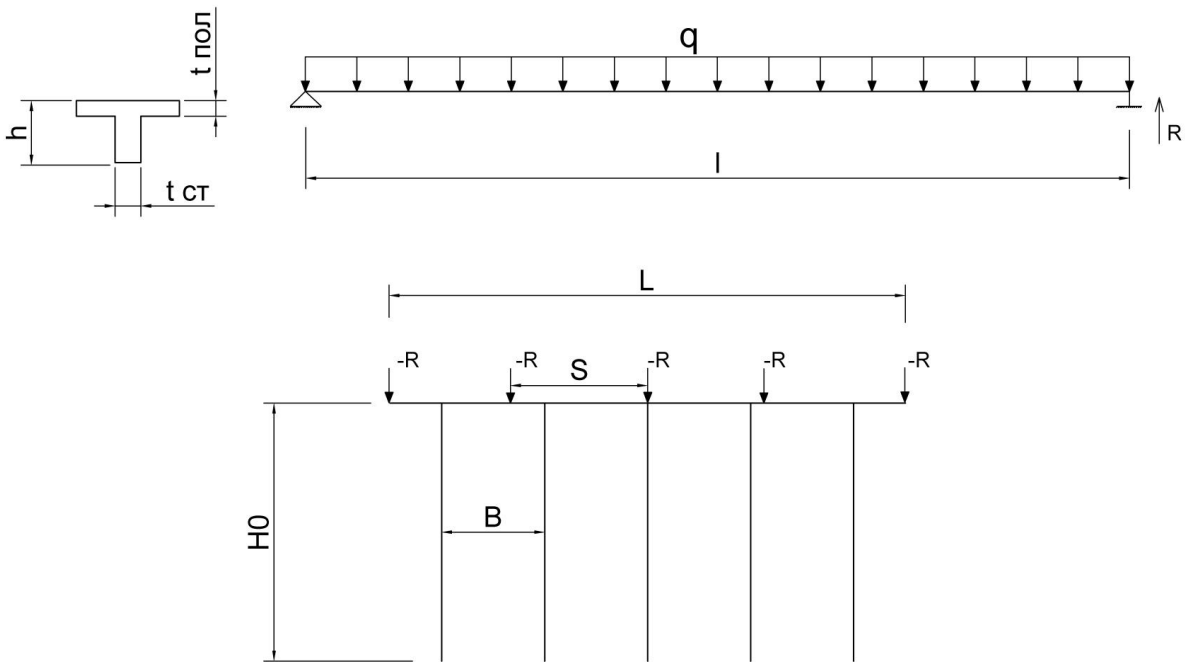


Рис. 8

Список литературы

1. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелец-Стрелецкий Е.Б. и др. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс ЛИРА-Windows. – Киев: Факт, 1997. – 137 с.

2. Варван П.М., Городецкий А.С., Пискунов В.Г. и др. Метод конечных элементов. – Киев: Вища школа, 1981. – 176 с.

3. Барабаш М.С. и др. Современные технологии расчёта и проектирования металлических и деревянных конструкций: учеб. пособие для студентов высших учеб. завед. / под ред. А.А. Нилова – М.: АСБ, 2008. – 328 с.

4. Барабаш М.С. и др. ЛИРА 9.2: учеб. пособие. – Киев: Факт, 2005. – 140 с.

Содержание

Введение	3
1. Принципы построения конечно-элементных моделей	3
2. Нагрузки и жёсткостные характеристики	7
3. Моделирование соединений элементов	9
4. Расчётные сочетания нагрузок и усилий	12
5. Нелинейный расчёт	15
6. Подбор и проверка сечений в стальных элементах	17
7. Подбор армирования в железобетонных элементах	19
Задание для выполнения расчётно-графической работы	22
Список литература	23

Учебное издание

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным занятиям по курсу «Основы систем автоматизированного проектирования (САПР)»
для студентов по направлению подготовки 270800.62 «Строительство», профиль «Автодорожные мосты и тоннели»

Составитель Зиннуров Т.А.

Подписано в печать Формат 60x84/16
Заказ № Печать Усл. печ.л.
Тираж экз. ризографическая Уч.-изд.л.
Бумага офсетная. №1

Издательство Казанского государственного архитектурно-строительного университета
Отпечатано в полиграфическом секторе Издательства КГАСУ
420043, Казань, Зелёная, 1