

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ЛИРА В ПРОЕКТИРОВАНИИ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

д.т.н. Городецкий А. С., к.т.н. Гераймович Ю. Д., инж. Кекух А. Н.

ГНИИАСС Минстроя Украины  
г. Киев, Украина

Развитие современного градостроительства характеризуется не только возведением высотных зданий и сооружений, но и строительством мостов (путепроводов, виадуков, эстакад). Мостов проектируется и строится все больше, а сами мосты становятся конструктивно все сложнее. Поэтому возрастает необходимость анализа пространственных моделей мостов со сложной геометрией, с реальными свойствами материала, с учетом взаимодействия конструкций с основанием. При выполнении проектирования, основой надежного моста является не только хорошая нормативная база, но и качественно выполненные расчеты [1].

Всем этим требованиям соответствует современный программный комплекс ЛИРА (ПК ЛИРА (<http://www.lira.com.ua>)), разработанный в Государственном институте НИИАСС и применяемый в практике проектирования в большинстве организаций Украины, во многих организациях СНГ и странах Европы (Франция, Голландия, Турция, Литва, Латвия, Эстония). Начиная с версии ПК ЛИРА 9.2 в состав поставки входит система МОСТ, предназначенная для расчета мостовых конструкций. Система МОСТ расширяет возможности проектировщика, автоматизирует многие этапы его деятельности, делает возможным, в короткие сроки, выполнить многовариантное проектирование, что в конечном счете способствует созданию более удачной конструкции моста.

В качестве примера, демонстрирующего возможности ПК ЛИРА, рассмотрим гипотетический автомобильный стальной мост через водную преграду (реку) с пролетом арки 300 метров (рис. 1). Арочные мосты с ездой понизу, к которым относится рассматриваемый мост, удачно вписываются в городскую архитектуру, и кроме того арочные мосты наиболее жесткие из конкурирующих прочих типов (балочных, ферменных, висячих и вантовых) мостов [1]. Расчетная схема представлена пространственной моделью (согласно п. 1.37, [2] – конструкции пролетных строений мостов, как правило, следует рассчитывать как пространственные).

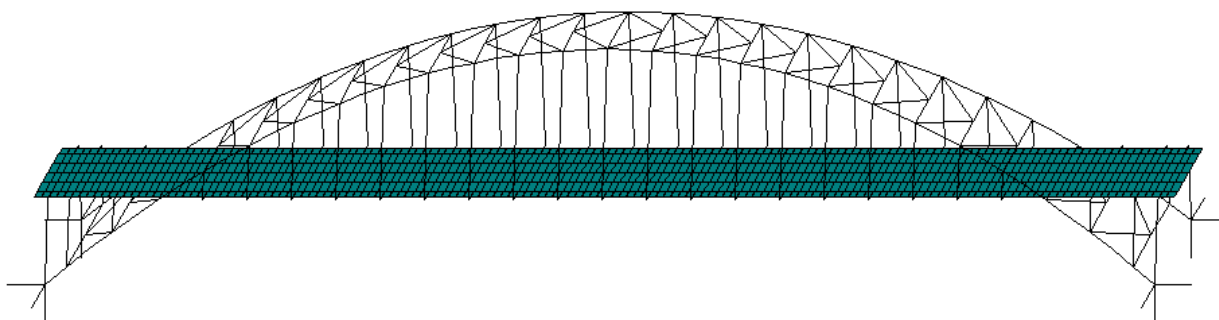


Рис. 1. Расчетная схема автомобильного металлического моста через реку.

Пролетное строение представляет собой арку, поддерживающую на наклонных канатах балку жесткости проезда. На пролетном строении с каждой стороны предусмотрены тротуары и четыре полосы движения по две в каждом направлении. Ширина балки жесткости 18.5 м. Ширина поднятых над проезжей частью тротуаров  $3 \cdot 0.75 = 2.25$  м. Пролетное строение прямолинейное в плане.

Процесс построения расчетной схемы не рассматривается, хотя хочется заметить, что он не является тривиальным – корректировка расчетной схемы может осуществляться не один раз в зависимости от получаемых результатов предварительных расчетов, включая и расчет на подвижные нагрузки.

После создания расчетной схемы рассчитываемого моста задаются базовые линии движения, описывающие полотно моста – линии (список узлов) по которым будет прокатана единичная нагрузка, так называемая топология (рис. 2). Базовая линия движения, заданная первой считается также правым краем моста, т.е. от нее в дальнейшем будут задаваться привязки подвижных нагрузок поперек моста. Реализованы два способа задания линий движения: при помощи привязки к краю моста и при помощи задания списка узлов. Первая базовая линия движения задается только при помощи списка узлов. Для выбранных расчетных узлов и элементов по данным базовым линиям движения будут построены опорные линии влияния – поверхности влияния получают линейной интерполяцией между опорными линиями влияния.

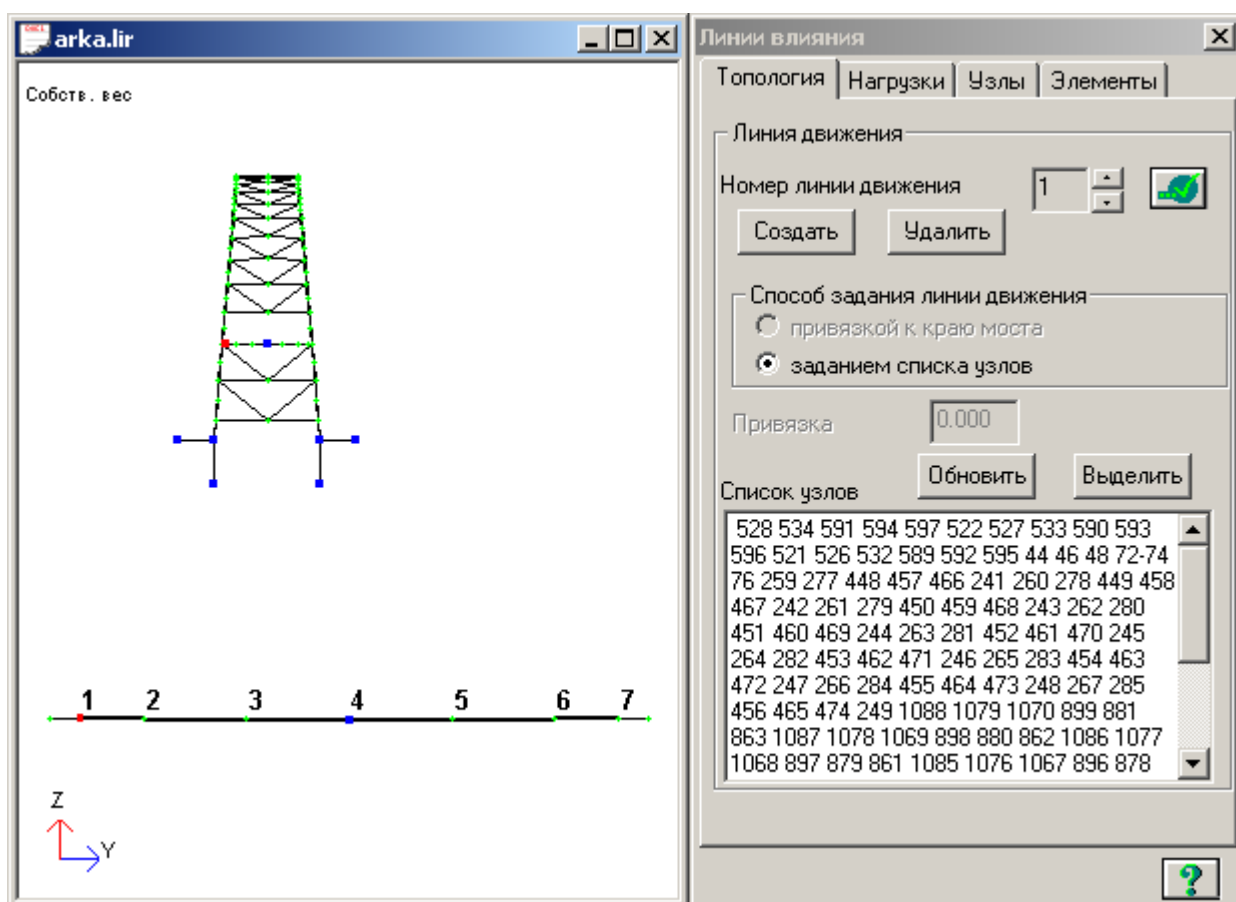


Рис. 2. Схема расположения базовых линий движения и диалог для их задания.

Для данной расчетной схемы задавалось 7 базовых линий движения, они пронумерованы на рис. 2 под проекцией YOZ расчетной схемы.

Расчет моста необходимо выполнить на следующие виды нагрузки:

- постоянная (нормативная нагрузка от собственного веса конструкций – загрузка 1, нормативная нагрузка от собственного веса одежды ездового полотна – загрузка 2);
- временные (вертикальные нагрузки от подвижного состава и пешеходов);
- прочие (ветровая нагрузка, температурные климатические воздействия – эти нагрузки из-за ограниченности места рассматриваться не будут).

Нормативная нагрузка от собственного веса конструкций включает, помимо веса

конструкций, веса постоянных смотровых приспособлений, опор и проводов линий электрификации и связи, трубопроводов и т.д. Разнесение нагрузок: нормативная от собственного веса конструкций и нормативная от собственного веса одежды ездового полотна связано с тем, что для них отличаются коэффициенты надежности по нагрузке  $\gamma_f$ . Это необходимо выполнять для всех постоянных нагрузок с различными коэффициентами надежности по нагрузке. Задание постоянной нагрузки не представляет особой сложности поэтому более подробно остановимся на задании подвижных нагрузок.

Нормативная временная нагрузка от пешеходов для тротуаров моста принята в виде вертикальной равномерно распределенной нагрузки при совместном учете с другими действующими нагрузками равной  $p = 0.2 \frac{\text{т}}{\text{м}^2}$ . Заполнение параметров нормативной временной нагрузки для пешеходов дано на рисунке 3. На рисунке 3, и на дальнейших рисунках, с правой стороны показаны диалог(и), появляющиеся по нажатию одноименных кнопок.

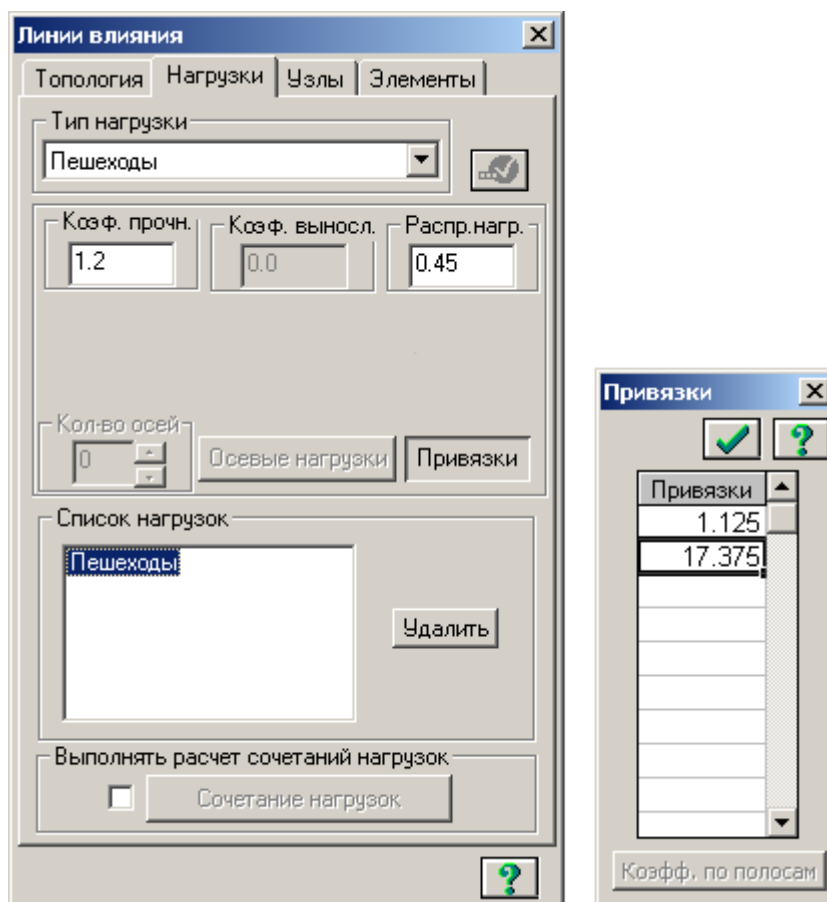


Рис. 3. Диалоги задания нормативной временной нагрузки от пешеходов.

Значение нормативной временной нагрузки от пешеходов, полученное как  $0.2 \cdot 2.25 = 0.45 \frac{\text{т}}{\text{м}}$  принято с коэффициентом для расчета по прочности 1.2. Этот коэффициент представляем собой произведение коэффициента надежности по нагрузке и динамического коэффициента  $\gamma_f \cdot (1 + \mu) = 1.2 \cdot 1.0 = 1.2$ . Следует напомнить, что привязки временной подвижной нагрузки задаются расстоянием от первой базовой линии движения до центра тяжести нагрузки. Привязки подвижных нагрузок поперек моста даны на рисунке 4.

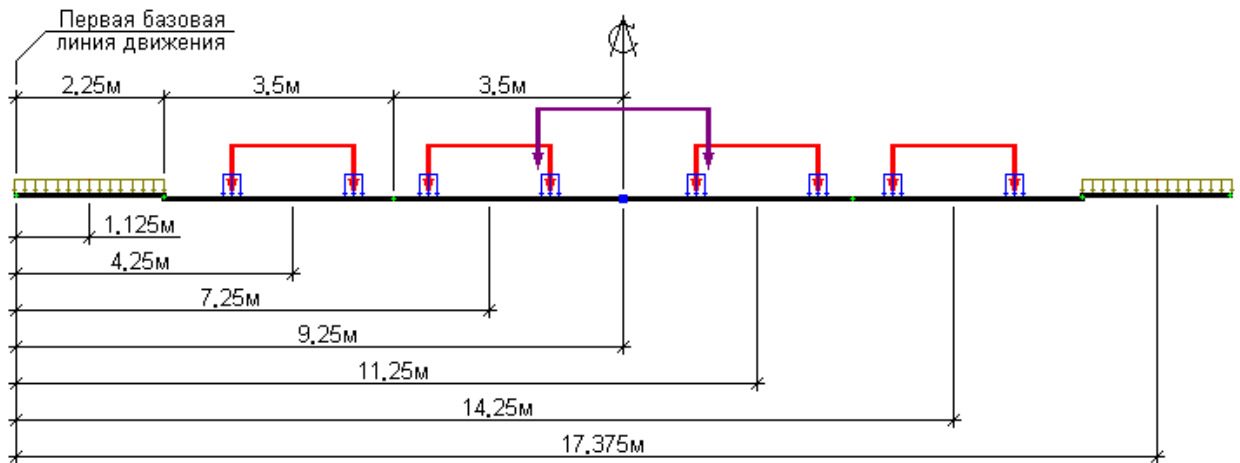


Рис. 4. Привязки подвижных нагрузок поперек моста.

Нормативная временная нагрузка от подвижного состава принимается в виде четырех полос А14, каждая из которых включает одну двухосную тележку с осевой нагрузкой  $P = 14\text{т}$  и равномерно распределенную нагрузку интенсивностью  $\nu = 1.4 \frac{\text{т}}{\text{м}}$  на обе колеи [3] (рис. 5).

**Линии влияния**

Топология | Нагрузки | Узлы | Элементы

Тип нагрузки: Автотранспорт АК

Кэф. прочн.: 1.38    Кэф. выносл.: 1.1    Распр.нагр.: 1.4

Кэф. для соср.нагрузок по полосам:  
 К.пр.1: 1.725    К.вын.1: 1.1    К.пр.2: 1.725    К.вын.2: 1.1

Кол-во осей: 2

Осевые нагрузки | Привязки

Список нагрузок: Пешеходы, АК

Выполнять расчет сочетаний нагрузок:  Сочетание нагрузок

**Осевые нагрузки**

N оси	Привязка	Полн. нагр.	Порож.нагр.
1	0	14	
2	1.5	14	

**Привязки**

Привязки
4.25
7.25
11.25
14.25

Кэфф. по полосам

**Коэффициенты S1**

N пол.	Расп.н.	Соср.н.
1	1	1
2	0.6	1
3	0.6	1
4	0.6	1

Рис. 5. Диалоги задания нормативной временной нагрузки А14.

Для тележки задаются по два коэффициента к расчетам по прочности и выносливости – это связано с тем, что в [3] при сборе нагрузки с нескольких полос движения, необходимо вводить для полосы движения дающей, в рассчитываемых элементах наибольшие усилия (в рассчитываемых узлах наибольшие перемещения), одни коэффициенты к расчетам по прочности и выносливости, а для остальных полос – другие. Для нашего случая эти пары

коэффициентов к расчетам по прочности и выносливости одинаковы. Диалог “Коэффициенты S1”, вызываемый по нажатию кнопки “Коэфф. по полосам” в диалоге “Привязки”, позволяет задавать требования п. 2.14, [2] – как суммировать нагрузку с нескольких полос движения.

Мост также рассчитывается тяжелую одиночную колесную нагрузку НК-80, проходящую по центру моста. Нормативная временная нагрузка НК-80 принимается в виде одной четырехосной машины общим весом 80т (рис. 6).

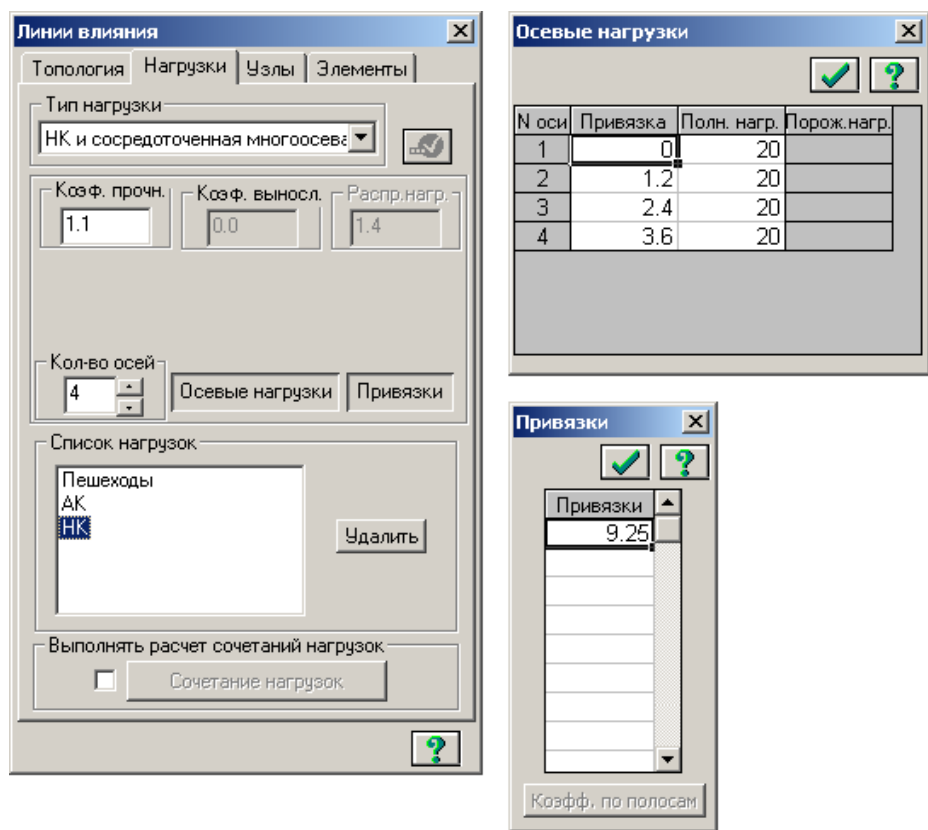


Рис. 6. Диалоги задания нормативной временной нагрузки НК-80.

После задания подвижных нагрузок задаем сочетания нагрузок, т. е. как статическую нагрузку складывать с подвижной (рис. 7).

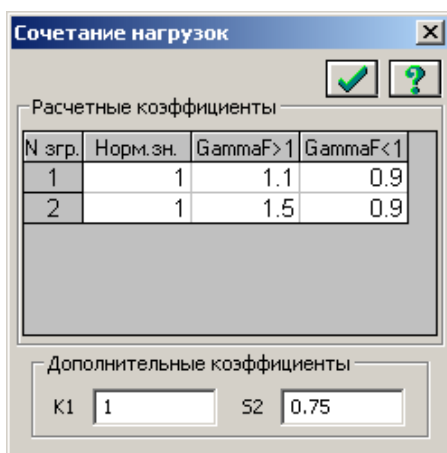


Рис. 7. Диалог задания сочетаний нагрузок.

Задается по три числа на каждое статическое загрузение: коэффициент к нормативным значениям нагрузки – если их необходимо подкорректировать, и коэффициенты  $\gamma_f > 1$  и

$\gamma_f < 1$ , определяемые по табл. 8\*, [2].  $K1$  – коэффициент с которым пешеходы суммируются с нагрузкой A14. Например, если кроме учета нагрузки от пешеходов с другими нагрузками, необходимо было выполнить “чистый” расчет на нагрузку от пешеходов – в этом случае значение нагрузки необходимо было задавать  $p = 0.4 \frac{\text{т}}{\text{м}^2}$ , а при суммировании с нагрузкой A14 коэффициент  $K1$  следовало задать равным 0.5. При одновременном загрузении полос автомобильного движения (совместно с пешеходами) и рельсовых путей (железных дорог, метрополитена или трамвая) временную вертикальную нагрузку, которая оказывает меньшее воздействие (как вертикальное, так и горизонтальное), следует вводить в расчет с дополнительным коэффициентом  $S2$ , который регламентируется п. 2.15\*, [2].

На закладке “Узлы” задаются номера узлов, для которых будут построены линии влияния перемещений и в дальнейшем будут вычислены нормативные значения сочетаний перемещений. Для контроля выбраны два узла: центральный узел моста и узел, который от загрузений собственным весом дал наибольшее вертикальное перемещение (таких узлов в действительности два – выбран тот который расположен левее). Оба расчетных узла находятся на полотне моста по линии симметрии.

На закладке “Элементы” задаются номера элементов, для которых будут построены линии влияния усилий и в дальнейшем будут вычислены нормативные и расчетные значения сочетаний усилий. Для контроля выбраны два элемента: ближняя подвеска в центре моста и левое опорное сечение передней арки.

Исходные данные для расчета моста заданы – выполняем расчет.

После выполнения расчета имеется возможность посмотреть для расчетных элементов поверхности влияния рисунки 8 и 9.

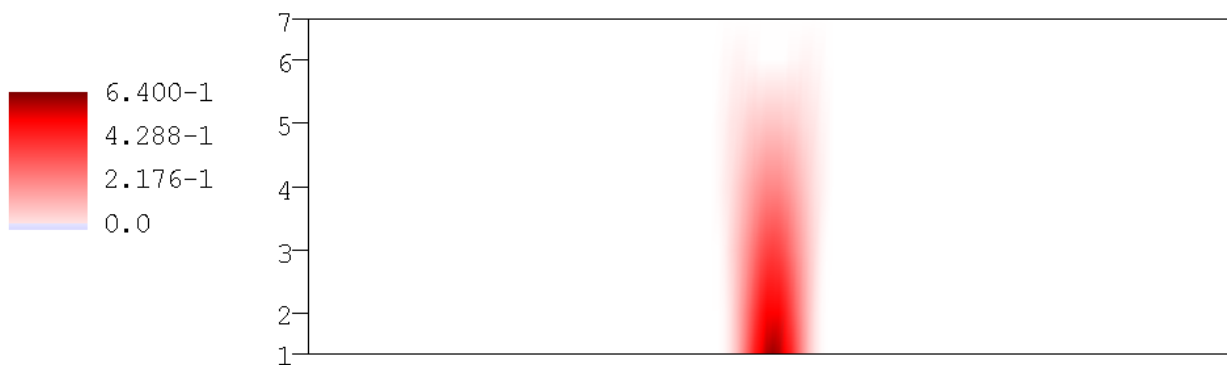


Рис. 8. Поверхность влияния продольного усилия в ближней подвеске в центре моста.

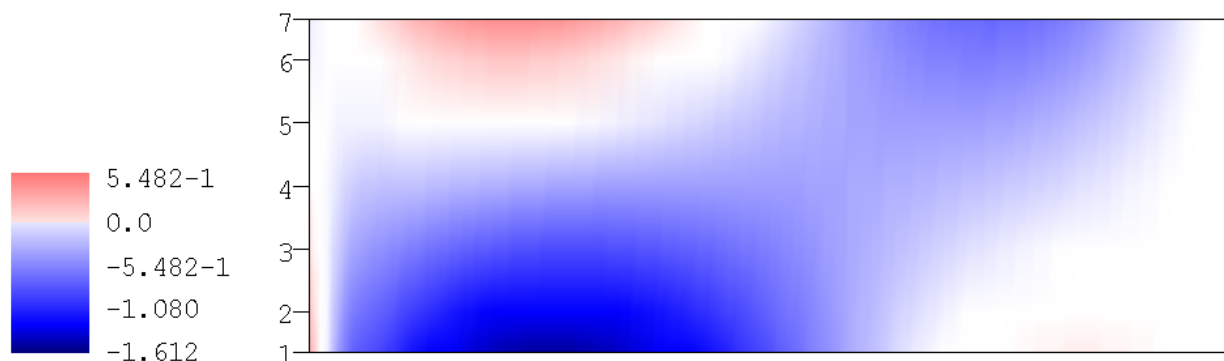


Рис. 9. Поверхность влияния продольного усилия в левом опорном сечении передней арки.

Для выбранных расчетных узлов и элементов есть возможность посмотреть и вывести на экран и в файл значения и внешний вид опорные линии влияния. В данном примере опорных линий влияния будет по 7 штук на каждый расчетный узел или элемент, поэтому

покажем результаты только для первой опорной линии влияния для расчетных узлов (рис. 10) и для расчетных элементов (рис. 11).

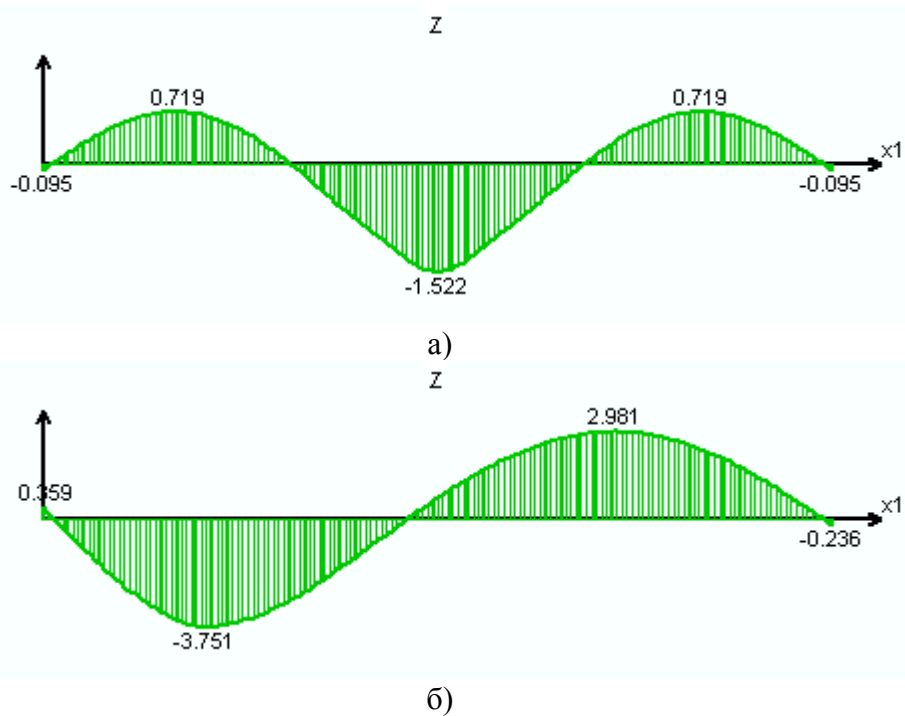


Рис. 10. Первые опорные линии влияния для расчетных узлов: а) центральный узел моста; б) узел с максимальным перемещением от собственного веса.

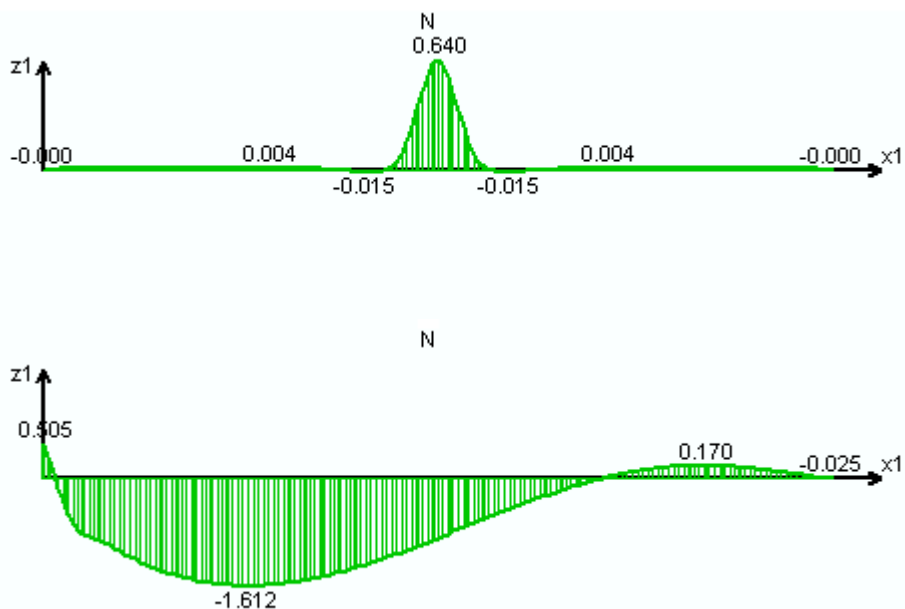


Рис. 11. Первые опорные линии влияния для расчетных элементов: а) ближняя подвеска в центре моста; б) левое опорное сечение передней арки.

Любую из опорных линий влияния можно сохранить в файл Microsoft Excel следующего содержания (для наглядности сохранялась линия влияния с рисунка 11, б):

- линия влияния в числовом виде (привязка – значение);
- графическое изображение линии влияния;

- представление линии влияния по участкам (рис. 12).

$X_n$	$X_k$	$X_m$	$F_m$	$A$
0	4.710863113	0	0.504634261	1.217625618
4.710863113	219.8830414	80	-1.612457156	-218.639801
219.8830414	301.8554688	258	0.170268908	9.012993813
301.8554688		308	-0.025249245	-0.084995322
			$A_- =$	-218.7247925
			$A_+ =$	10.23061943
			$A_s =$	-208.4941711

Рис. 12. Представление линии влияния по участкам.

Приняты следующие обозначения:

- $X_n$  – привязка начала участка от начала линии влияния;
- $X_k$  – привязка конца участка от начала линии влияния;
- $X_m$  – привязка положения экстремума участка от начала линии влияния;
- $F_m$  – значение рассматриваемого фактора при  $X_m$ ;
- $A$  – площадь, ограниченная линией влияния.

При этом участки, площадь которых меньше 0.5% от суммарной по абсолютной величине площади линии влияния, на печать не выводятся. В конце информации об участках по линии влияния выводятся площади отрицательных участков, положительных участков и суммарная площадь с учетом знака.

Кроме поверхностей и линий влияния в результате расчета получают:

- сочетания нормативных огибающих перемещений узлов от подвижных и заданных статических нагрузок только по максимальным факторам;
- сочетания огибающих усилий (нормативные, расчетные на прочность и выносливость) в элементах от подвижных и заданных статических нагрузок только по максимальным факторам;
- развернутые результаты сочетаний огибающих усилий (нормативные, расчетные на прочность и выносливость) по элементам от подвижных и заданных статических нагрузок – для максимального фактора выводятся соответствующие ему факторы (например для  $N_{max}$ , выводятся  $M_x^{соотв.}$ ,  $M_y^{соотв.}$ ,  $Q_z^{соотв.}$ ,  $M_z^{соотв.}$ ,  $Q_y^{соотв.}$ ).

Покажем только таблицу сочетаний нормативных перемещений узлов от подвижных и заданных статических нагрузок только по максимальным факторам (рис. 13). Показать остальные две таблицы не представляется возможным, т.к их ширина в три раза превышает ширину таблицы на рисунке 13.

ФАКТОР	ПОСТОЯННАЯ	ПОДВИЖНЫЕ ПЕШЕХОДЫ		АК		НК		СУММАРНЫЕ КОМБИНАЦИЯ 1		КОМБИНАЦИЯ 2	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Узел 77											
* X	-0.0	-0.0	0.0	-0.0	0.0	-0.0	0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
* Y	0.0	-3.8	3.8	-11.6	11.6	-0.0	0.0	-15.5	15.5	-0.0	0.0
* Z	-88.6	-285.2	279.6	-1842.8	1696.2	-304.2	238.2	-2216.6	1887.3	-392.8	149.6
* UX	0.0	-2.8	2.8	-8.5	8.5	-0.0	0.0	-11.3	11.3	0.0	0.0
* UY	0.5	-2.5	2.6	-15.9	18.3	-2.4	3.7	-18.0	21.4	-1.9	4.2
* UZ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Узел 85											
* X	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
* Y	0.0	-4.7	4.7	-13.2	13.2	-0.0	0.0	-18.0	18.0	-0.0	0.0
* Z	-61.0	-87.9	77.1	-612.4	454.6	-127.1	57.3	-761.3	470.6	-188.2	-3.7
* UX	-0.0	-4.4	4.4	-13.4	13.4	-0.0	0.0	-17.9	17.9	-0.0	0.0
* UY	-0.0	-6.5	6.5	-40.0	40.0	-5.7	5.7	-46.5	46.5	-5.7	5.7
* UZ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Рис. 13. Таблица сочетаний нормативных огибающих перемещений узлов от подвижных и заданных статических нагрузок только по максимальным факторам.



Из таблицы (рис. 13) видно, что максимальное перемещение получила та же точка, что получала максимальное перемещение от собственного веса, эта точка расположена на расстоянии 58 метров от начала моста. Проверим допустимость этого перемещения

$$\frac{1}{400}l = 750 \text{ мм} < 2216.6 \text{ мм},$$

следовательно, мост получил недопустимые перемещения и нужно корректировать расчетную схему (возможно, изменять конструктивное решение, заданные жесткости и т.д.), выполнять расчет заново, опять проверять и возможно опять вносить коррективы. Даже после того как расчет дал удовлетворительные результаты, впереди еще большая часть работы связанная с конструированием.

Следует отметить, что данный вариант расположения подвижных нагрузок является не единственным, например, для расчета арки и подвесок, нагрузку А14 из четырех полос движения необходимо сместить, насколько позволяют нормы проектирования к одному из тротуаров. Также необходимо рассмотреть, при незагруженных тротуарах, невыгодное размещение на всей ширине ездового полотна (в которое входят полосы безопасности) двух полос нагрузки А14. Авторы не ставили перед собой цель рассчитать данный мост. Целью данной статьи было ознакомление широкого круга инженерно-технических работников, занимающихся проектированием мостов с возможностями ПК ЛИРА.

При задании расчетной схемы необходимо для сложных поперечных сечений пролетных тонкостенных строений стальных мостов вычислять геометрические характеристики, например для прикидочных расчетов по плоской расчетной схеме, а после расчета проверить назначенные или подбирать толщины ортотропных плит, для этого служит созданная программа расчета поперечных сечений пролетных строений стальных мостов (рис. 14.).

В основе программы заложена автоматизированная реализация классического подхода расчета пролетных строений мостовых конструкций, в соответствии с которым сложная пространственная система ортотропных плит и стенок представляется как стержневая система, состоящая из набора поперечных сечений вдоль длины пролета. Для каждого сечения задается набор усилий  $N$ ,  $M$ ,  $Q$  взятых из соответствующих огибающих эпюр балки жесткости (обычно неразрезной балки). Фактическая неравномерность распределения нормальных напряжений по телу сложного сечения компенсируется возможностью введения компенсирующих коэффициентов задаваемых для ортотропных плит (коэффициентов редукции). Величина этих коэффициентов зависит от конкретного типа моста и расчетного сечения.

Локальные воздействия от подвижной нагрузки задаются в виде усилий для набора характерных расчетных точек ортотропных плит проезда. Количество этих точек и их расположение на плитах проезда предопределено требованиями норм. Локальные воздействия других видов (например, воздействие от каната, передающего на плиты значительное воздействие в месте крепления) моделируются путем введения потоков напряжений (напряжений, соотнесенных к толщине элемента, в котором они возникают).

Поперечное сечение пролетного строения формируется заданием системы образующих ортотропных плит. Ортотропная плита – основной конструктивный элемент любого стального моста – это стальной лист постоянной толщины, подкрепленный системой продольных ребер, установленных с определенным шагом для обеспечения восприятия локальных подвижных нагрузок от колес транспорта (в этом случае работает совместно с участком плиты, как балка), а также для обеспечения местной устойчивости отсеков плиты. В процессе моделирования задаются плиты верхнего пояса (плиты проезда транспорта и плиты тротуаров), нижнего пояса, а также плиты стенок. Разумных

ограничений на количество плит и форму поперечного сечения не существует.

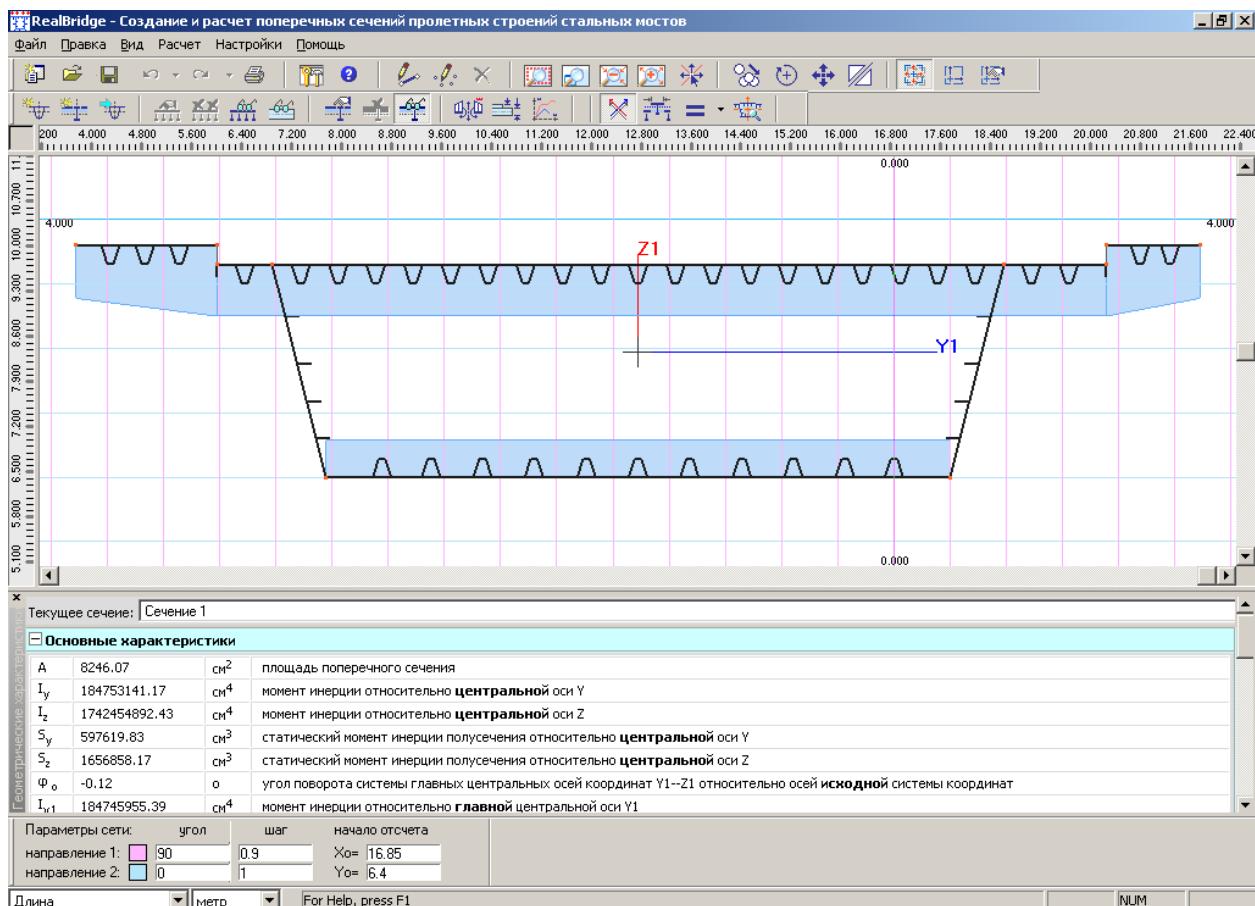


Рис. 14. Программа расчета поперечных сечений пролетных строений стальных мостов.

Продольные ребра задаются на основе топологических шаблонов коробчатого, полосового, таврового и уголкового типа. Это наиболее распространенные и применяемые на практике типы. Для каждой плиты может быть задано произвольное количество ребер с различными вариантами их расположения относительно поверхности плиты. Для каждой плиты задаются данные, характеризующие ее расчетный тип (для стенок – это параметры отсеков и дополнительные данные для расчета на местную устойчивость, для поясов проезда – значения локальных усилий в характерных расчетных точках), а также назначается тип поперечной конструкции (поперечные балки переменного сечения для ортотропных плит поясов и поперечные ребра для плит стенок).

По завершении построения модели поперечного сечения, имеется возможность анализа геометрических характеристик сечения (с учетом и без учета коэффициентов редукации), а также оценки уровня нормальных напряжений в элементах сечения (с учетом наложения напряжений от воздействия локальных нагрузок в соответствующих отсеках плит проезда).

Расчет сечения может быть выполнен в двух формах:

- расчет с заданными толщинами;
- расчет с подбором толщин расчетных объектов, не удовлетворяющих требованиям местной устойчивости (толщины будут вычислены в процессе расчета на основании наборов альтернативных толщин, которые можно назначить для любого элемента поперечного сечения).

В результате расчета выполняется декомпозиция модели сечения состоящей из ортотропных плит на элементарные стандартные расчетные объекты (отсеки стенок, участки плит между ребрами, отсеки поясов с ребрами, пластинки, составляющие

продольные ребра и т.д.). Для каждого расчетного объекта, в зависимости от контекста и условий его работы в каждом сечении вдоль пролета, выполняется комплекс проверок прочности и местной устойчивости в соответствии с [2] и его приложениями. В процессе расчета формируется база результатов, где накапливаются данные по каждому расчетному объекту. В последствии эти данные используются для разнообразных форм анализа результатов расчета.

Первая версия программы применима для автодорожных стальных мостов и не охватывает расчет поперечных конструкций, однако последующее развитие включает в себя добавление возможности расчета сечений мостов, имеющих стальные плиты проезда под железнодорожный транспорт (с учетом особенностей их работы), добавление возможности моделирования и расчета комбинированных сечений (с использованием железобетонных плиты проезда), а также расчет основных видов поперечных конструкций (поперечных балок и стоек).

1. Корнеев М.М. Стальные мосты: Теоретическое и практическое пособие по проектированию. – К., 2003. – 547с.
2. СНиП 2.05.03-84\* Мосты и трубы. – М.: Госстрой СССР, 1984.
3. СНиП 2.05.03-84\* Мосты и трубы. – М.: Госстрой России, 1998.