**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО -
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным занятиям по курсу «Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений»
для студентов по направлению подготовки 270800.62 «Строительство»
профиль 270817.62 «Автодорожные мосты и тоннели» и специальности
270201.65 «Мосты и транспортные тоннели»

Казань
2013

УДК 721.01:624.21:681.3.06
ББК 30.2-5-05
З1

З1. Методические указания к лабораторным занятиям по курсу «Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений» / Сост. Т.А. Зиннуров. Казань: КГАСУ, 2013.- 27 с.

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

В методических указаниях рассматриваются вопросы численного моделирования несущих конструкций мостов, оценки несущей способности, разработки узловых решений. Методические указания предназначены для использования в учебном процессе для студентов по направлению подготовки 270800.62 «Строительство» профиль 270817.62 «Автодорожные мосты и тоннели» и специальности 270201.65 «Мосты и транспортные тоннели».

Рецензент
Доцент кафедры «ОФиИГ», к.т.н. Нуриева Д.М.

УДК 721.01:624.21:681.3.06
ББК 30.2-5-05

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2013
© Зиннуров Т.А., 2013

Содержание

1. Введение стр. 4
2. Лабораторное занятие 1. *Формирование упрощённой расчётной схемы пролётного строения, назначение нагрузки и расчет* стр. 4
3. Лабораторное занятие 2. *Вычисление КПУ для любой балки с помощью МКЭ. Задание собственного веса элементов, покрытия и временных подвижных нагрузок. Процессор РСН* стр. 8
4. Лабораторное занятие 3. *Создание модели промежуточной опоры* стр.12
5. Лабораторное занятие 4. *Моделирование работы сваи в грунте на горизонтальные воздействия* стр. 14
6. Лабораторное занятие 5. *Моделирование пролетного строения с использованием «жестких вставок». Использование «конструктора сечений» для определения геометрических характеристик произвольного сечения* стр. 17
7. Лабораторное занятие 6. *Определение опорных реакций балок. Загружение промежуточной опоры* стр. 19
8. Лабораторное занятие 7. *Моделирование узла опирания балок пролетных строений на опоры. Сборка двух расчетных схем в один файл* стр. 20
9. Лабораторное занятие 8. *Сборка пространственной схемы пятипролетного моста с температурно-неразрезным пролетным строением. Учет совместной работы опор* стр. 24
10. Лабораторное занятие 9. *Изучение системы МОСТ* стр. 25
11. Задание на выполнение расчётно-графической работы стр. 26
12. Литература стр. 26

Введение

Суть методических указаний в том чтобы научиться численно моделировать основные элементы и конструкции транспортных сооружений для этого последовательно решается поставленная задача.

Задача: Построить расчетную схему железобетонного пролетного строения длиной *24 м* и габаритом *Г11.5 2х0.75*, которая выполнено из 8-ми железобетонных балок двутаврового сечения соединенные между собой монолитными участками (Рис. 1).

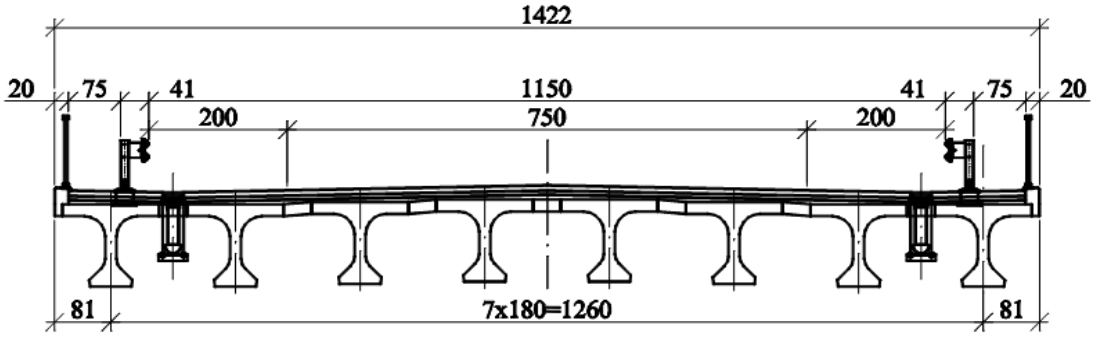

Рис. 1. Поперечное сечение пролетного строения, в см

Четыре пролётных строения, по два с каждой стороны, опираются на железобетонные опоры, выполненные из стоек объединенные ригелем. Стойки опираются на ростверк, который передаёт нагрузку на сваи.

Лабораторное занятие 1

Тема: Формирование упрощённой расчётной схемы пролётного строения, назначение нагрузки и расчет.

Начало моделирования начинаем несущей плиты, выбираем иконку *"Генерация регулярных фрагментов и сетей"*, в ней четвертая вкладка → *"Генерация плиты"*. Принимаем, что ось пролетного строения направлена вдоль глобальной оси *X*, тогда во вкладке *"Генерация плиты"* → *"Шаг вдоль первой оси"* – это разбивка пролета вдоль оси *X*, → *"Шаг вдоль второй оси"* – разбивка поперечника по *Y*. Обязательно нужно, чтобы ось пролетного строения была направлена вдоль глобальной оси *X*, иначе не будет работать система построения линий влияния «*МОСТ*».

Расчетную схему разбиваем с шагом *0.5 – 2* метров. В нашем случае расчетный пролет балки длиной *24 м* составляет *23.4 м*, площадки опирания

по *0.3 м* в расчете пролета учитывать не будем. Разобьем пролет вдоль на 20 равных частей по *1.17 м*. Поперечное сечение разбиваем так, чтобы между осями балок было четыре пластинчатых КЭ (конечных элемента), среднюю часть разбиваем на *28* элементов по *0.45 м*, консоли будут составлять *0.81 м* (Рис. 1, 2).

Далее устанавливаем стержневые КЭ, моделирующие балки. Выбираем иконку *"Добавить элемент"* → *"Добавить стержень"*, и проводим стержни там, где должны находиться оси балок, для этого щелкаем один раз на первой узел и на последний узел (Рис. 2).

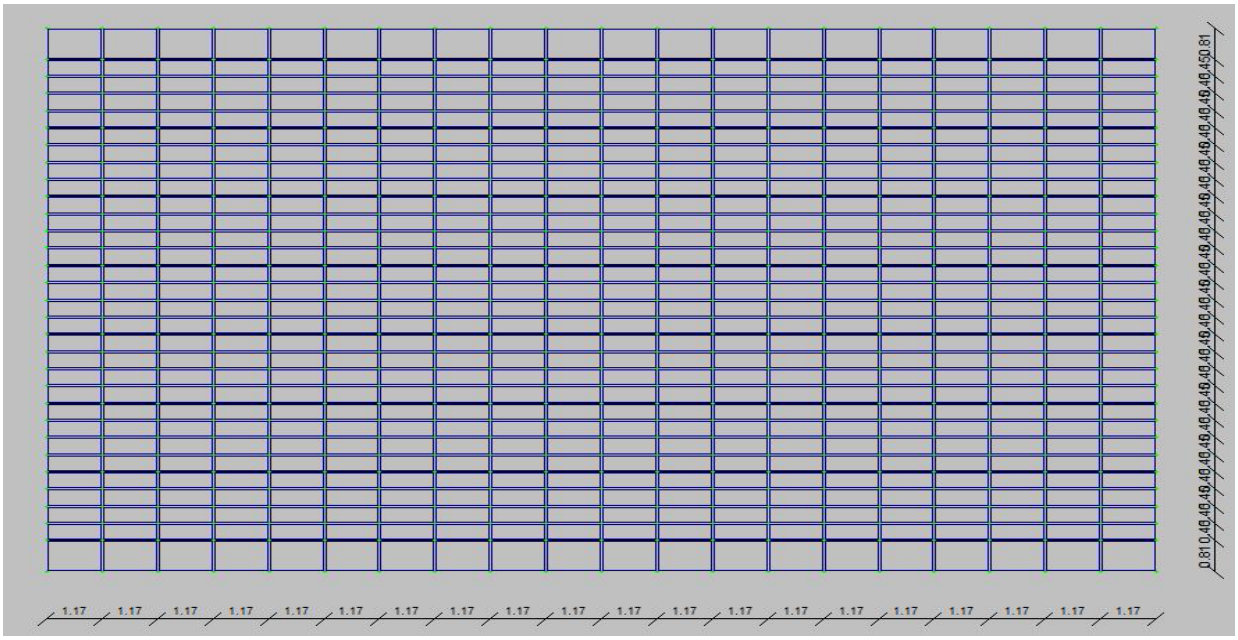

Рис. 2. Разбивка пролетного строения на конечные элементы.

После создания геометрической модели назначаем поперечные сечения и физические характеристики КЭ, *"Жесткость"* → *"Жесткости элементов"*, → *"Добавить"*, для задания характеристик плиты выбираем третью вкладку → *"Пластинчатые, объемные, численные"*. Выбираем → *"Пластины"* и задаем следующие характеристики КЭ – плиты проезжей части: модуль деформации $E=3e6$ *т/м*^{2}, коэффициент Пуассона $V=0.18$, толщина плиты $H=18$ *см*, нормативная плотность $R_0=2.45$ *т/м*^{3}.

Геометрические характеристики балок пролетного строения. Для этого возвращаемся в меню *"Жесткости"* → *"Жесткости элементов"* → *"Добавить"*, для задания характеристик балки выбираем первую вкладку → *"Стандартные типы сечений"* → *"Двутавр"*. Параметры балки $E=3e6$ *т/м*^{2}, $B=16$*см*, $H=123$*см*, $B1=59$*см*, $H1=26.5$*см*, (ширина верхнего пояса – с

учетом монолитных участков, т.е. равна шагу балок) *B2=180см, H2=18см,* R_0*=2.45 т/м*^{3}.

Теперь следует назначить соответствующие типы жесткости элементам. Для этого выделяем нужный тип жесткости и щелкаем по нему два раза, не закрывая вкладку *“Жесткости элементов”*, выделяем пластинчатые элементы и назначаем им тип жесткости *“Пластина H18”,* стержневым элементам *“Двутавр 10х120”*.

Итак, жесткости назначены, расчётная схема пробрела физический смысл. Чтобы посмотреть, правильно ли собран пролет, заходим в меню *“Вид”* → *“Пространственная модель”* (Рис. 3). Для того чтобы посмотреть сечения, нажимаем иконку → *“Показать сечения элементов”*.

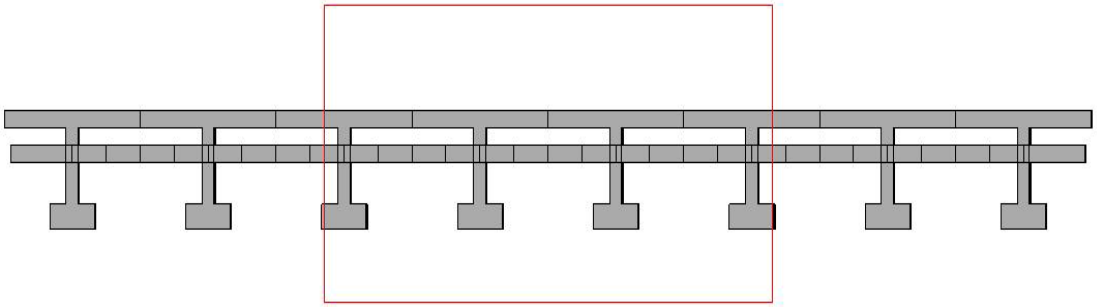

Рис. 3. 3D модель

На пространственной модели, (Рис. 3) видно, что плита проходит по центру балок, потому что в ПК «ЛИРА», все элементы объединяются по центрам тяжести. Это условное упрощение расчетной схемы – совместную работу балок в поперечном направлении обеспечивает плита, проходящая по центрам тяжести балок. На точность расчета это не повлияет. Чтобы не произошло повторного учета плиты, для нее просто не задается нагрузка *“Собственный вес”*. Плита также перераспределяет нагрузку между балками, на нее будем назначать временную нагрузку и нагрузку от мостового полотна. Убедившись, что все сделано правильно, следует выполнить *“Схема”* → *“Корректировка”* → *“Упаковку схемы”*, чтобы исключить дублирующие узлы и элементы

Следующим этапом задаем граничные условия, то есть условия опирания пролета. Для расчета усилий в элементах пролетного строения не обязательно задавать опорные части очень точно (учитывать упругие свойства *РОЧ*, это понадобиться при расчете опор). В нашем случае примем, что с одного края установлены на линейно-подвижные опорные части, с другого

стороны на линейно-неподвижные опоры. Выделяем опорные узлы балок с одного края пролета, выбираем иконку *“Схема” → “Связи”*, устанавливаем галочки на *x, y, z,* с другого края то же самое только галочки устанавливаем на *y, z*.

Чтобы выполнить расчет, зададим произвольно расположенную нагрузку, напоминающую *“НК-100”*. Задавать можно как на узлы, так и на элементы, пока для упрощения зададим на узлы. Выделяем по четыре узла в середине пролёта, отступив от правого края семь КЭ, а потом ещё шесть КЭ (Рис. 4), затем нажимаем на иконку *“Нагрузки” → “Нагрузки на узлы и элементы” → “Нагрузка на узел” (красный)*. В разделе → *“Тип нагрузки”* выбираем первую иконку *“Нагрузка на узел”*, вводим значение *25 т* и жмем галочку. Нагрузка установлена. Приступаем к расчету, для чего нажимаем кнопку *“Режим” → “Выполнить расчет”*.

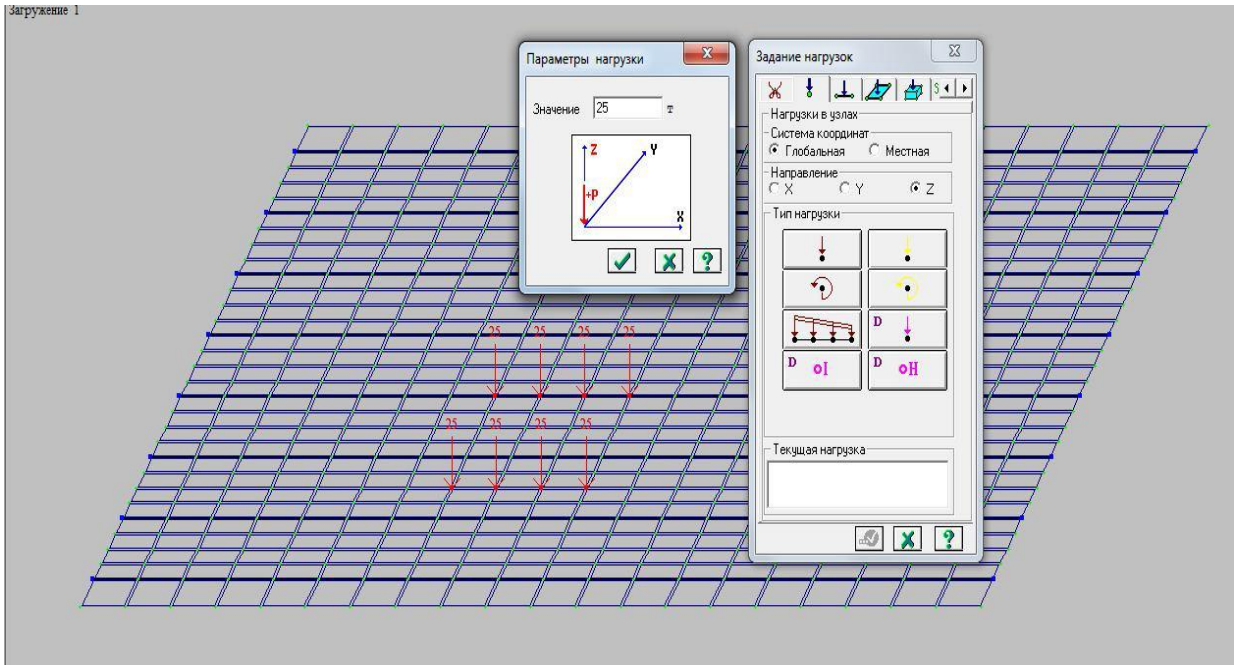

Рис. 4. Нагрузка “НК-100”

После расчета программа автоматически возвращается в исходное окно, заходим в окно с результатами *“Режим” → “Результаты расчета”*. Теперь можно посмотреть эпюры изгибающих моментов в балках, нажав соответствующие кнопки *“Усилия” → “Эпюры”*.

Задание: Определить максимальные значения изгибающего момента, поперечной силы и продольной силы в балках пролётного строения.

Лабораторное занятие 2

Тема: Вычисление КПУ для любой балки с помощью МКЭ. Задание собственного веса элементов, покрытия и временных подвижных нагрузок. Процессор РСН.

Коэффициенты поперечной установки (КПУ) для середины пролета *i*-той балки с использованием МКЭ можно рассчитать следующим образом. В середине пролета балки, для которой нужно построить поперечную линию влияния (КПУ), устанавливается нагрузка P_i произвольного значения, и рассчитываются моменты в каждой балке и суммарный момент. Ордината КПУ η под каждой балкой вычисляется по формуле (Рис. 5):

$$\eta_j = \frac{Mj}{\sum Mj}; \qquad \sum M_j = \frac{Pil}{4},$$

где *i* – номер балки, для которой вычисляется КПУ и на которой в середине пролета стоит нагрузка *Pi; j* – номера балок в пролете от 1 до n; l – расчетный пролет балки.

Расчет КПУ с помощью ПК «ЛИРА» может, выполнен для выяснения невыгодного расположения нагрузки поперек пролета для каждой конкретной балки. Этот расчет близок к методу упругих опор, однако видно, что гораздо менее трудоемкий и не ограничен по количеству балок в поперечном сечении. Для выполнения данной работы следует выполнить *“Выбор” → “Информация об узле или элементе”* указать на центральные элементы балок пролётного строения и в появившемся окне выписать значения изгибающего момента.

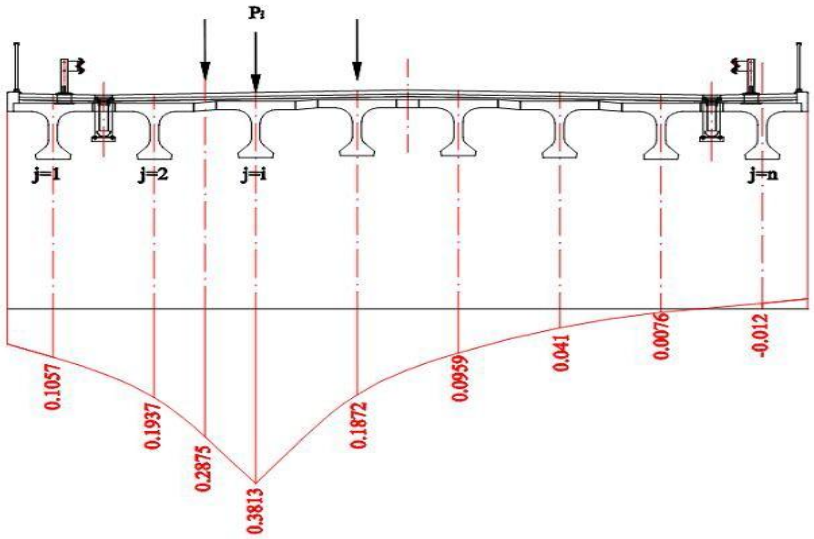

Рис. 5. КПУ пролётного строения

Задание: Построить КПУ для всех балок пролётного строения (лабораторное занятие 1).

На следующем этапе выполняем расчет пролетного строения на действие постоянных и временных нагрузок, установленных вручную в середине пролета. Чтобы каждый раз не искать середину пролета, удобно обозначить ее осью. Для этого выбираем вкладку *“Схема”* → *“Строительные оси и отметки”*, переименовываем ось и последовательно щелкаем на нужные узлы.

Для установки сосредоточенной нагрузки (будет описана установка *“НК-100”*, с нагрузкой *25 т/ось* или *12.5 т/колесо*) не в узлы, а в требуемое место на распределительной плите, для этого воспользуемся удобным инструментом *“Нагрузка-штамп”*. При задании сосредоточенной нагрузки на пластину между ее узлами, требуется указать значение сосредоточенной силы и две координаты – привязка к первому узлу пластины. Координаты требуют вычисления и отнимают много времени. Ниже будет показано, как этого избежать.

Заходим в “*Меню”* → *“Нагрузка-штамп”*, выбираем вторую вкладку → *“Нагрузка по линии для пластин”*. Данный инструмент позволяет расположить сосредоточенную нагрузку с равным шагом, на пластинах по линии между двумя так называемыми “висячими” узлами, то есть узлами, которые не принадлежат ни одному элементу.

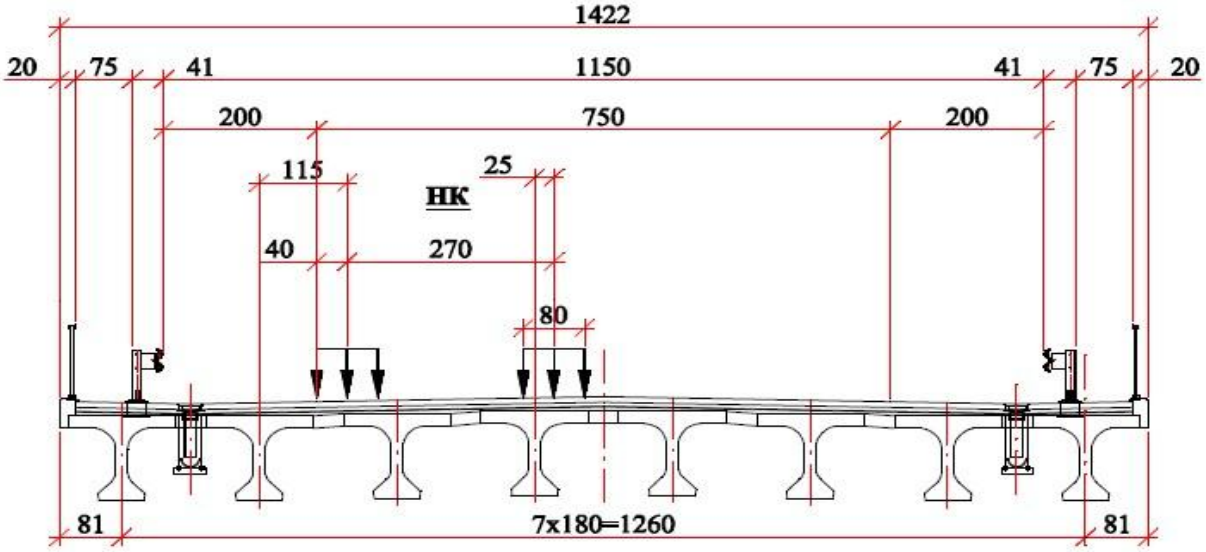

Рис. 6. Нормативное положение нагрузки НК на поперечнике.

Итак, виртуально располагаем третье колесо нагрузки *“НК-100”* по оси 1-1, поэтому один “висячий” узел расположен правее оси 1-1 на *1.2+0.6=1.8м*, а другой – левее на *1.2*2+0.6=3м* (Рис. 7). От крайних сосредоточенных сил нужно отступать на половину *“шага триангуляции”*. Расположение нагрузки поперек пролета устанавливаем согласно рисунку 6.

Смысл *“Нагрузки-штамп”* – это приведение равномерно-распределенной нагрузке к линии сосредоточенных сил, таким образом если в окне *“Шаг триангуляции”* поставить 1 м, то указанное в окне *“Интенсивность”* значение нагрузки будет установлено с шагом 1 м. У нас же требуемый шаг *1.2 м,* поэтому, чтобы сила *P* равнялась 10 т, в графе *“Интенсивность”* надо поставить значение *10/1.2=8.33 т/м*.

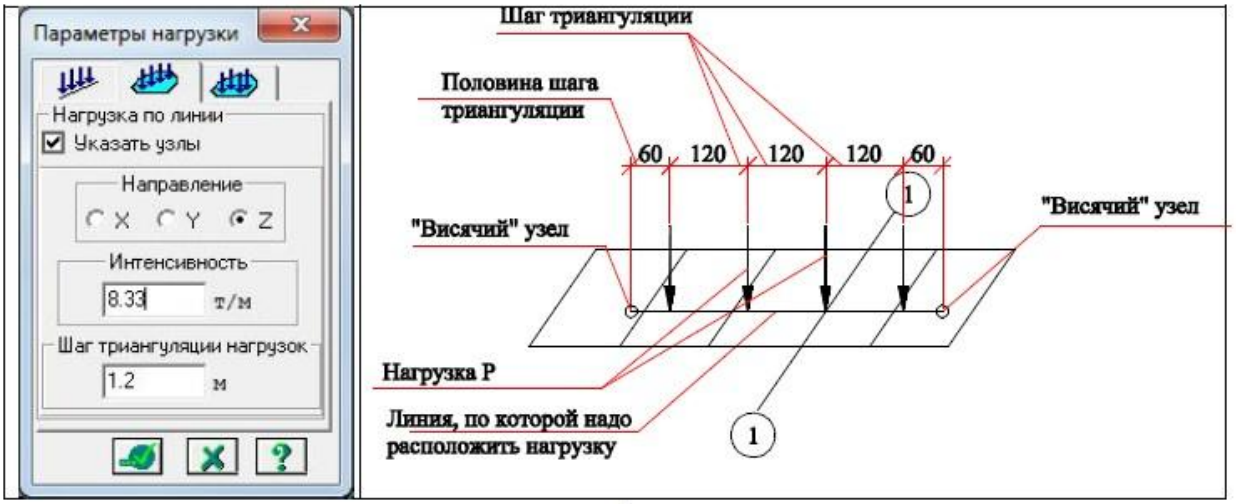

Рис. 7. Меню нагрузка-штамп.

Итак, заходим в *“Меню” → “Выбор загружения”* и переименовываем с *“Загружение 1”* на *“НК-100”*. Теперь нужно установить “висячие” узлы таким образом, чтобы между ними правильно встали колеса *“НК-100”* (Рис. 6). Выделяем узел в середине пролета второй балки, и копируем его по оси *X* вправо *“Схема” → “Корректировка” → “Копировать выбранные объекты”* со знаком «+» по *dx* на *1.8 м*, и влево – на *3 м.* Получились два “висячих” узла на расстоянии *4.8 м* друг от друга, расположенные таким образом, чтобы нагрузка от линии колес *“НК-100”* была расположена вдоль пролета. Теперь их нужно перенести на *1.15 м* по оси *У* вправо к середине поперечного сечения *“Схема” → “Корректировка” → “Переместить выбранные объекты”* со знаком «+» по *dy* на *1.15 м*. Согласно рисунку 6, вторая линия колес *“НК-100”* находится в *0.25 м* от оси четвёртой балки в сторону середины пролета, но также мы знаем, что колея *“НК-100”* составляет *2.7 м*, поэтому просто эти два узла скопируем на *2.7 м* по оси У.

Нажимаем “*Отмена выбора”*, и видим “виртуальную площадку”, в которой будет стоять нагрузка *“НК-100”*. Далее устанавливаем нужные значения в *“Меню” → “Нагрузка-штамп” → “Нагрузка по линии”*, без предварительного выделения узлов проводим сначала одну линию вдоль оси моста, щелкаем применить; потом так же – вторую линию. Нагрузка установлена. Предварительно сохранившись, удаляем уже ненужные *“висячие”* узлы, в *“Меню” → “Упаковка схемы”* ставим флажок *“Висячие узлы”* и выполняем упаковку.

Переходим в *“Загружение 2”*, и задаем нагрузку от тележек *“АК14”*, затем в других загружениях задаем равномерно-распределенную части *“АК14”*, толпу и т.д. Аналогичным образом ставятся тележки *“АК14”*. *“Шаг триангуляции”* здесь будет *1.5 м*, а значение *“Интенсивность”* составит *7/1.5=4.667 т/м*, где *7 т* – нормативная нагрузка на колесо *“АК14”*.

Установка равномерно-распределенной части нагрузки производиться по всей длине пролёта, поэтому *“висячие”* узлы устанавливаются по торцам пролета. Интенсивность *0.7 т/м* (*0.6*0.7* – для второй полосы *“АК14”*, коэффициент полосности). У тележек и равномерно-распределенной части нагрузки *“АК14”* разные коэффициенты надежности и динамичности, задавать нагрузку от тележек и равномерную следует в разных загружениях.

Задание: Назначить нагрузку *“АК-14”* и нагрузку от толпы на тротуары.

Следующий этап – назначение постоянных нагрузок это вес покрытия и вес несущих конструкций. Их также задаем по отдельности, так как их коэффициенты надежности отличаются. Есть информация о приведенном поперечном сечении и нормативной плотности балок пролетного строения, поэтому задать собственный вес следующим образом. В отдельном загружении выделяем балки и в *“Меню” →* “*Нагрузки”* выбираем → *“Добавить собственный вес”*. Необходимо поставить галочку *“Выделенные элементы”*, иначе собственный вес добавится и на плиту и произойдет двойной учет ее веса.

Для назначения равномерно-распределенной по площади нагрузки от веса покрытия переходим в новое *“Загружение”*, выделяем плиту и задаем предварительно вычисленное значение веса мостового полотна. Нагрузка от толпы задаётся равномерной по площади тротуара. После того, как нагрузки на пролет заданы, выполняем расчет. В результатах расчета мы сможем посмотреть усилия в разных загружениях.

Расчёт предполагает рассматривать сочетания нагрузок, следует воспользоваться инструментом *“Усилия”* → *“РСН”*. Составляем собственные сочетания → *“Сочетания пользователя”*.

Задание: Составить расчётное сочетание нагрузок. Определить максимальные значения изгибающего момента, поперечной силы, продольной силы для балок в различных сочетаниях согласно своду правил.

Лабораторное занятие 3

Тема: Создание модели промежуточной опоры.

Создадим модель стоечной опоры на двух рядном свайном ростверке из десяти метровых забивных свай *35х35 см*. Опора предназначена под два 24 – метровые раздельных пролетных строения по 8 балок в каждом. Создаем плиту ростверка аналогично процессу создания плиты пролётного строения, причем разбивка плиты привязывается к шагу свай: вдоль оси опоры расположено 16 свай с шагом *1.65 м*, свесы ростверка от осей крайних свай составляют *0.425 м* (Рис. 8). Шаг свай разделим на два, чтобы потом удобнее было расставлять стойки. То же самое – поперек оси опоры, только там свесы по *0.5 м* и шаг свай *1.6 м*.

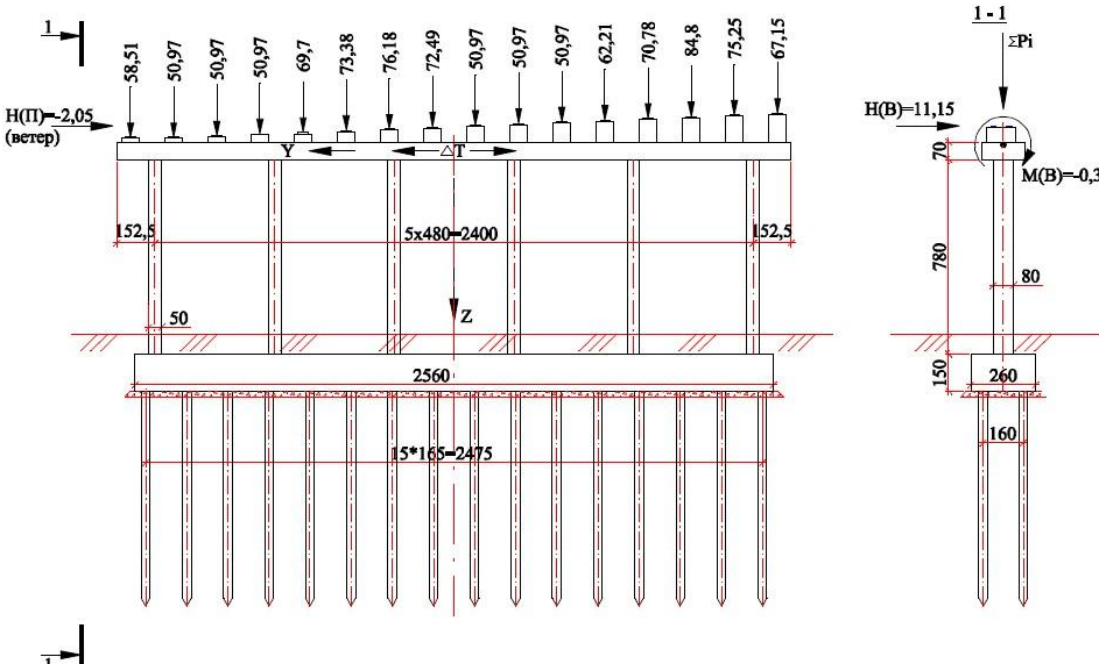

Рис. 8. Модель стоечной опоры.

Теперь расставим стойки, начнем с того, что установим одну стойку с самого края ростверка. Для этого скопируем соответствующий узел вверх на:

$$H=H_{стойки}+1/2H_{ростверка}+1/2H_{ригеля}=8.9\ м.$$

После этого между рассматриваемыми узлами проводим стержневой элемент *“Схема”* → *“Корректировка”* → *“Добавить элемент”*. Теперь нужно его передвинуть на расстояние (*25.6 м – 24 м)/2=0.8 м* от края ростверка (Рис. 8). Переместить его нельзя, так как при этом переместится нижний узел, принадлежащий плите ростверка, поэтому следует его копировать на *0.8 м* вправо, а потом удалить исходный стержень. Выделяем стержень, нажимаем на иконку *“Отметить узлы, принадлежащие отмеченным элементам”*. Копирование и перемещение элемента без принадлежащих ему узлов невозможно, узлы можно выделить и вручную, как обычно и копируем на *0.8 м*. Чтобы впоследствии случайно не удалить узел, принадлежащий ростверку, вместе с примыкающими элементами, следует нажать *“Отмена выбора”*.

Количество стоек 6 штук, шаг стоек *4.8 м* (Рис. 8). Поэтому выделяем крайнюю стойку вместе с узлами и копируем ее вправо на *4.8 м* пять раз – получается расстановка стоек. Следует обратить внимание, что пока стойки не соединены с ростверком, так как объединение элементов производится исключительно в узлах. Для соединения стоек и ростверка нужно “пододвинуть” ближайшие узлы ростверка к нижним узлам стоек.

Для этого: 1) С помощью *“Отметки узлов”* выделяем узел, который будет перемещаться; 2) Выбираем *“Перемещение объектов”* и заходим во вторую вкладку → *“Перемещение по одному узлу”*; 3) Флажок *“Указать узлы перемещения”* установлен автоматически; 4) Щелкаем сначала по выделенному узлу, а потом по тому узлу, в который надо переместить (в данном случае справа, нижний узел стойки). Произошло перемещение узла ростверка и появилось предупреждение, не обращаем внимания.

Производим те же действия для всех шести стоек, после каждой стойки нажимая, “*Отмена выбора”* иначе узел предыдущей стойки переместится вместе с узлом той стойки, с которым вы работаете в настоящий момент. После того, как все стойки правильно состыковались с ростверком, требуется выполнить *“упаковку схемы”*.

Теперь необходимо расставить сваи, так как ростверк уже разбит под расположение сваи, перемещать узлы не нужно. Сначала следует смоделировать низ ростверка, к которому будет жестко крепиться свая. Толщина ростверка *1.5 м*, а конечно-элементная модель ростверка расположена в его центре тяжести, поэтому соответствующий узел копируем вниз на *0.75 м*. Затем узел, который моделирует стык сваи и низа ростверка,

скопируем вниз 10 раз по одному метру. Длина сваи 10 м, разбивать ее следует по метру для последующего моделирования совместной работы сваи с грунтом. Стержень проводится от центра тяжести ростверка до низа сваи – одна свая готова. Затем эту одиночную сваю скопируем по всему ростверку. Для этого выделяем ее вместе с узлами, выбираем *"Копирование"*, вторая вкладка → *"Копирование по одному узлу"*, также как и при перемещении узлов должна стоять галочка *"Указать узлы копирования"*, щелкаем на узел стыка сваи и ростверка и щелкаем в те узлы, где должны стоять сваи. Выполняем упаковку схемы, чтобы сваи окончательно объединились с ростверком.

Ригель можно создать, скопировав узел первой стойки влево на *1.5 м*, а последней вправо, и проведем между узлами стержень. Назначаем жесткости, как было описано на предыдущих занятиях, размеры элементов на рисунке 8.

Вызываем пространственную модель, на которой видно, что стойки расположены немного неправильно, широкая сторона (*80 см*) должна располагаться поперек оси опоры, а она повернута на *90* градусов. Это подтверждается, когда во *"Флагах рисования"* устанавливаем флажок → *"Местные оси стержней"* видно, что стержни расположены с поворотом на *90* градусов, и следует в *"Жесткости элементов"* поменять местами *В* и *Н*.

Задание: Разбить ригель на КЭ согласно опирания балок пролётного строения, используя *"Схема"* → *"Корректировка"* → *"Добавить элемент"* четвертая вкладка → *"Разбить стержень на N частей"*.

Лабораторное занятие 4

Тема: Моделирование работы сваи в грунте на горизонтальные воздействия.

ПК «ЛИРА» позволяет довольно быстро и точно смоделировать работу сваи в грунте согласно **СП 50-102-2003** приложение Д.

Сваю удобно разбивать по 1 м (верхний элемент – это заделка сваи в ростверк толщиной *1.5 м*, соответственно его длина равна *0.75 м*). Нижний узел сваи закрепляем по вертикали (для более точного расчета свайного ростверка необходимо еще ввести шарнир (податливость) по глобальной оси *Z* (местной оси стержня *X1*) с жесткостью, равной несущей способности, деленной на осадку, но в рамках курса это не рассматривается).

Задаем коэффициенты постели по боковой поверхности сваи $C=K*z/y_c$. Для любых мостовых конструкций y_c=3. В **СП 50-102-2003** формула отличается, нет y_c, но *К* сразу уменьшен втрое. Для примера рассмотрим грунт с коэффициентом пропорциональности $K/y_c = 1500/3= 500$ *т/м*^{4}. Тогда для

первого от подошвы ростверка элемента длиной 1 м (выделен на рисунке 9, элемент выше моделирует заделку в ростверк), для его средней части, находящейся от расчетной поверхности грунта, в нашем случае – это низ ростверка на глубине *0.5 м*, коэффициент постели $C=0.5*500=250т/м^3$.

Коэффициент постели *С* учитывает глубину расположения рассматриваемой площадки грунта, поэтому он характеризует, *какое усилие следует приложить к 1м^2 грунта, чтобы переместить его по направлению действия силы на 1 м*. Для грунта, окружающего первый от подошвы ростверка элемент, к одному м^2 грунта следует приложить *250 т*, чтобы переместить его по горизонтали на 1 м.

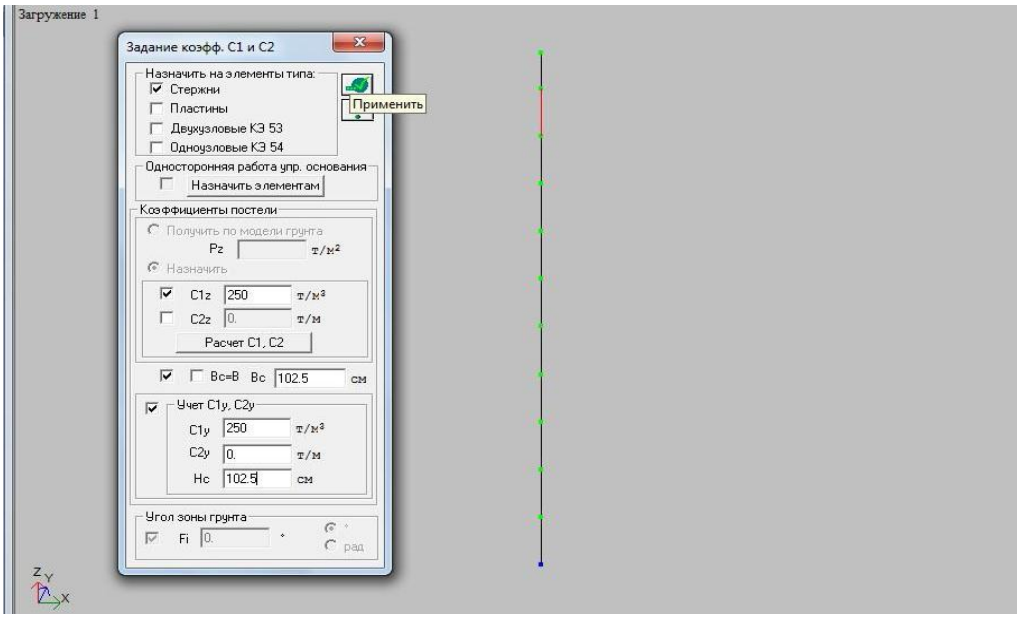

Рис. 9. Назначение коэффициентов постели

На рисунке 9 показано, какие характеристики и в какой последовательности следует задавать: Заходим в *“Жёсткости”* → *“Коэффициенты постели”*. Поставить галочку *“Стержни”*, убрать галочку с *Bc=B* – согласно **СП 50-102-2003** приложение В, расчетная ширина сваи больше фактической (в нормативах обозначается как *bp*). В ПК «ЛИРА» *Bc* и *Hc* – это и есть расчетная ширина сваи по местным осям стержня *У1* и *Z1* (осям, перпендикулярным оси стержня). Для свай с шириной менее *0.8 м* $bp=1.5d+0.5=1.5*0.35+0.5=1.025$ *м* – для сваи *35х35 см*.

Поставить галочку *“Учет C1y, C2y”* – это значит, что раз мы рассчитываем пространственную модель (признак схемы 5), то должны учитывать работу грунта по обеим местным осям. Вводим те же характеристики – *C1y=C1z*, *Hc=Bc*. *C2z* и *C2*y моделируют трение вдоль

боковых поверхностей и тоже могут быть заданы, но это лишнее.

Задаем также для последующих стержней – удобно не закрывать окно, а просто менять в нем значения *C1y* и *C1z* и галочкой назначать на соответствующие стержни, выделение которых при этом снимается. После задания коэффициентов постели всем элементам сваи, зададим на голову сваи произвольные горизонтальную нагрузки и выполним расчёт (Рис. 10).

Повторим для всех свай ростверка (лабораторное занятие 3). Для этого оставим в рабочем окне только сваи, начиная от подошвы ростверка. Выделяем сваи, правая кнопка мыши *“Фрагментация”*. Закрепляем основания всех свай по *Z* (для удобства работы принят вид на опору сбоку – *YZ*).

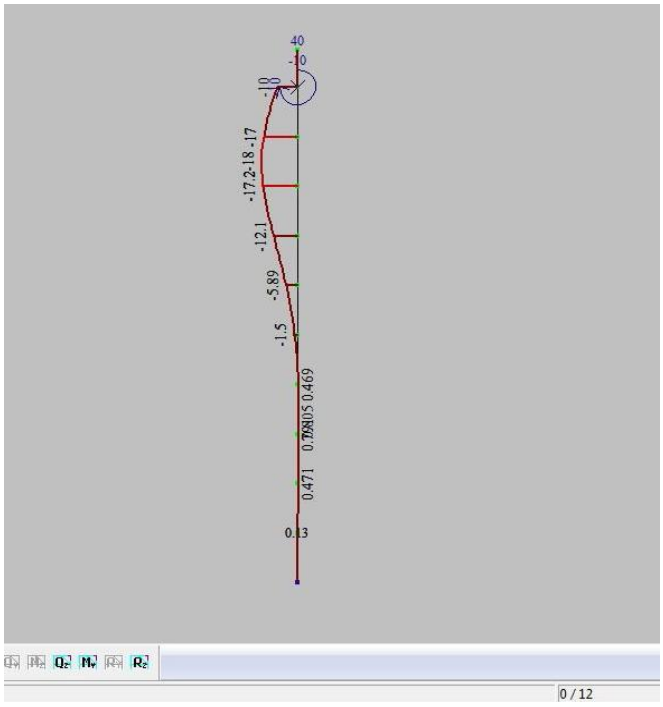

Рис. 10. Эпюры моментов в свае.

Щелчок правой кнопкой мыши *“Восстановление конструкции”*, чтобы визуализировать всю конструкцию в рабочем окне.

Пластинчатые КЭ ростверка имеют малые размеры в плане и большую толщину – *1.5 м*. Для более корректного расчета ростверка (учет сдвиговой составляющей), необходимо переназначить их тип – вместо КЭ-пластины, назначить им тип КЭ толстой оболочки. С помощью *“Полифильтра”* выделяем КЭ - пластины, в стороне щелкаем правой кнопкой мыши и нажимаем кнопку *“Схема”* → *“Корректировка”* → *“Смена типа КЭ”*. Выбираем *КЭ* 47 для пластинчатых элементов.

Задание:. В первом загружении задать опорные реакции от собственного веса балок согласно расположению балок на ригеле, во втором загружении принять все реакции по *30 т* и в третьем загружении назначить поперечный удар *10 т*. Выполнить расчет, проанализировать результаты

Лабораторное занятие 5

Тема: Моделирование пролетного строения с использованием «жестких вставок». Использование «конструктора сечений» для определения геометрических характеристик произвольного сечения.

“Жесткая вставка” разделяет центры тяжести плиты и таврового сечения на определённое расстояние, таким образом, моделируется реальная модель. Для вычисления длины жесткой вставки воспользуемся программой «ЛИР - КС». Плита моделируется пластинчатым КЭ, тавр – стержнем. Изгибающий момент в приведенной двутавровой балке равен:

$$M=N*e+M_{стержень}+M_{плита}, \qquad (1)$$

где N – продольная сила в стержне, e – длина жесткой вставки, а момент в плите надо умножить на шаг балок, так как он дается на 1 п.м. плиты.

Для вычисления длины жесткой вставки, надо знать расстояние между центрами тяжести плиты и таврового стержня. В «ЛИР - КС» выберем параметрическое задание стандартного железобетонного сечения и зададим параметры нашей тавровой балки: высота *H=105см*, нижний пояс *B1xH1=59x26.5 см*, ребро *B=16* см, но без верхнего пояса (Рис. 13).

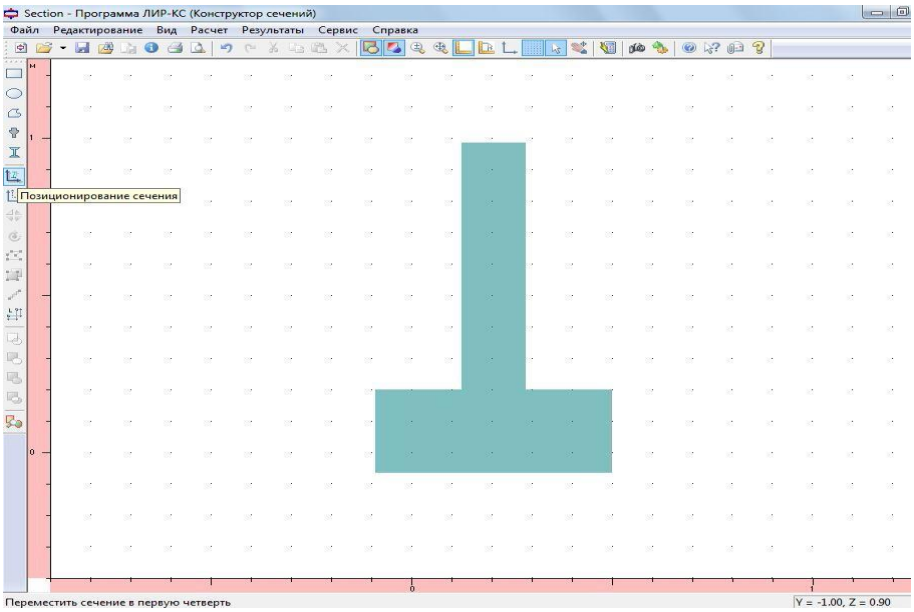

Рис. 11. Рассчитываемое сечение.

Правильно рассчитать положение центра тяжести, надо чтобы оси координат проходили через нижнюю грань сечения. Для этого надо выполнить *“позиционирование сечения”* – в левой колонке шестой сверху значок. Видно, что теперь оси координат начинаются в левом нижнем углу сечения. Затем нажимаем запуск расчета *“Значок калькулятора”*, и вводим характеристики деформативности сечения. После нажатия *“Подтвердить”* будет выполнен расчет.

Появляется окно с геометрическими характеристиками сечения. Их много, но в данный момент нас интересует расстояние от нижней грани до центра тяжести – *36.64 см*. Конструктор сечений наглядно выдает положение центра тяжести и соответственно главных осей инерции, рисует эллипс инерции и ядро сечения. При расчетах сложных нестандартных сечений это может очень пригодиться.

Зададим смоделированное в «ЛИР - КС» сечение при помощи стандартного сечения *“Тип жесткости” – тавр* высотой *105 см*, моделирующий нижний пояс и ребро балки, а потом заменить заданный ранее для балок тип – *двутавр* – на этот *тавр*. Для этого: с помощью *“Полифильтра”* выделяем тип жесткости – *двутавр 16х123*; в *“Меню” → “Жесткости элементов”* делаем текущим → *Тавр* (тип 4) и назначаем его выделенным элементам.

Выделяем балки с уже новым типом жесткости и выбираем в *“Меню” → “Жесткие вставки стержней”*. В появившемся окне вводим значение длины жесткой вставки по местной оси стержня *Z1* для обоих узлов. Знак «-» означает, что стержень подвешивается снизу к плите, а значение длины равно *(105-36,64=68.36 см* – расстояние от центра тяжести тавра до верхней грани) *+18/2* (расстояние до центра тяжести плиты толщиной *18 см*) = *77.36 см* вводим *0.774 м* (Рис. 12).

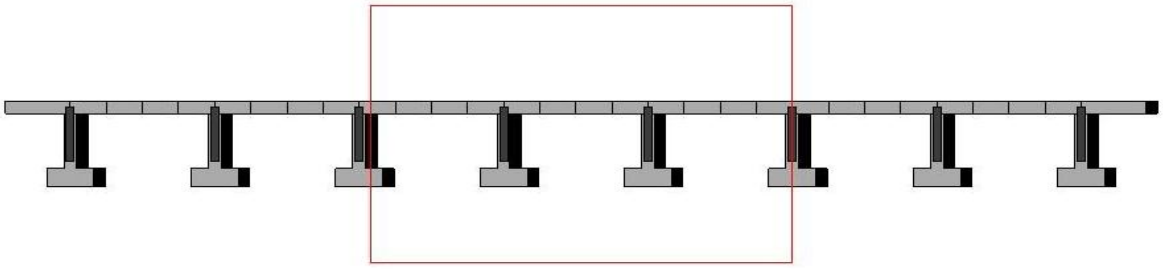

Рис. 12. Пролетное строение в 3D.

Также важной особенностью жестких вставок является то, что на такие элементы нельзя задавать автоматически собственный вес. Для исправления

некорректного задания нагрузки от собственного веса удаляем его и назначаем на стержни равномерно-распределенную нагрузку *1.515 т/м*, поставив галочку *“Исключить жесткие вставки”*. Нагрузку на плиту можно задать автоматически, выделив ее и в задании нагрузки от собственного веса включить кнопку *“Назначить на выделенные элементы”*.

После выполненного расчета видно, что НДС стержня кардинально изменилось. Расчет момента в балке нужно вести по формуле (1).

Задание: Сравнить результаты расчёта с данными лабораторного занятия 1

Лабораторное занятие 6

Тема: Определение опорных реакций балок. Загружение промежуточной опоры.

В ПК «ЛИРА» вертикальные реакции балок на опору можно получить, если в опорные узлы ввести так называемые одноузловые КЭ (*КЭ 51* с направлением связи по Z). Чтобы получить и горизонтальные реакции, надо ввести повторно *КЭ 51*, но уже с горизонтальным направлением связи. Выделяем все опорные узлы и добавляем туда *КЭ-51*. Теперь выделяем эти *КЭ-51* и назначаем им соответствующую жесткость. Зададим этому КЭ большую (*1e9 т/м*^{2}) жесткость, чтобы смоделировать жесткое опирание.

Не нужно забывать удалять с опорных узлов то направление связи, по которому у нас введены одноузловые КЭ (вертикальное, z). Для этого выделяются все опорные узлы и во вкладке *“Связи в узлах”* выбирается → *“Удалить связи”* и соответствующее направление. Горизонтальные связи остаются.

Задание: Определить опорные реакции от различных положений нагрузки *“АК, НК”*. Согласно рассмотренному в первой части принципу, требуется самостоятельно разобрать случаи расположения временной нагрузки на раздельных пролетных строениях. Выполнить расчет по перечисленным четырём типам загружения и записать значения опорных реакций. Найденные опорные реакции нужно прикладывать на ригель промежуточной опоры в местах опирания балок (см. расчетную схему лабораторное занятие 3).

Так как на опору опираются два пролетных строения, опорные реакции одного пролета от постоянных и равномерно-распределенных нагрузок следует умножать на два. Для установления опорных реакций для каждой из нагрузок *“Усилия”* → *“Усилия на узловых КЭ”* → *“Rz”*. ПК «ЛИРА»

значение опорной реакции со знаком «-» означает направление вниз, сжатие. Для удобства задавать нагрузку на ригель, «+» будет означать вниз, а «-» – вверх, то есть отрыв опорной части (Рис. 13).

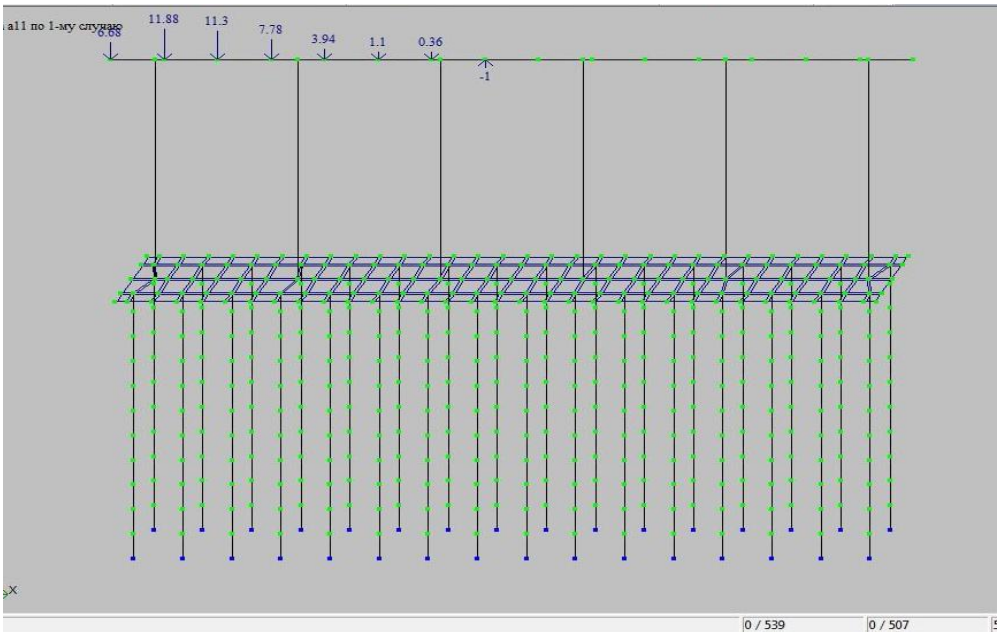

Рис. 13. Опорные реакции от полосовой нагрузки "А14"

Вводим дополнительное загружение – *Поперечный удар*. Действует в направлении ригеля, и используется только в сочетании нагрузкой *"АК"* Согласно п.6.19 **СП 35.13330**, поперечный удар равен максимальному значению из равномерно-распределенной нагрузки интенсивностью *0.04К т/м* – при сопряжении над опорой двух *24*-метровых пролетов, *Р=0.5*0.04К*(24+24)=10.56 т* – стандартный сбор нагрузок с каждой половины пролета;

Задание: Выполнить расчет и проанализировать результаты изменения усилий в ригеле, в опорах и в сваях.

Лабораторное занятие 7

Тема: Моделирование узла опирания балок пролетных строений на опоры. Сборка двух расчетных схем в один файл.

Опирание балки на ригель моделируется абсолютно жестким стержнем, опущенным из центра тяжести плиты совместно с балкой (Рис. 14). Одним

концом он будет прикреплен к пролётному строению, другим будет моделировать резиновую опорную часть.

Жесткость *РОЧ* на сдвиг получается из формулы:

$$Sh/\delta=(AG)/a.$$

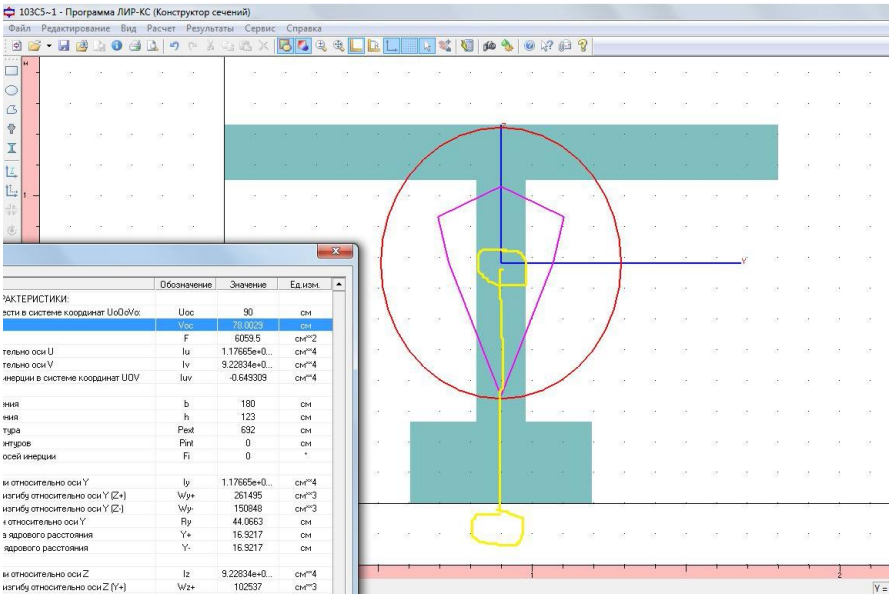

Рис. 14. Поперечное сечение балки

Физически это горизонтальное усилие, которое следует приложить к верху *РОЧ*, чтобы сдвинуть верхнюю грань относительно нижней на *1 м*. Проводим из конечного узла балки абсолютно жесткий стержень длиной *0.78 м*. Задаем в нижнем узле этого стержня следующие шарниры: шарниры на поворот относительно местных осей этого стержня *Y1*, *Z1* (глобальных осей *Y* и *X*). Шарниры должны обладать горизонтальной податливостью, для *РОЧ 30см*40см*7.8см* (из резины *НО-68-1*, с суммарной толщиной слоев резины 6 см, с модулем сдвига $G=110\ т/м^2$ для температуры *-30*): $(AG)/a = (0.3*0.4*110)/0.06 = 220\ т/м.$

Для абсолютно жесткого стержня зададим следующие жесткостные характеристики: $E=1*10^{12}\ т/м^2$, $B=10\ см$, $H=10\ см$, $Ro=0{,}01\ т/м^2$.

На ригель нужно установить два смежных пролета, при этом нужно учитывать эксцентриситеты опирания вдоль оси моста и возвышение относительно центра тяжести ригеля, создавая так называемые “жесткие треугольники”, которые соединяют пятку балки в точке опирания с центром тяжести ригеля.

Согласно приведенной схеме на рисунке 15, высота жесткого треугольника составит *0.23+0.35=0.58 м*, расстояние между точками опирания балок –

*0.3*2+0.05=0.65 м*. После того, как собран один узел опирания, копируем его на все балки.

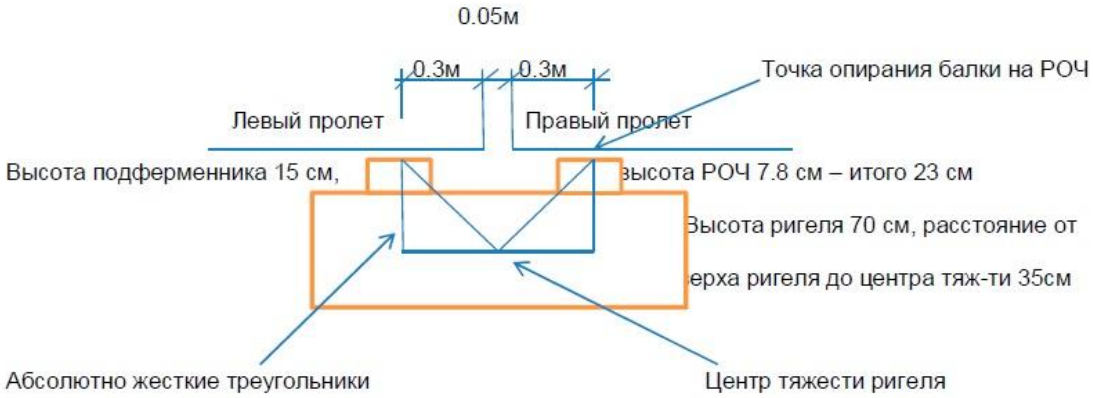

Рис. 15. Схема опирания

Теперь смоделируем два раздельных пролетных строения, опирающихся на одну опору. Для этого скопируем пролет по оси X (продольной оси моста) на *24,05 м*, где лишние *5 см* зазор между торцами балок, по оси *У* – на *14,4 м*. Затем вместо численных значений реакций балок смоделируем реальное опирание пролетов на промежуточную опору (Рис. 16).

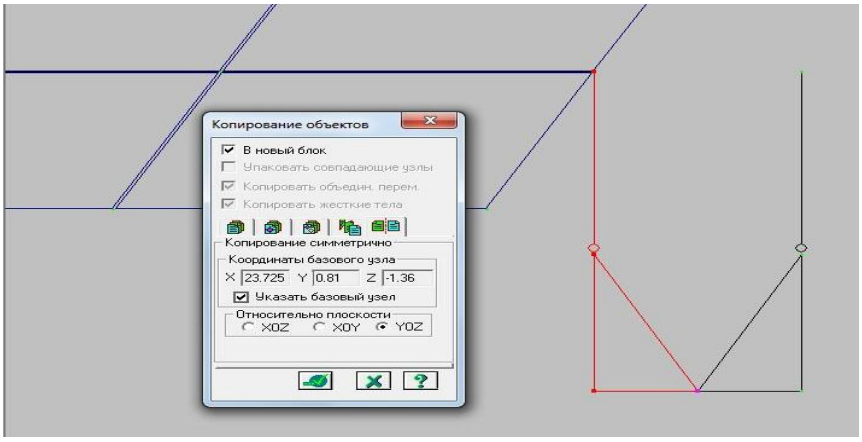

Рис. 16. Схема опирания балок на опоры.

С опоры надо удалить все нагрузки во всех загружениях. Для этого, во-первых, надо развернуть схему опоры на 90 град относительно вертикальной оси. Выделяем всю схему и в меню *“Схема”* → *“Корректировка”* → *“Перемещение объектов”* выбираем четвертую вкладку → *“Перемещение поворотом”*. Ставим вокруг оси *Z* и значение – *90 град*. Базовым узлом выбираем крайний левый узел ригеля. Для того, чтобы

собрать две пространственные схемы в одну, нужно, чтобы в обеих были три базовых узла, составляющих одинаковые треугольники. В опоре скопируем крайний узел ригеля влево на *1* м, а в пролетах также скопируем узел опирания, который соответствует крайнему узлу ригеля, на то же расстояние. Чтобы собрать схемы, нужно в *“Меню”* → *“Окно”* → *“Упорядочить все”*, и тогда обе схемы оказываются открытыми в разных окнах на одном экране (естественно, предварительно нужно открыть оба файла, из которых делается сборка).

Щелкаем мышью в окне файла “4 пролета”, затем иконку *“Схема”* → *“Сборка схем”*. Появляется следующее окно, в котором надо поставить галочку *“Присоединяемая схема”* и *“Сборка в пространстве”*. Должна стоять и галочка *“Указать узлы”*, и мы последовательно указываем узлы ‘базовых треугольников’. Они последовательно и подсвечиваются – первый малиновым, второй желтым, третий бирюзовым цветом.

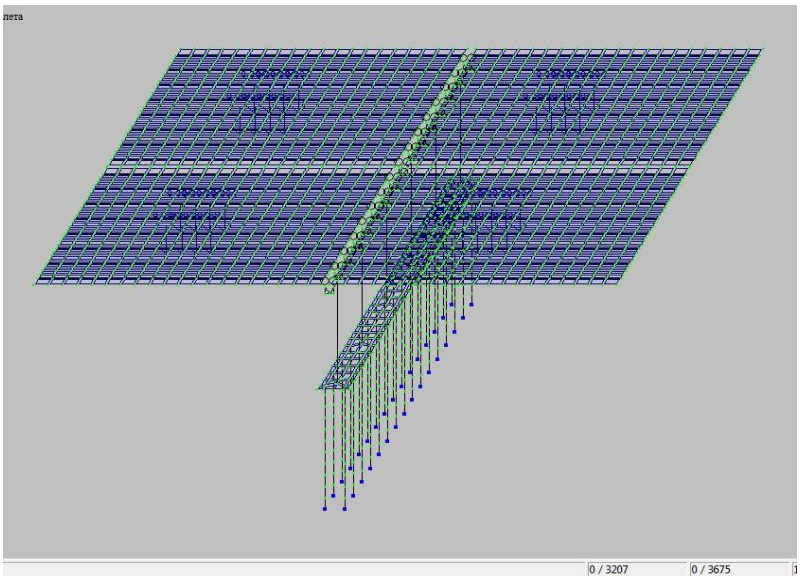

Рис. 17. Пролётные строения совместно с опорой

После того, как выделили базовые узлы присоединяемой схемы, переходим в окно базовой схемы – щелчком мыши внутри этого окна. При вызове функции *“Сборка схем”* там автоматически установится галочка – *“Базовая”*, выставляем кнопки *“В пространстве”*, *“Масштаб 3D”* и выделяем узлы “базового треугольника” в той же последовательности нажимаем *“Собрать”* (Рис.17).

После сборки выполнить упаковку, и удалить лишние – *“НК-100”* может быть только одна на сооружении – три из четырёх удаляем с помощью кнопки *“Удаление нагрузок”*.

Далее выделяем опоры и добавляем собственный вес на конструкцию. Концы пролетов, не опирающиеся на опору, следует закрепить от вертикальных перемещений. Корректируем *таблицу РСН* и выполняем расчет.

Задание: Анализ полученных результатов

Лабораторное занятие 8

Тема: Сборка пространственной схемы пятипролетного моста с температурно-неразрезным пролетным строением. Учет совместной работы опор.

Создаем схему температурно-неразрезной цепи *5х24* на основе прошлой задачи – одиночной опоры, на которую опираются два *24*-метровых пролета. Выделяем один пролет с узлами опирания на ригель, опору, и копируем их *6* раз на *24,05 м*. Корректируем схему. Во-первых, удаляем все ограничения по связям в пролетах, выделяем все узлы пролетов, нажимаем иконку *"Связи"* и выбираем → *"Все"*. Теперь подчищаем схему, оставив 5 пролетов. Обязательно выполнить упаковку.

Для создания ТНПС делаем фрагментацию, чтобы остались только балки. В ПК «ЛИРА» смоделировать ТНПС в соответствии с классическим пониманием этого термина (совместное восприятие пролетами только горизонтальных продольных перемещений) удобно с помощью инструмента *"Схема"* → *"Объединение перемещений"*.

В соответствующем окне ставим галочку «*X*» – будут объединены перемещения по X, выделяем одну пару соседних узлов – концов балок, нажимаем галочку. И так последовательно делаем для всех пар узлов. Последовательно объединяем узлы, не закрывая окно. Задаем нагрузку – температурное расширение. Выделяем балки и плиту пролетных строений, в *"Меню"* → *"Нагрузки"* → *"Нагрузки на узлы и элементы"* → *"Нагрузок на стержни"* выбираем → *"tср °С"* и задаем параметры: перепад температур 60°, коэффициент линейного расширения для железобетона *1е-5*.

Выскакивает предупреждение, что для пластин эта нагрузка запрещена – ничего, переходим в следующую вкладку → *"Нагрузка на пластины"* и выбираем → *"Перепад температур во всех направлениях"*. Вводим данные в соответствии с формулами пояснения – в нашем случае нет разницы между температурой сверху и снизу пластины.

Задание: Произвести расчёт и проанализировать результаты. Построить плоскую расчётную схему и выполнить аналогичный расчёт.

Лабораторное занятие 9

Тема: Изучение системы МОСТ.

Используем предыдущую лабораторную работу. Для начала нужно удалить все нагрузки кроме нормативной нагрузки от собственного веса плиты, балок (без учёта жёстких вставок) и настила. Система «*МОСТ*» позволяет построить линии влияния от временных нагрузок, а также определить усилия и перемещения. Заходим во вкладку *“Схема”* → *“Линии влияния”*.

Первой задается базовая линия движения, расположенная по самому правому по ходу движения краю моста. Для этого выделяем нужные узлы. Необходимо создать не менее двух линий движения единичной нагрузки.

По результатам прохода единичной нагрузки будут строиться поверхности влияния, которые затем будут загружены временной подвижной нагрузкой. В общем случае, чем больше линий движения, тем лучше. Рекомендуется дополнительно к первой линии движения ввести линии движения по каждой балке.

Задание подвижной нагрузки *“АК”*. Коэффициент прочности *1.314*, коэффициент выносливости *1.0*, распределённая нагрузка *1.43*, коэффициенты сосредоточенной нагрузки прочности *1.314*, выносливости *1.27*. Осевые нагрузки: привязка 0 – нагрузка *14.3*, привязка 1.5 – *14.3*.Заполняем вкладку привязки. Задание привязок подвижной нагрузки *“АК”* поперек моста, то есть расстояние от первой линии движения единичной нагрузки до соответственно первой и второй осей полос движения нагрузки *“АК”*. Также согласно **СНиП 2.05.03-84*** задаются коэффициенты полосности *S1*.

Аналогично *“АК”* задаётся *“НК”* по **СНиП** (коэффициент прочности *1.1*, сосредоточенная нагрузка *25 т* через каждые *1.2 м*). Назначение приведенной к линейно-распределенной нагрузки от пешеходов. Коэффициент прочности *1.2*, распределённая нагрузка и её привязка задаётся в зависимости от размеров тротуара.

Далее задаёмся списком узлов, в которых необходимо по второму предельному состоянию вычислить перемещения (поворот опорных сечений и прогиб в середине пролета) и списка элементов, в которых необходимо вычислить усилия.

После выполнения расчета по стандартной схеме для вызова результатов расчета в системе «*МОСТ*» в *“Меню”* → *“Окно”* выбираем → *“Таблицы системы МОСТ”*. Для получения усилий в заданных элементах сначала выбираем узлы или элементы (все или выбранные), для которых будут составляться таблицы, затем формат файла, затем выбираем папку и имя файла, нажимаем *“Создать”*, после выполнения → *“Просмотр”*.

Задание: Вычислить максимальный изгибающий момент для наиболее нагруженной балки по формуле (1).

Задание на выполнение расчётно-графической работы

По итогам пройденного курса моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений самостоятельно смоделировать пролётное строение с параметрами таблицы 1.

Таблица 1

Группа	Пролёт	Габарит	Сечение балки
1	24	Г9 2х1	двутавр
2	20	Г9 2х1.2	тавр
3	18	Г8 2х1.5	двутавр
4	22	Г9 2х0.8	тавр
5	17	Г10 2х16	двутавр
6	19	Г9 2х2	двутавр
7	23	Г10 2х1	прямоугольник

Литература

1. Ю.В. Гунзерский Ю.В. и др. ЛИРА 9.4. Примеры расчёта и проектирования. Киев: НИИАСС, 2006. – 124с.
2. И.Г. Овчинников, Е.А. Козырева, Р.Б. Гарибов. Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений. Учебное пособие. Саратов: СГТУ, 2005. – 242 с.
3. М.С. Барабаш и др. ЛИРА 9.2 Учебное пособие. Киев: Факт, 2005. – 106 с.
4. www.avkozlov83.narod.ru/ssilki Расчёт мостов с использованием ПК «ЛИРА».

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным занятиям по курсу «Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений»
для студентов по направлению подготовки 270800.62 «Строительство» профиль 270817.62 «Автодорожные мосты и тоннели» и специальности 270201.65 «Мосты и транспортные тоннели»

Составитель Зиннуров Т.А.

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

Издательство КГАСУ
420043, Казань, Зелёная, 1