Моделирование и загружение мостовых конструкций подвижной нагрузкой с использованием САПФИР

организаторы:

ООО «Лира сервис» | **ООО «АйДиТи»**

докладчик:

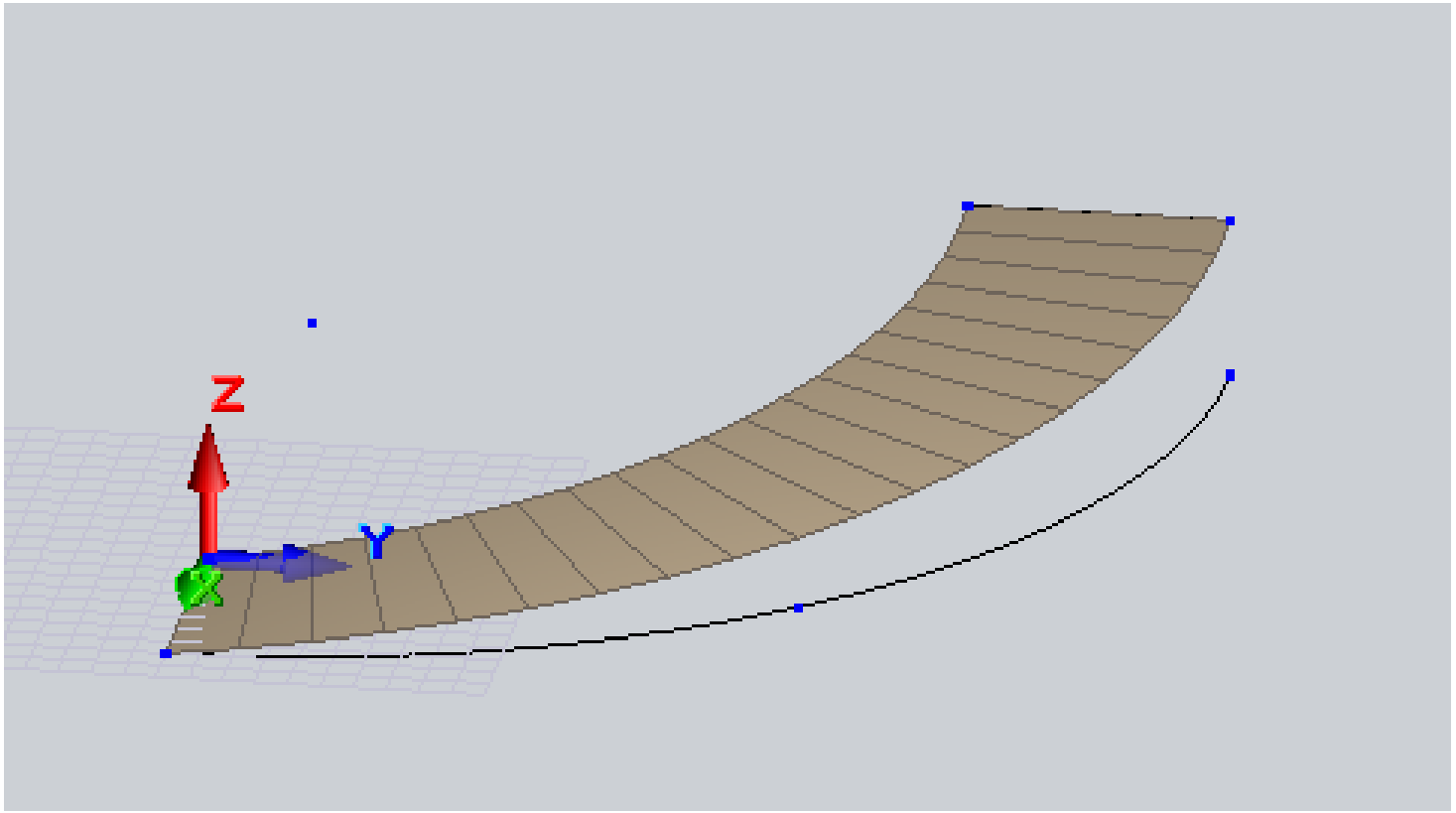
Алексей Козлов
ООО «ПРАКТИС-ЦЕНТР»

www.practice.center | +7 (920) 402-32-92

Екатеринбург, 2016

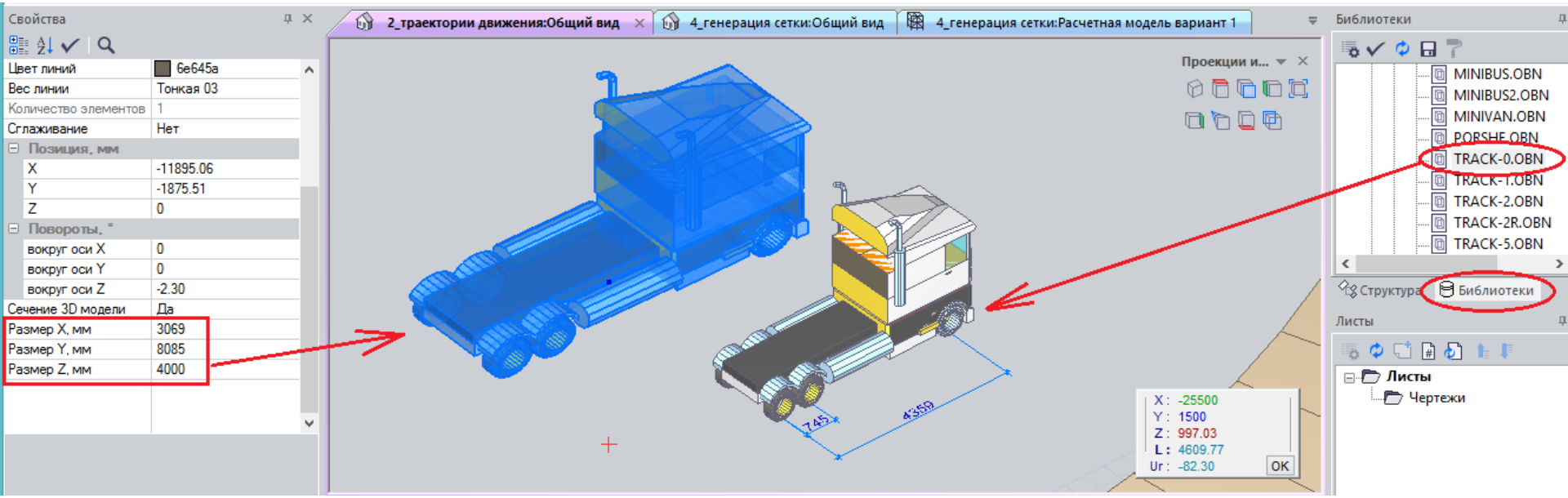
1

Формирование пользовательской библиотеки подвижных нагрузок от транспорта в препроцессоре САПФИР. Установка нагрузок на мостовое полотно, формирование РСН.



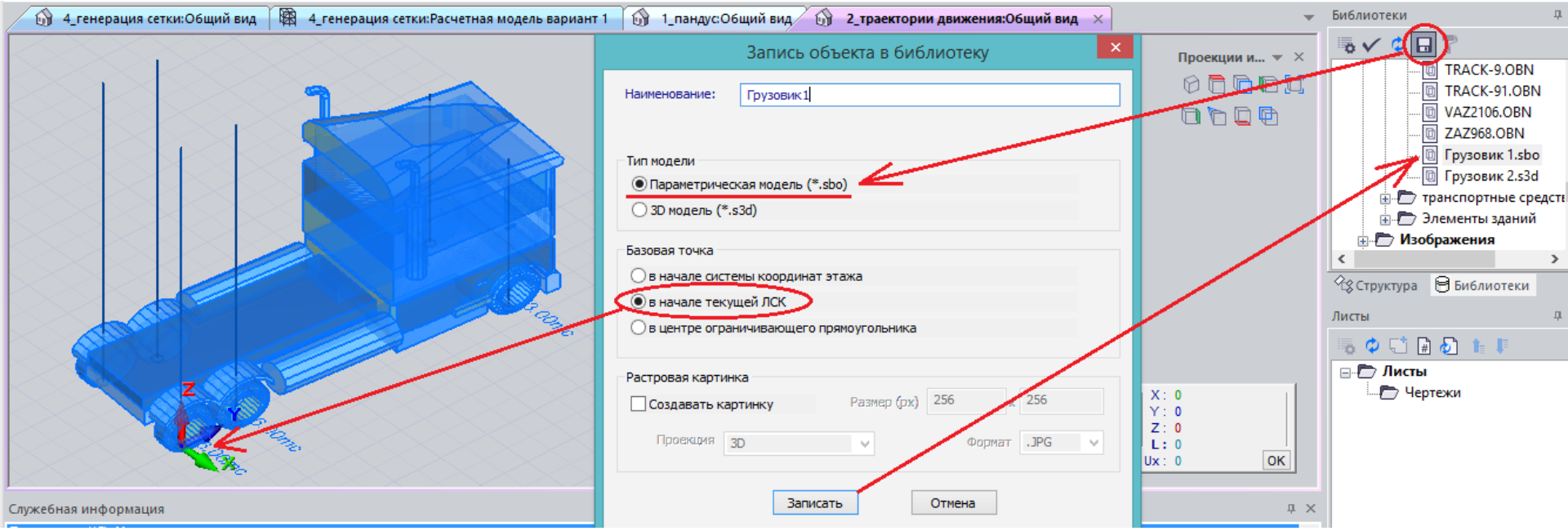
Имеется криволинейная в плане и переменная по высоте поверхность (например, пандус). Требуется загрузить её реальными транспортными средствами, установленными в разные по длине положения (смоделировать движение ТС по пандусу).

Создание параметрической модели нагрузки



Привязка 3D-модели к параметрической нагрузке необязательна, но хорошо позволяет визуализировать эту нагрузку:

- 3D-модели можно выбрать в библиотеке САПФИР;
- проверяем размеры модели – если они не соответствуют реальным, то можно увеличить параметры габаритов в окне свойств;
- собственную 3D-модель можно создать в САПФИР самостоятельно.



К каждому колесу привязывается нагрузка в виде сосредоточенной силы (можно сделать и в виде площади отпечатка колеса, это не намного сложнее, но имеет смысл только при последующей очень мелкой триангуляции КЭ проезжей части).
Нагрузка вместе с 3D-моделью записывается в библиотеку в виде **параметрической модели.**
Базовую точку удобнее всего назначать в начале текущей ЛСК, привязав её к любой удобной точке объекта.

СХЕМЫ ЭТАЛОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ (ТС)

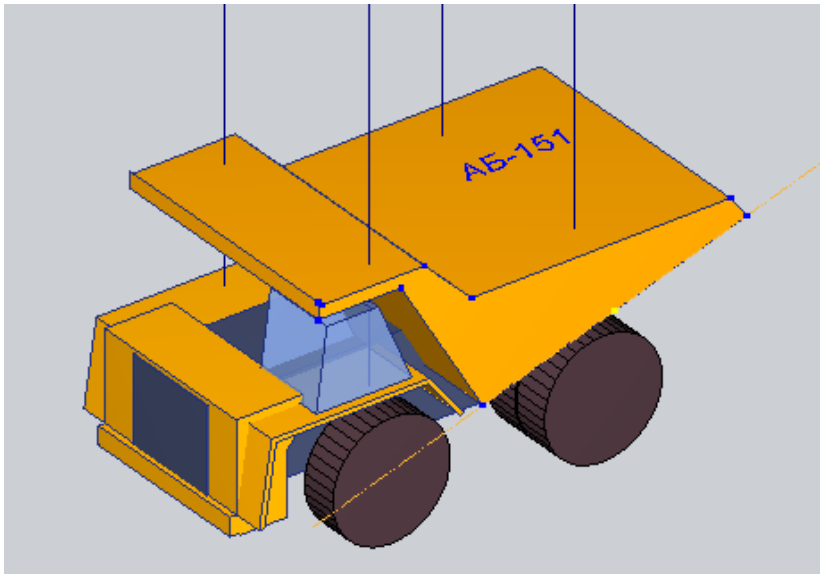
Наименование схемы	Схемы эталонных транспортных средств	Общая база, м	Расстояние между тс, м
Схема 2-осных автомобилей	0,6Р Р 4	4	10
Схема 3-осных автомобилей	0,6Р Р Р 4 1,4	5,4	12
Схема 4-осных автотранспортных средств	0,6Р Р Р Р 4 5 1,4	10,4	18
Схема 5-осных автотранспортных средств	0,6Р Р Р Р Р 4 6 1,4 1,4	12,8	22
Схема 6-осных автотранспортных средств	0,6Р Р Р Р Р Р 4 1,4 6 1,4 1,4	14,2	22
Схема 7-осных автотранспортных средств	0,6Р Р Р Р Р Р Р 4 1,4 4 1,4 4,4 1,4	16,6	22

ОТРАСЛЕВЫЕ ДОРОЖНЫЕ НОРМЫ

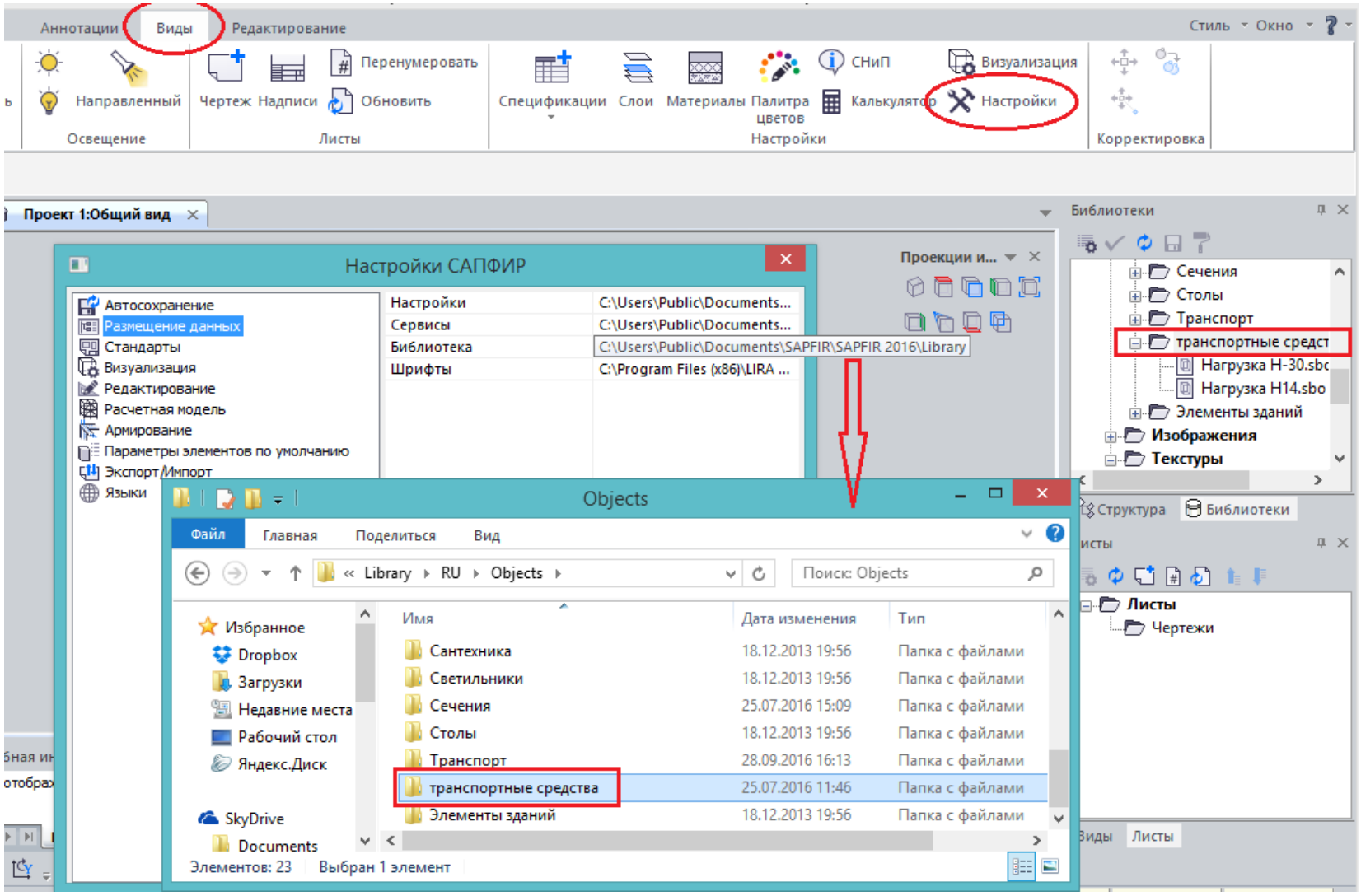
ВРЕМЕННОЕ РУКОВОДСТВО ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

ОДН 218.0.032-2003

В САПФИР можно создать собственную библиотеку любых транспортных нагрузок, например, по вышеуказанному ОДН (таблица слева), или такую:

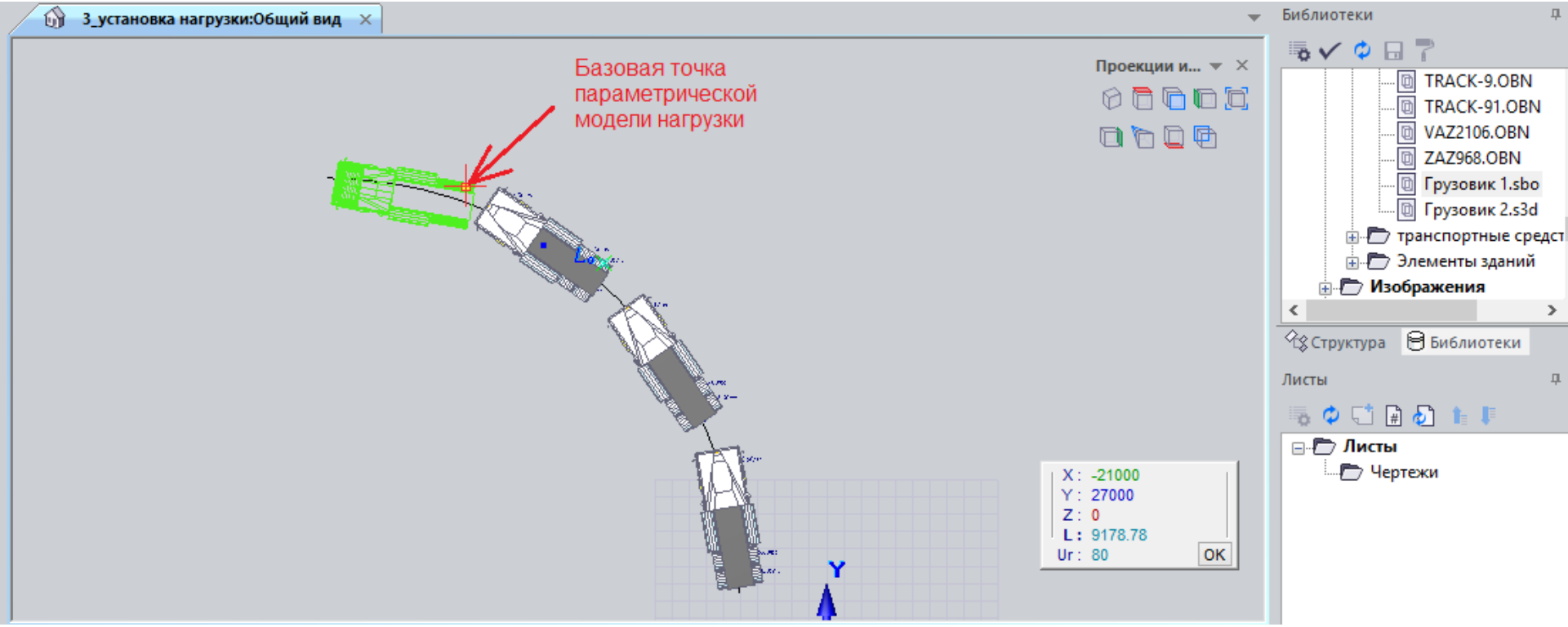


Перенос библиотеки



По указанному пути находятся папки как с уже имеющимися в САПФИР библиотеками, так и созданные пользователем. Для переноса своей библиотеки на другой компьютер нужно скопировать папку.

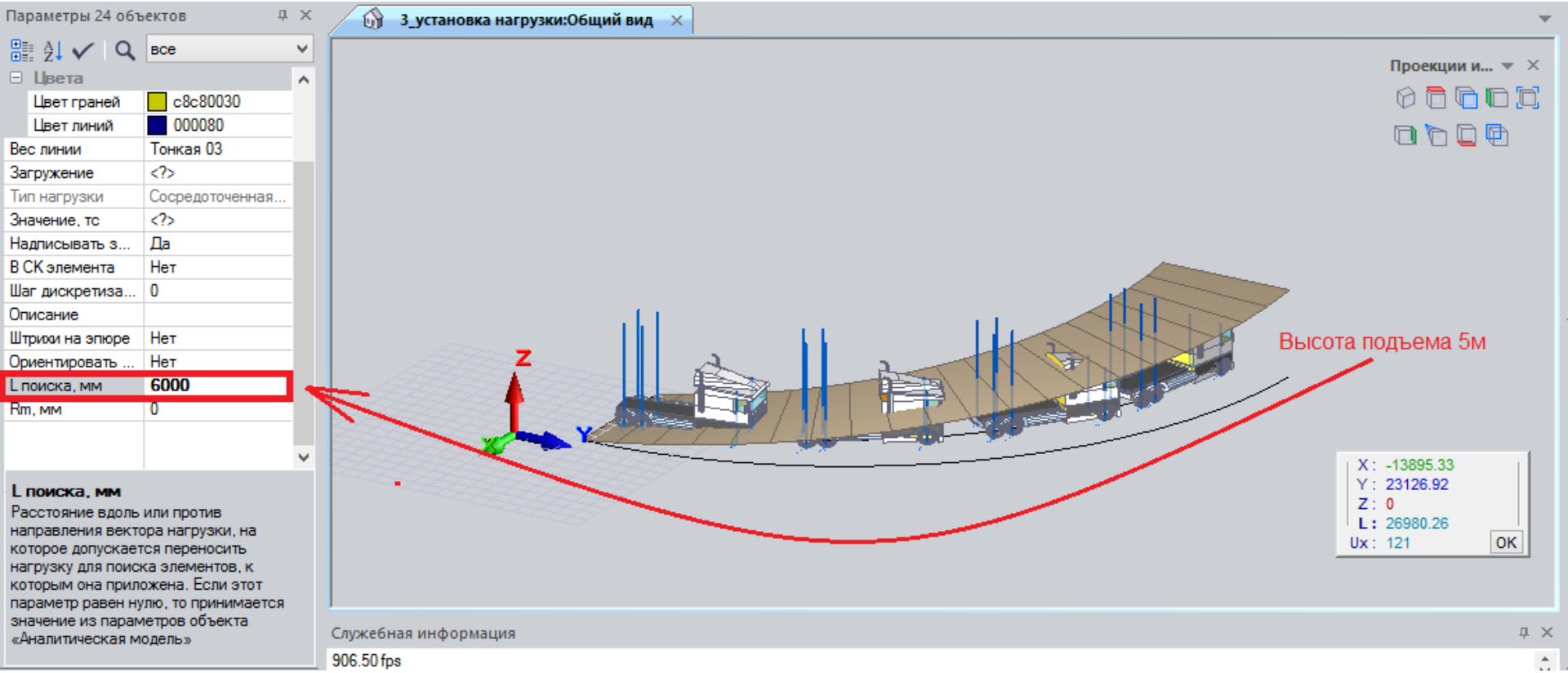
Установка нагрузок на траекторию движения



Заранее созданная и занесенная в библиотеку модель последовательно устанавливается на проекцию траектории движения (т.е. нет необходимости устанавливать каждый грузовик в свое высотное положение – привязка нагрузки к поверхности пандуса будет осуществлена позже).

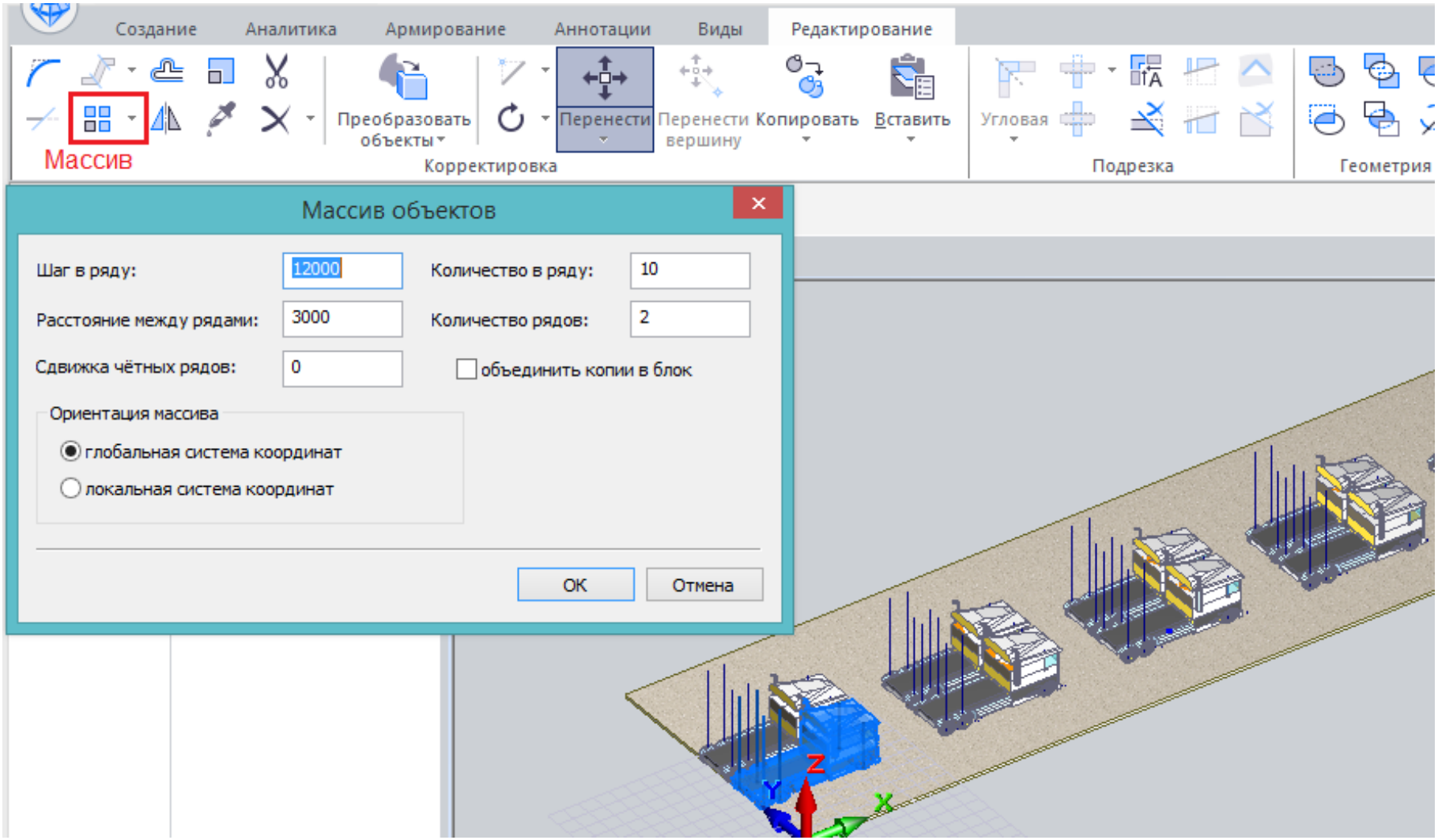
В процессе установки стрелками клавиатуры вправо-влево можно выполнять поворот нагрузки вокруг базовой точки с шагом 5°

Привязка нагрузок к поверхности пандуса



Для упрощения нагрузки были установлены в горизонтальной плоскости. Чтобы при передаче в ЛИРА-САПР они привязались к КЭ пандуса, нужно задать **расстояние поиска** – длину вдоль вектора нагрузки относительно точки её приложения, на которой будет идти поиск элементов для установки этой нагрузки. Задаем L поиска чуть больше максимального расстояния от точки приложения нагрузки до поверхности пандуса.

Установка нагрузок на прямые пролеты в горизонтальной плоскости



При установке нагрузки на прямые горизонтальные пролеты удобно пользоваться функцией «Массив» - достаточно вытянуть всего одну библиотечную нагрузку, а число колонн, расстояние между ними и между автомобилями в колонне задаются параметрически.

Создание собственных подвидов загружений

Правила сочетания

Нормативный документ: СП 20.13330.2011 РФ

№	Вид загружения	Подвид	Коэфф.надёжности(γ)	γmin	γs
10	Длительное	длит.доминир	1.3		1
11	Длительное	длит.доминир	1.4		1
12	Длительное	длит.прочие	1		1
13	Длительное	длит.прочие	1.1		1
14	Длительное	длит.прочие	1.2		1
15	Длительное	длит.прочие	1.3		1
16	Длительное	длит.прочие	1.4		1
17	Кратк.доминир.1	врем.кр	1		1
18	Кратк.доминир.1	врем.кр	1.1		1
19	Кратк.доминир.1	врем.кр	1.2		1
20	Кратк.доминир.1	врем.кр	1.3		1
21	Кратк.доминир.1	врем.кр	1.4		1
22	Кратк.доминир.1	снег	1.4		1
23	Кратк.доминир.2	кран	1.4		1
24	Кратк.прочее	тормоз	1.4		1
25	Кратк.прочее	3-осное ТС (ОДН+СП35)	1.95	1	1

Загружения СП 20.13330.2011 (РФ) (по умолч

Редактор загружений | РСН | РСУ

№ п/...	Название загружения	Вид загружения	Подвид	
1:1	Собственный вес	Постоянное	пост 1.10	
2:2	Нагрузки на плиты	Длительное	длит.доминир 1.20	
3:3	Временные нагрузки на плиты	Кратк.доминир.1	врем.кр 1.20	
4:4	Загружение прочее	Длительное	длит.доминир 1.20	
5:5	положение 1	Кратк.прочее	3-осное ТС (ОДН+СП35)	1.95
6:6	положение 2	Кратк.прочее	3-осное ТС (ОДН+СП35)	1.95
7:7	положение 3	Кратк.прочее	3-осное ТС (ОДН+СП35)	1.95
8:8	положение 4	Кратк.прочее	3-осное ТС (ОДН+СП35)	1.95
9	<Создать новое загружение>			

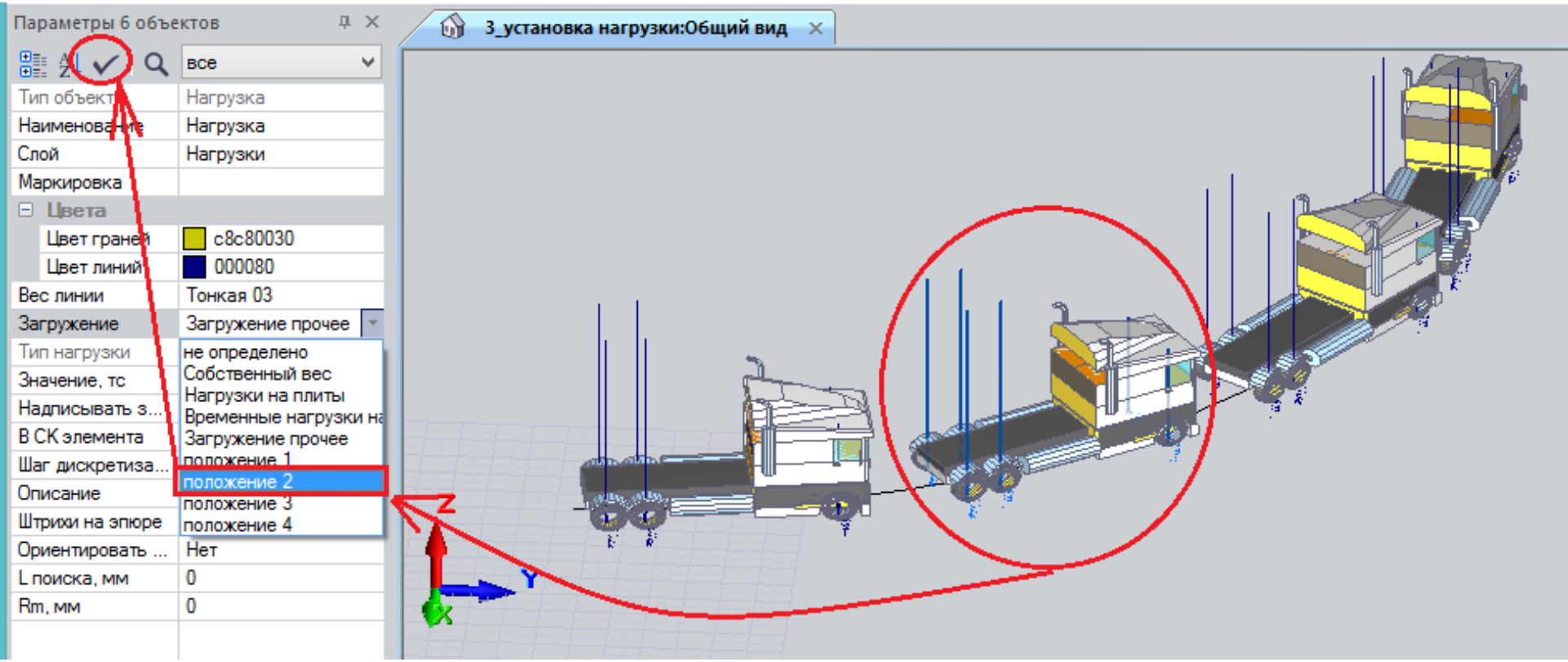
Произведение коэф.надежности (1,5) на динамический (1,3)

В редакторе загружений САПФИР можно создать собственный подвид нагрузки (в рассматриваемом примере – 3-осное транспортное средство по ОДН с коэффициентами надежности и динамическим по СП35).

Создаем столько загружений, сколько положений нагрузки нужно рассмотреть (в данном примере - 4).

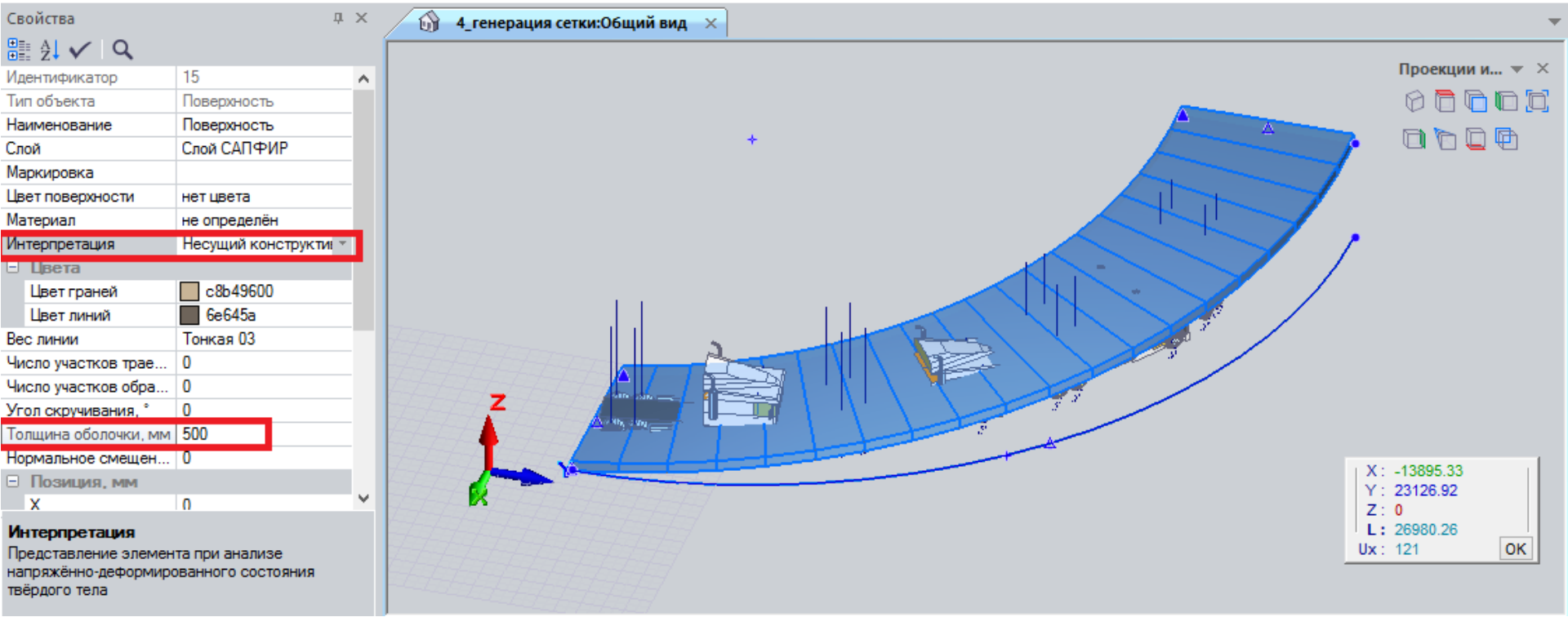
Библиотечная нагрузка должна быть нормативной, в ЛИРА-САПР она будет передана в расчетных значениях с учетом пользовательских коэффициентов надежности для данного подвида (1,95).

Разделение положений нагрузки по загружениям



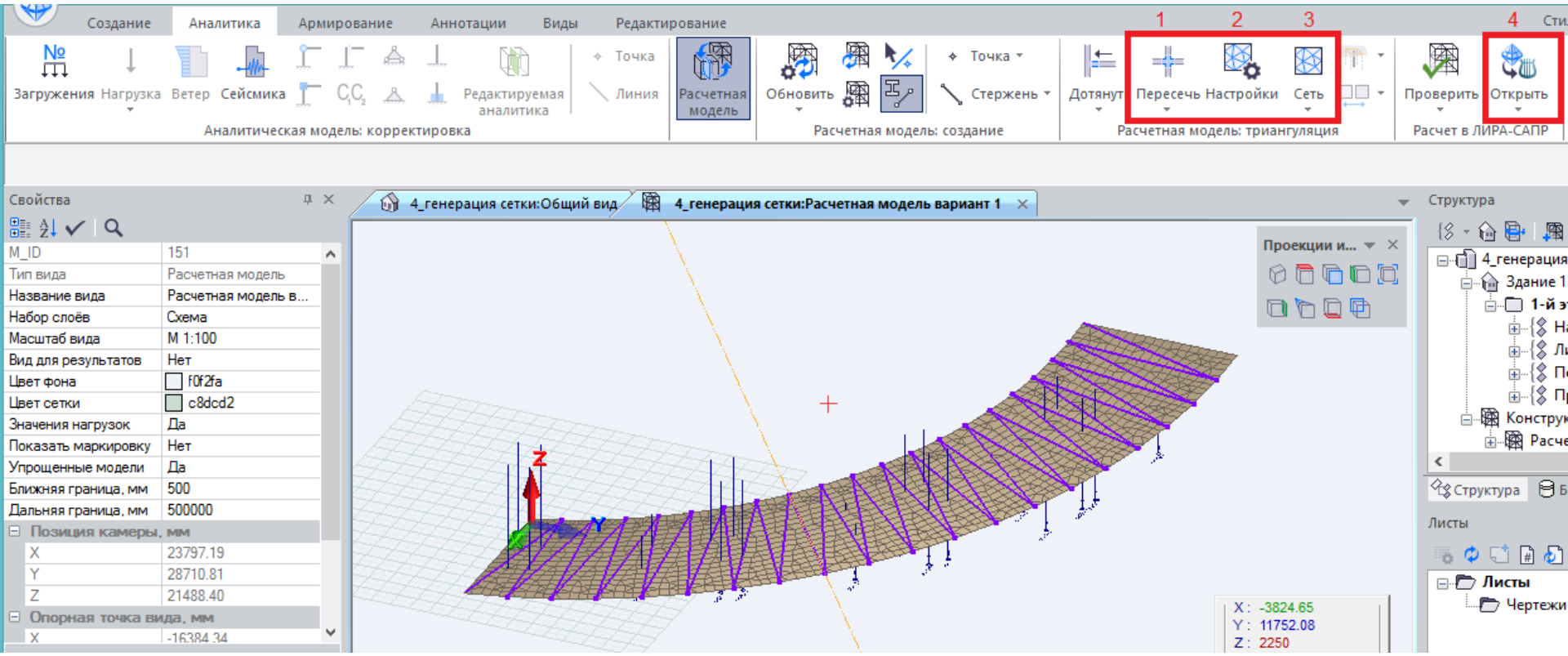
Последовательно выделяем нагрузки (без 3D-модели) в каждом положении, и в окне свойств меняем загружение на предварительно созданное.

Перевод пандуса в несущий конструктив



В начале пандус был создан в виде кинематической поверхности без материала. Чтобы его можно было триангулировать, приложить нагрузку и отправить на расчет в ЛИРА-САПР, нужно интерпретировать его в виде несущего конструктива (он становится оболочкой), и назначить оболочке толщину.
Если не назначать материал, то он будет передан в ЛИРА-САПР по умолчанию – бетон с E=3*10^6.

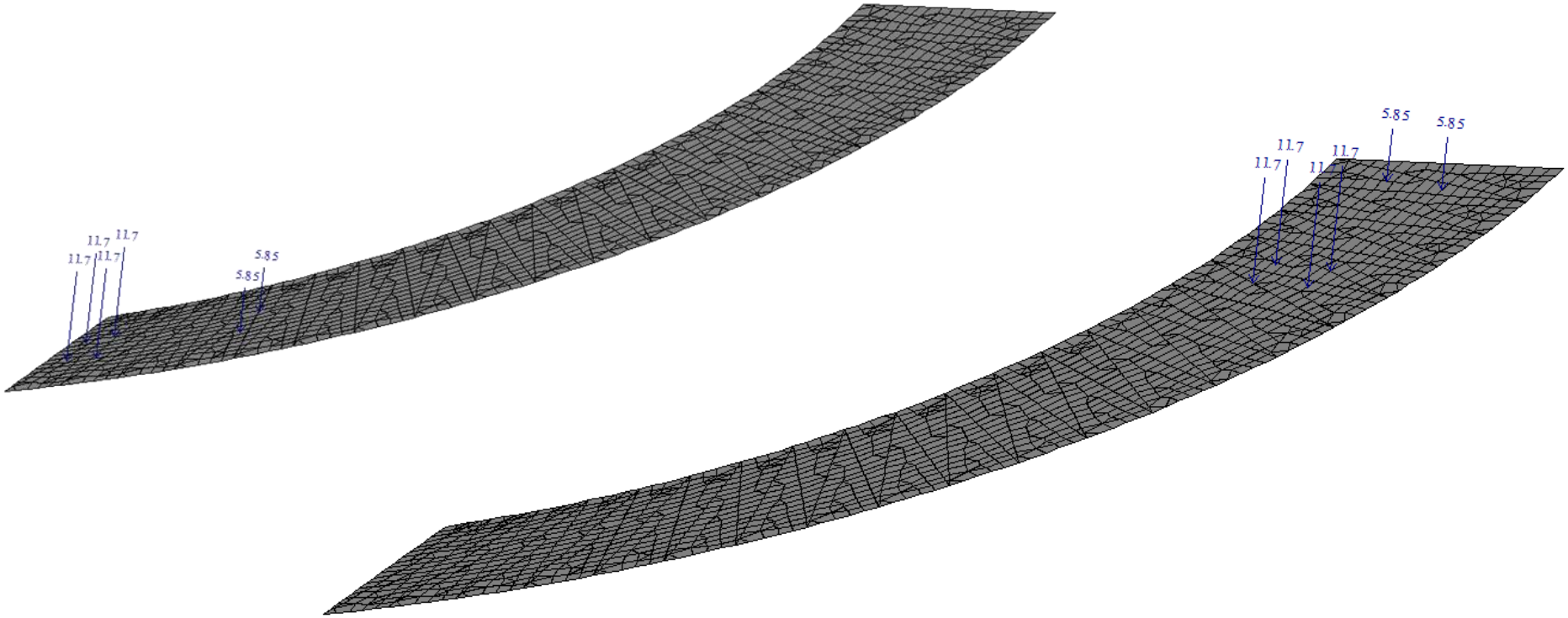
Триангуляция



В аналитической модели выполняется:

1) поиск пересечений – показаны фиолетовыми линиями, в данной криволинейной поверхности каждый треугольник лежит в своей плоскости;
2) настройки сети – шаг разбивки был принят 0,5 м;
3) собственно генерация сети, показанная на экране;
4) после визуальной проверки нажимаем «Открыть в ЛИРА-САПР» - программа запустится автоматически с уже сформированной КЭ-моделью.

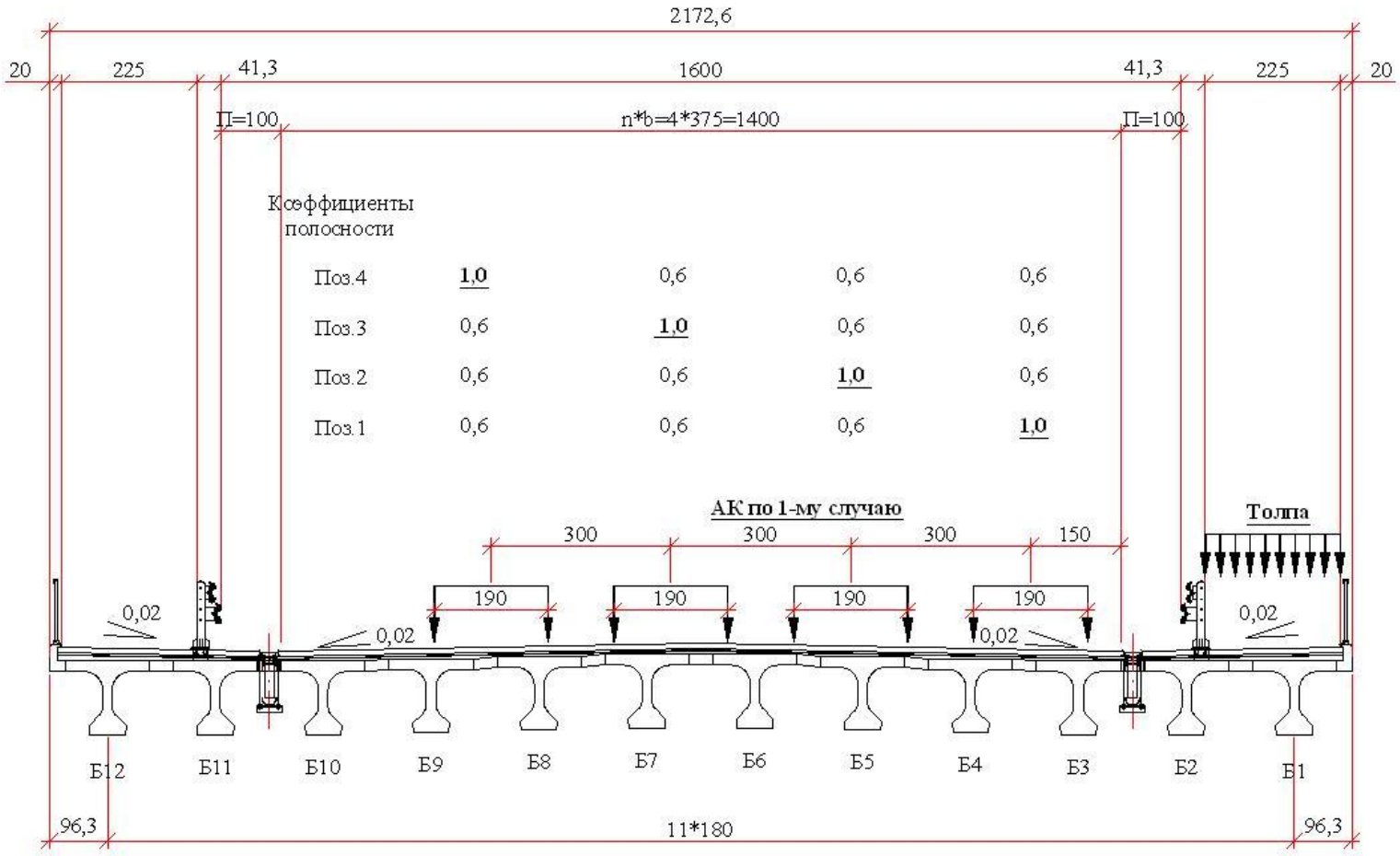
КЭ-модель



В ЛИРА-САПР передана криволинейная поверхность, на которую в разных загружениях приложены разные положения ТС на пандусе. Т.к. расстояние поиска нагрузки было задано больше максимального расстояния от точки приложения до поверхности пандуса, то вся нагрузка в ЛИРА-САПР «нашла» свои КЭ, и каждая точка приложения нагрузки находится на своей высоте. Переданы расчетные значения нагрузок, а в таблице РСН уже имеются нужные коэффициенты надежности – 1,95.

2 Построение огибающих эпюр усилий

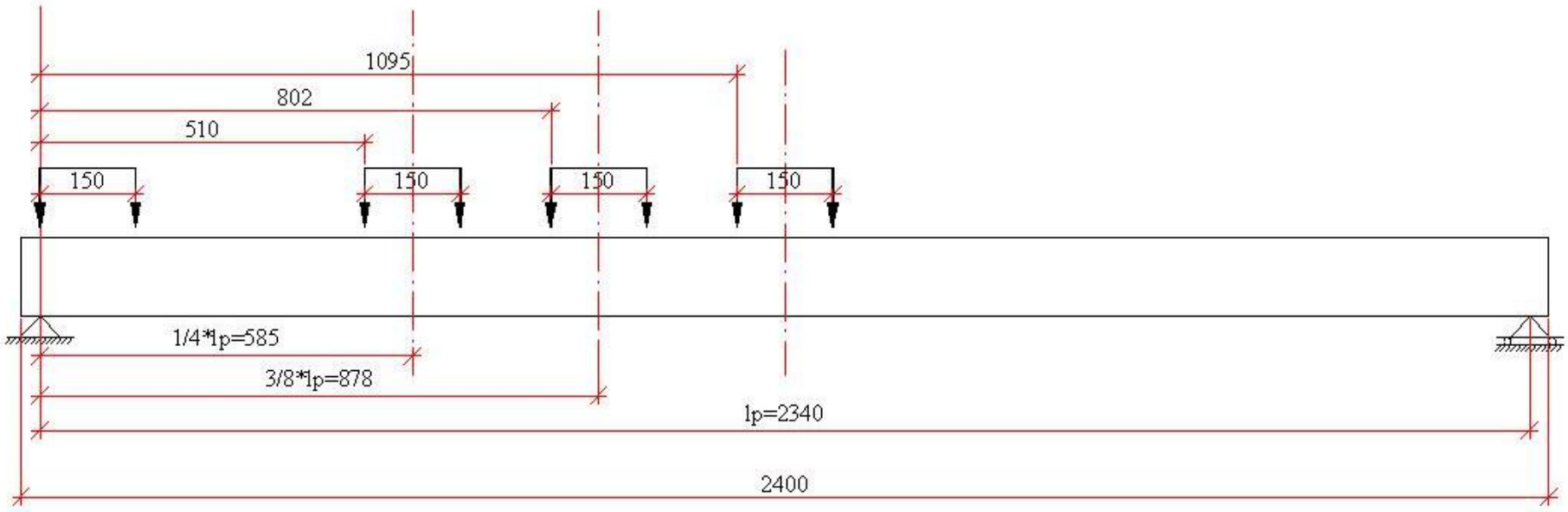
Построение огибающих эпюр усилий



Рассмотрим на примере загружения 4-полосного пролетного строения одним из трёх нормативных положений нагрузки – А14 по 1-му случаю с пешеходами.

Подробный ролик, описывающий последовательность загружения и построения огибающих эпюр для данного пролетного строения: https://goo.gl/vE1J91

Минимальное количество положений тележки вдоль оси движения



Помимо вариаций поперечного расположения нагрузки на пролете необходимо рассмотреть несколько вариантов положения тележек вдоль оси моста.

В каждой полосе движения имеется одна тяжелая тележка с базой 1,5 м (равномерно-распределенной нагрузкой при этом загружается вся полоса, на рисунке не показано).

Для построения огибающих эпюр моментов и поперечных сил нужно поставить тележку как минимум в 4 положения (с учетом симметрии пролета): в начале, в четверти, в 3/8 и в середине пролета.

Расчетные сочетания нагрузок

Номер таблицы РСН 1 Имя таблицы РСН A14 случай 1

Определяющие РСН

В одной задаче можно создать несколько таблиц РСН

16 столбцов РСН

СНиП2.01.07-85*

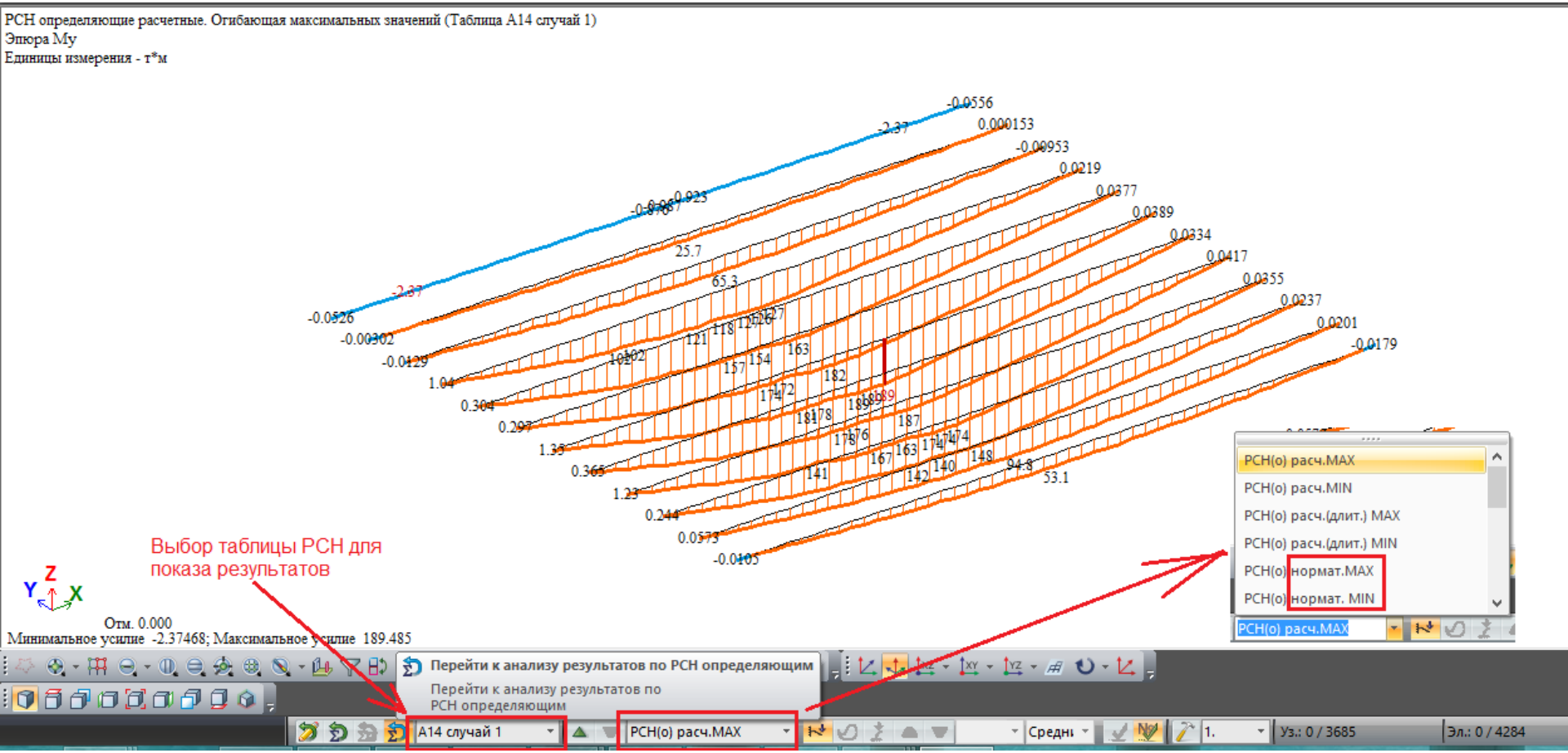
	N загруж.	Наименование	Коэф. надежн	поз1 x=0	поз2 x=0	поз3 x=0	поз4 x=0	поз1 x=5.1	поз2 x=5.1	поз3 x=5.1	поз4 x=5.1	поз1 x=8	поз2 x=8	поз3 x=8	поз4 x=8	поз1 x=11	поз2 x=11	поз3 x=11	поз4 x=11
1	1	A14 полоса 1	1.15	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6
2	2	A14 полоса 2	1.15	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6
3	3	A14 полоса 3	1.15	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6
4	4	A14 полоса 4	1.15	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.	0.6	0.6	0.6	1.
5	5	A14 тележка 1о	1.95	1.	0.6	0.6	0.6	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
6	6	A14 тележка 2о	1.95	0.6	1.	0.6	0.6	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
7	7	A14 тележка 3о	1.95	0.6	0.6	1.	0.6	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
8	8	A14 тележка 4о	1.95	0.6	0.6	0.6	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9	9	A14 тележка 1ч	1.95	0.	0.	0.	0.	1.	0.6	0.6	0.6	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
10	10	A14 тележка 2ч	1.95	0.	0.	0.	0.	0.6	1.	0.6	0.6	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
11	11	A14 тележка 3ч	1.95	0.	0.	0.	0.	0.6	0.6	1.	0.6	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
12	12	A14 тележка 4ч	1.95	0.	0.	0.	0.	0.6	0.6	0.6	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
13	13	A14 тележка 1тв	1.95	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.6	0.6	0.6	0.	0.	0.	0.
14	14	A14 тележка 2тв	1.95	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.6	1.	0.6	0.6	0.	0.	0.	0.
15	15	A14 тележка 3тв	1.95	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.6	0.6	1.	0.6	0.	0.	0.	0.
16	16	A14 тележка 4тв	1.95	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.6	0.6	0.6	1.	0.	0.	0.	0.
17	17	A14 тележка 1с	1.95	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.6	0.6	0.6
18	18	A14 тележка 2с	1.95	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.6	1.	0.6	0.6
19	19	A14 тележка 3с	1.95	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.6	0.6	1.	0.6
20	20	A14 тележка 4с	1.95	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.6	0.6	0.6	1.
21	21	толпа	1.2	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.

Для расчета пролета на один случай расположения вертикальной временной подвижной нагрузки требуется 21 загружение в 16-и столбцах РСН, создаваемых вручную.

Если же делается комплексная задача, со всеми случаями загружения, то удобно для каждого случая создать свою таблицу РСН – тогда столбцов не будет слишком много, путаница не возникнет.

Чтобы получить огибающие эпюры по всем столбцам, нужно поставить галочку «Определяющие РСН»

Огибающие эпюры



Во вкладке «Анализ» выбирается «по РСН определяющим», при наличии – одна из нескольких таблиц РСН. Имеется возможность выбора отображения – минимальные или максимальные значения, расчетные или нормативные.

На фото изображен «Казенный мост» через р. Дон в г. Лебедянь Липецкой области. Год постройки — 1910. Три неразрезных балки по схеме 20+4*25+20 м.
Стоимость строительства (1910) 115 тыс руб ≈ 170 млн сейчас. По НЦС строительство подобного моста составит ≈ 150 млн. Стоимости равны, надежность нет.
«20 и 21 декабря 1910 г прошли комиссионные испытания…, которые показали, что укладка на мосту почти ***полуметрового (0,2 саж.) слоя камней*** *приводит лишь к незначительному изгибу балок. Движение по новому мосту было открыто.»*

0,5 м * 22 кН/м^3=11кПа!

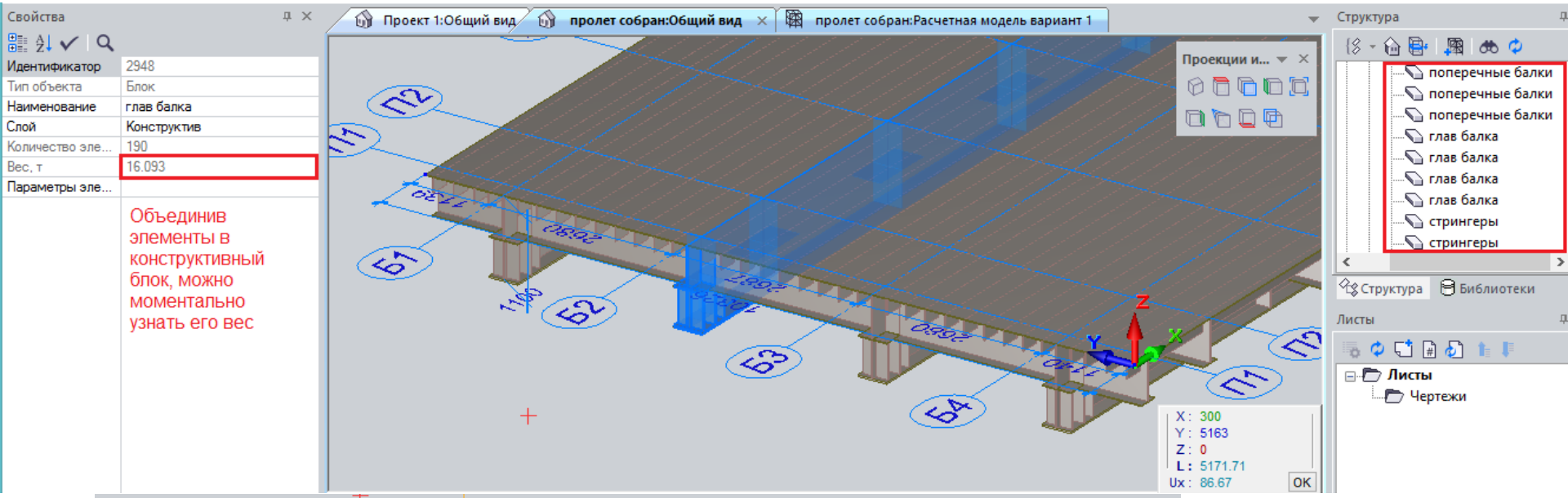
Конструкции столетнего моста, испытанного нагрузкой 1 т/м^2, не выглядят чересчур массивными и старыми. Правда, здесь использован бетон на гранитном щебне с подбором фракций по методу заклинки.
Для длины моста 140 м расчетная нагрузка от колонны 30-тонных грузовиков (Н-30) соответствует интенсивности 0,8 т/м^2. Расчетная интенсивность нагрузки от одной полосы А14 — 0,54 т/м^2 (без учета одной тяжелой тележки).

Путепровод через М-4 в районе Джубги, 2010 год. Обрушение пролета под собственным весом лишних слоев покрытия (0,6-0,7 м вместо нормативных 0,17-0,18 м). К счастью, ни на путепроводе, ни под ним никого не было. Ориентировочно построен был в 70-х годах.

3

Моделирование стального пролетного строения в САПФИР

Моделирование стального пролетного строения в САПФИР



Выполнено детальное моделирование неразрезного пролетного строения моста по схеме 3*22м, с ортотропной плитой проезжей части.

Опорная зона главной балки

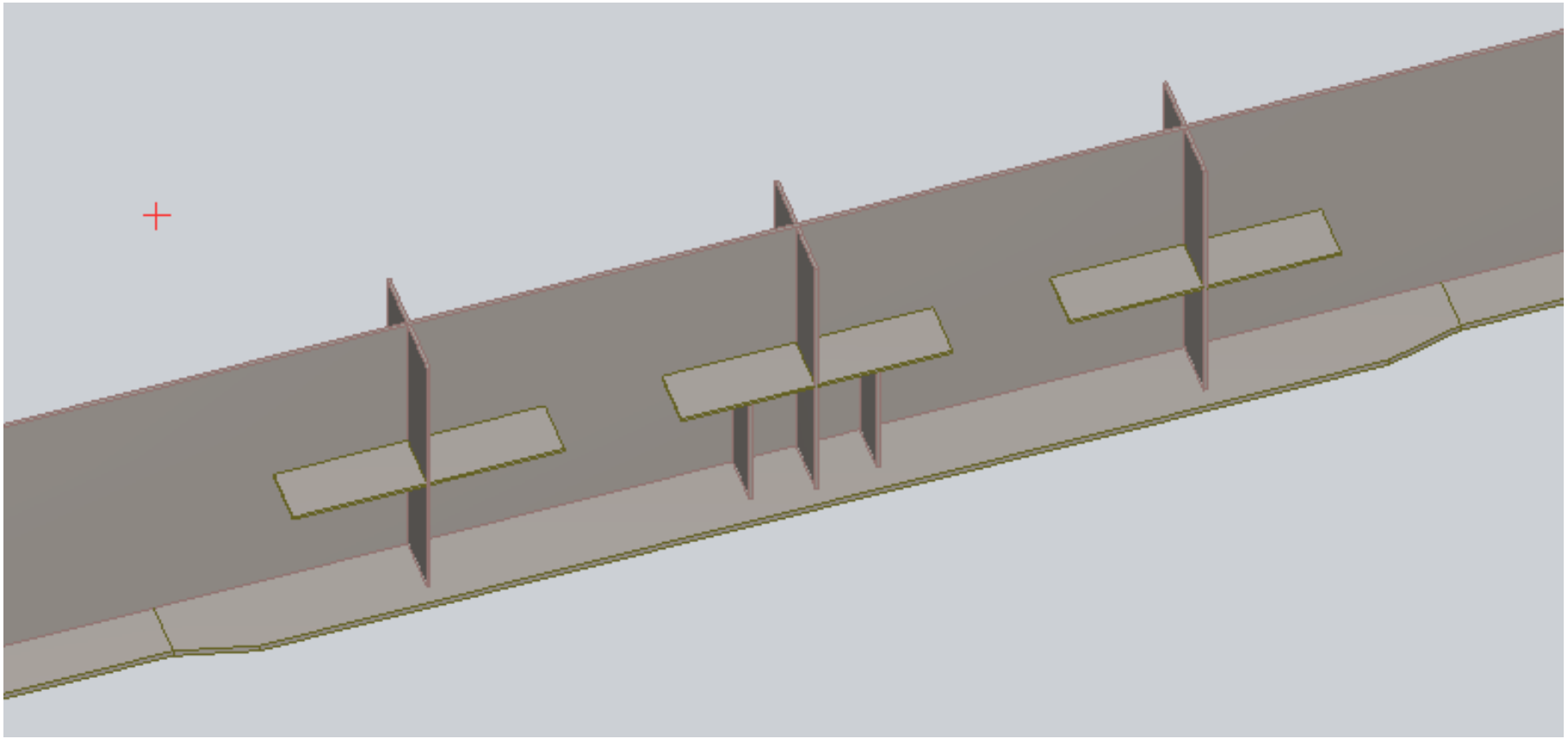
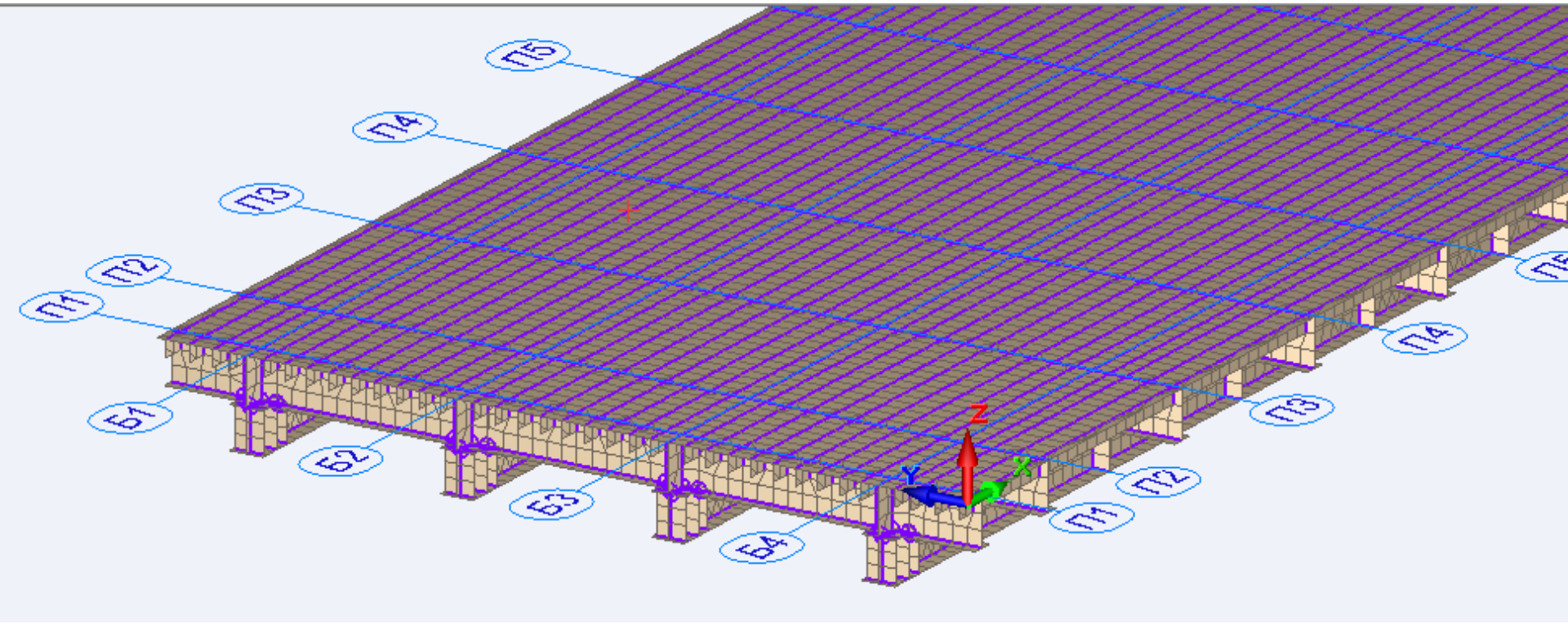


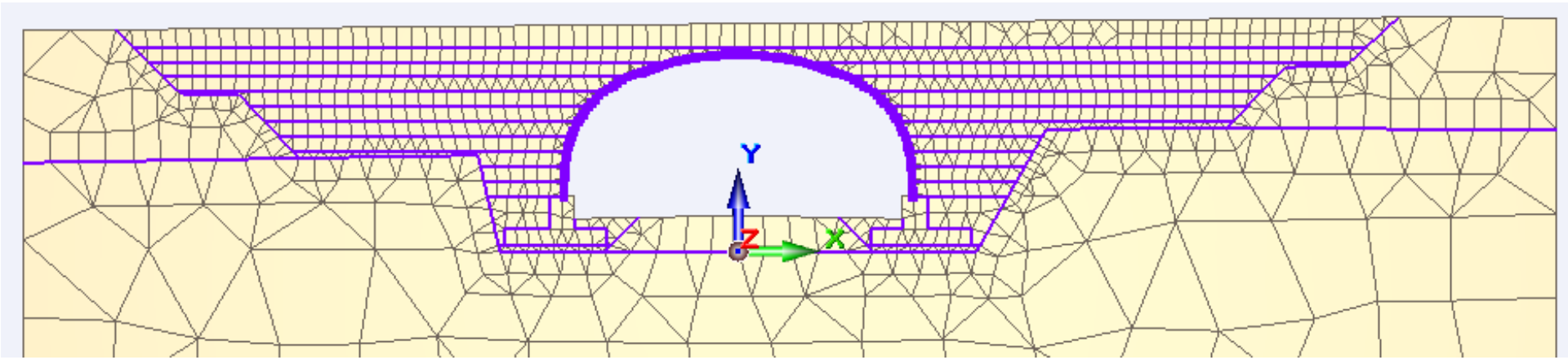
Схема пролетного строения – неразрезная балка 3*22 м.
Уширение нижнего пояса в опорной зоне смоделировано с учетом переходных участков.
Вертикальные и горизонтальные ребра сделаны упрощенно.



Перед объединением элементов в блоки каждому были назначены параметры триангуляции. Т.о., мелкие элементы можно разбивать с одним шагом, крупные – с другим, в местах пересечений сетка будет согласованной.

4 Поверочный расчет путепровода из гофрированной арки

Поверочный расчет путепровода из гофрированной арки



ТЗ предполагало поверочный расчет грунтозасыпного арочного путепровода. Проектная организация предоставила расчет, выполненный в ANSYS.

В САПФИР был загружен поперечник в формате dwg, в результате сформирована плоская расчетная схема с реальным положением всех конструкций и слоев грунта.

После экспорта в ПК ЛИРА-САПР в модели было учтено:

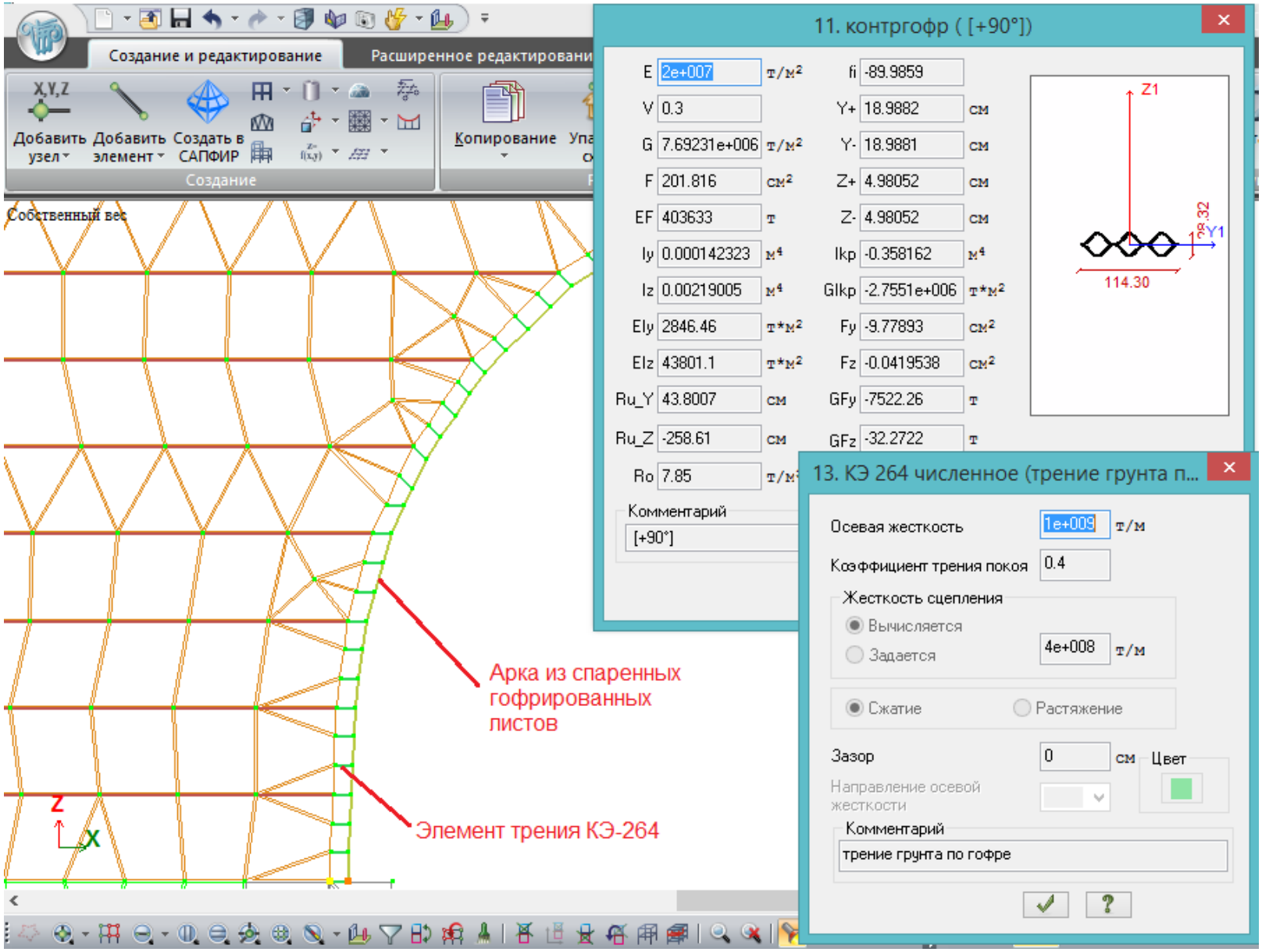
- трение и односторонняя работа (отсутствие прилипания) грунта по арке с помощью контактных элементов КЭ-264;
- сложное поперечное сечение арки (основной гофр+контргофр);
- наличие прослоек геотекстиля между слоями засыпки;
- засыпка произведена в 20 стадий монтажа, по одному слою с каждой стороны.

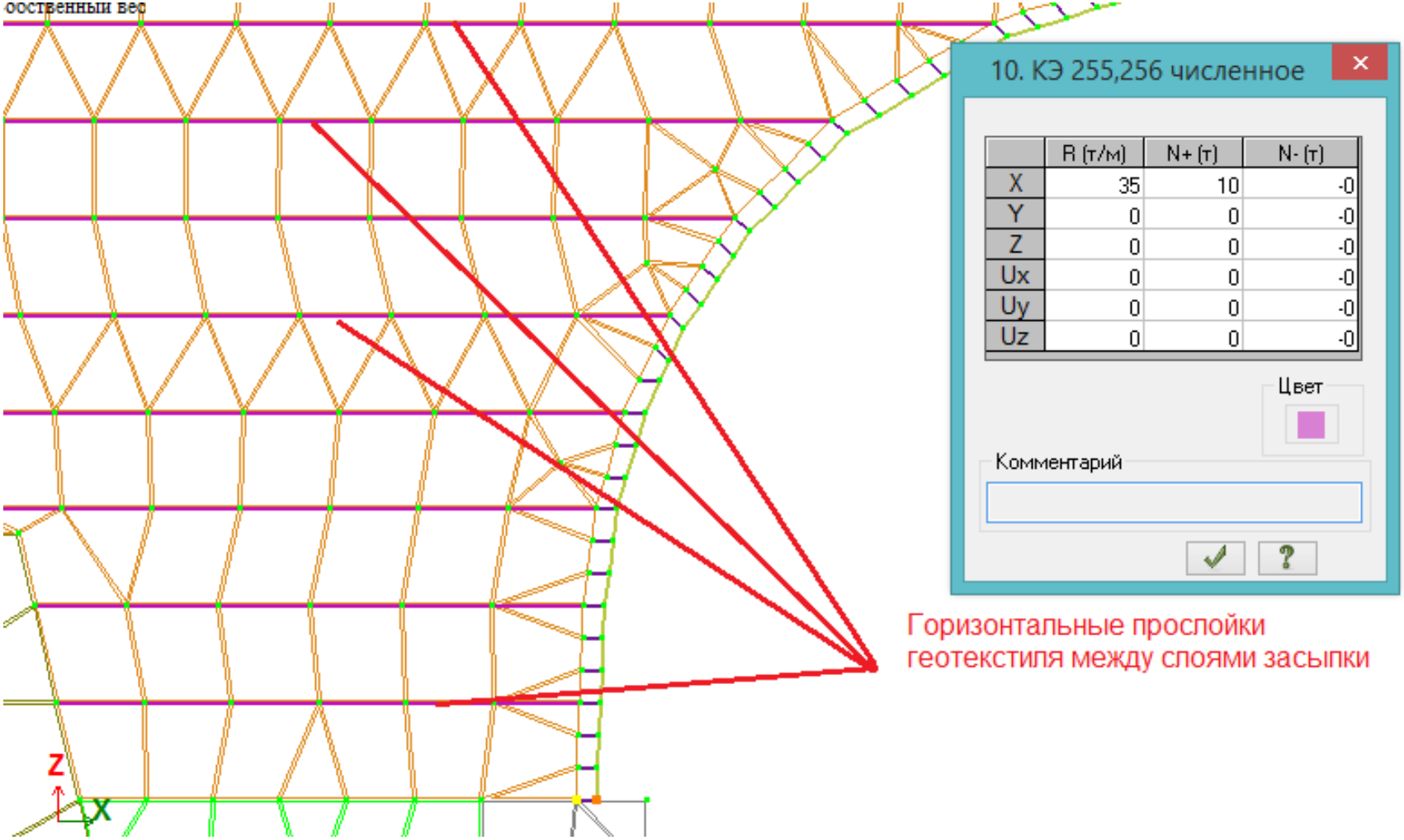
По результатам расчета получены следующие выводы:

1. Сходимость усилий в арке с моделью, выполненной в ANSYS – около 5%;
2. Прослойки геотекстиля практически бесполезны (в ANSYS их даже не было – в проекте положены «на всякий случай»).

Модель создана за полдня, расчет длился 8 часов (КЭ-264 + 24 стадии монтажа).

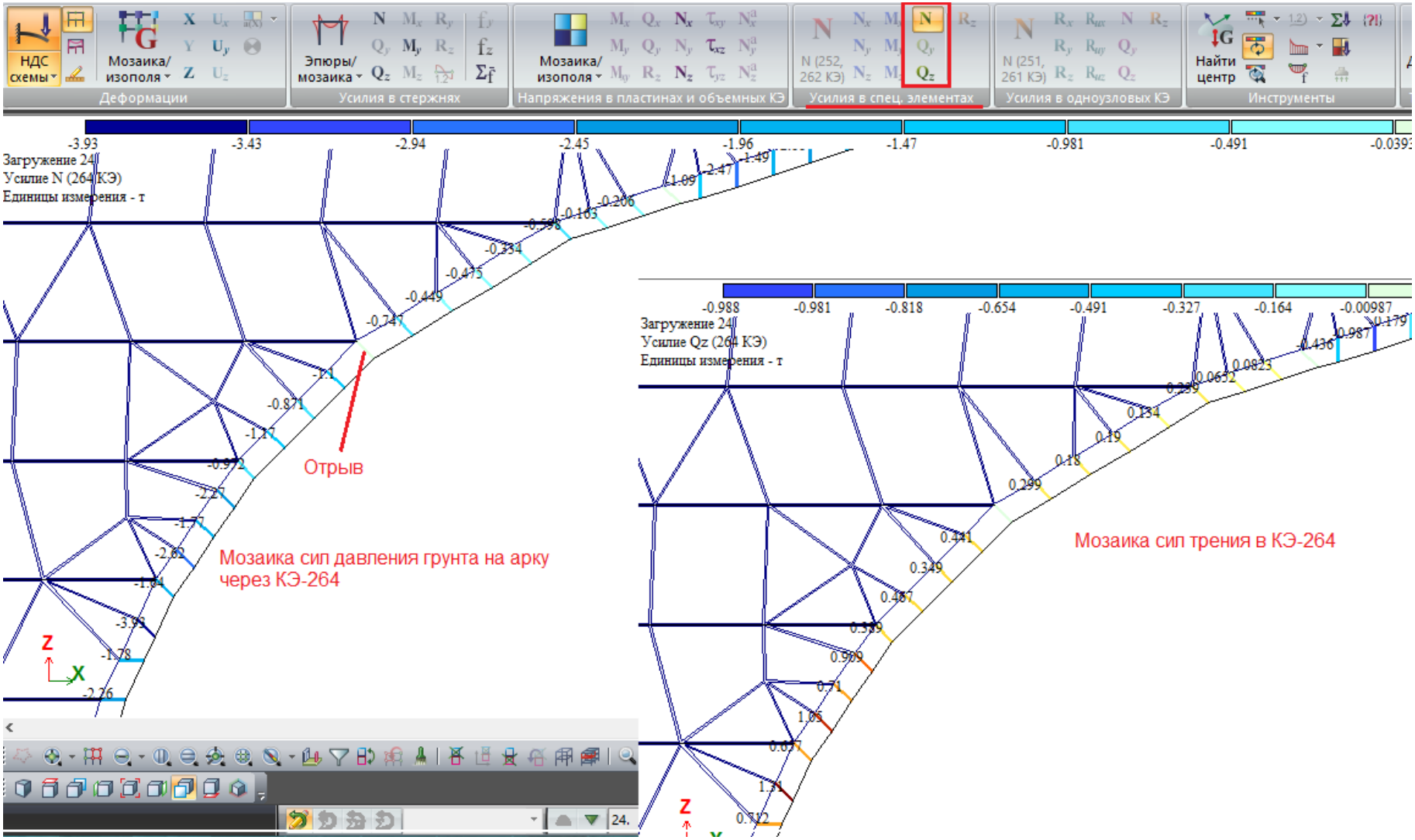
КЭ-модель в ПК ЛИРА-САПР





Опытным путем установлено, что в подобной физнелинейной задаче холсты геотекстиля наиболее адекватно работают в КЭ-255 (выключаются по сжатию и не работают на изгиб).

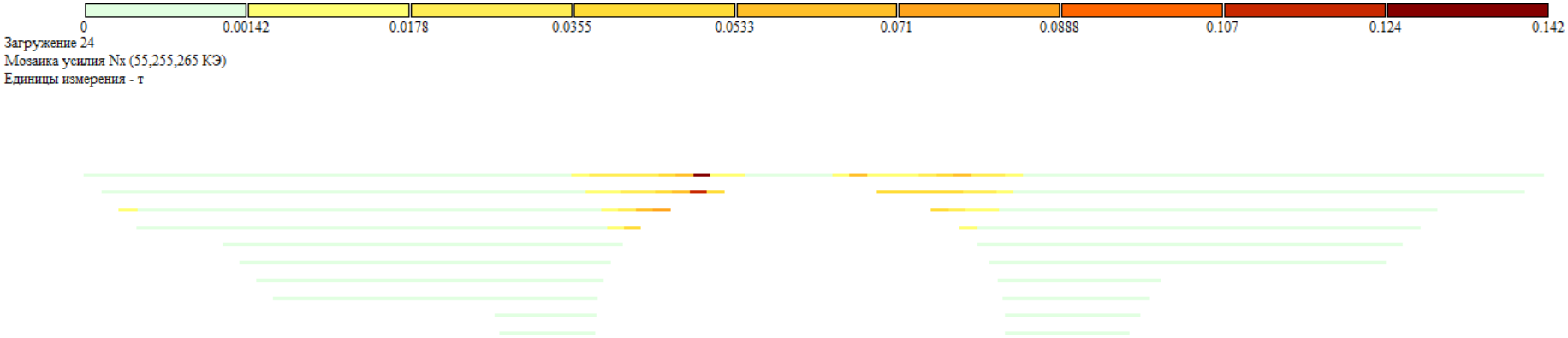
КЭ-модель в ПК ЛИРА-САПР



Анализ работы контактных односторонних элементов трения.

Т.к. отрыв грунта возникал только в двух точках, результаты расчета практически не отличались от гораздо более простой задачи без контактных КЭ-264.

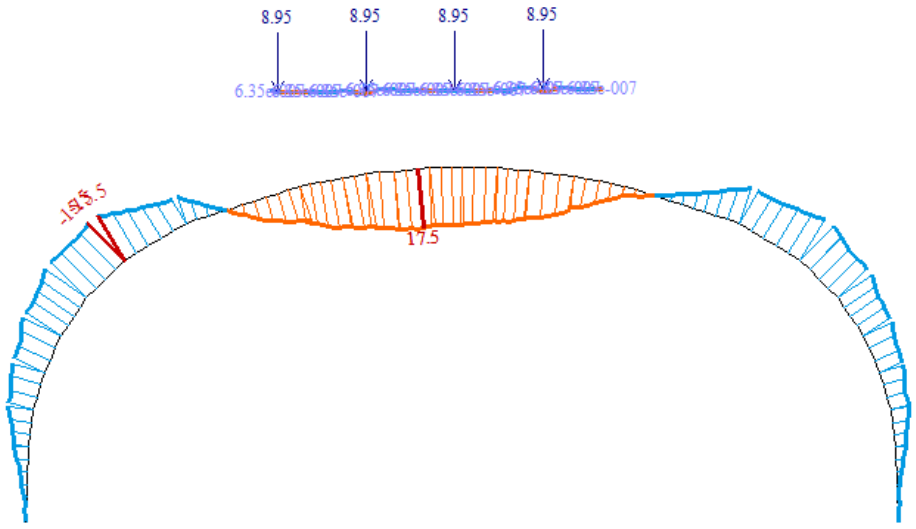
Усилия в прослойках геотекстиля

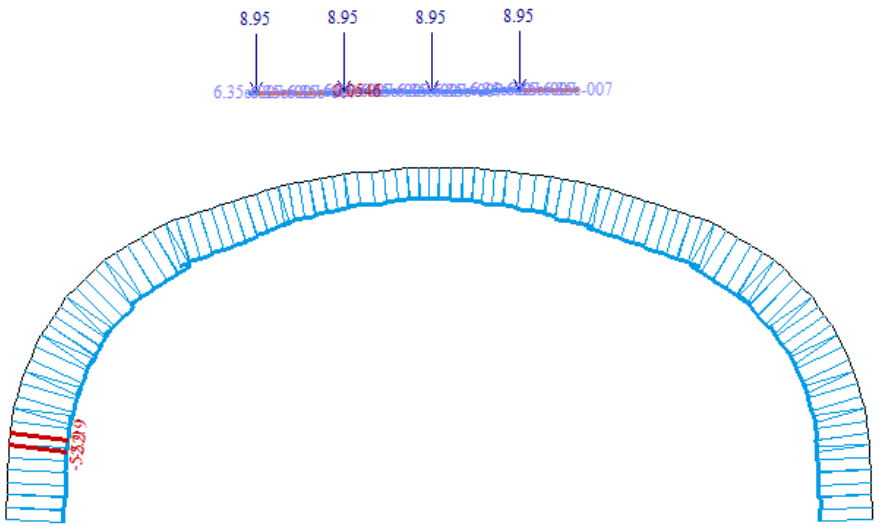


Анализ работы прослоек геотекстиля: практически только в 2-х верхних слоях возникают усилия, да и те очень малы: 0,14 т.

Большинство холстов не включается вообще, т.к. сжаты распором арки.

Расчетные усилия в арке





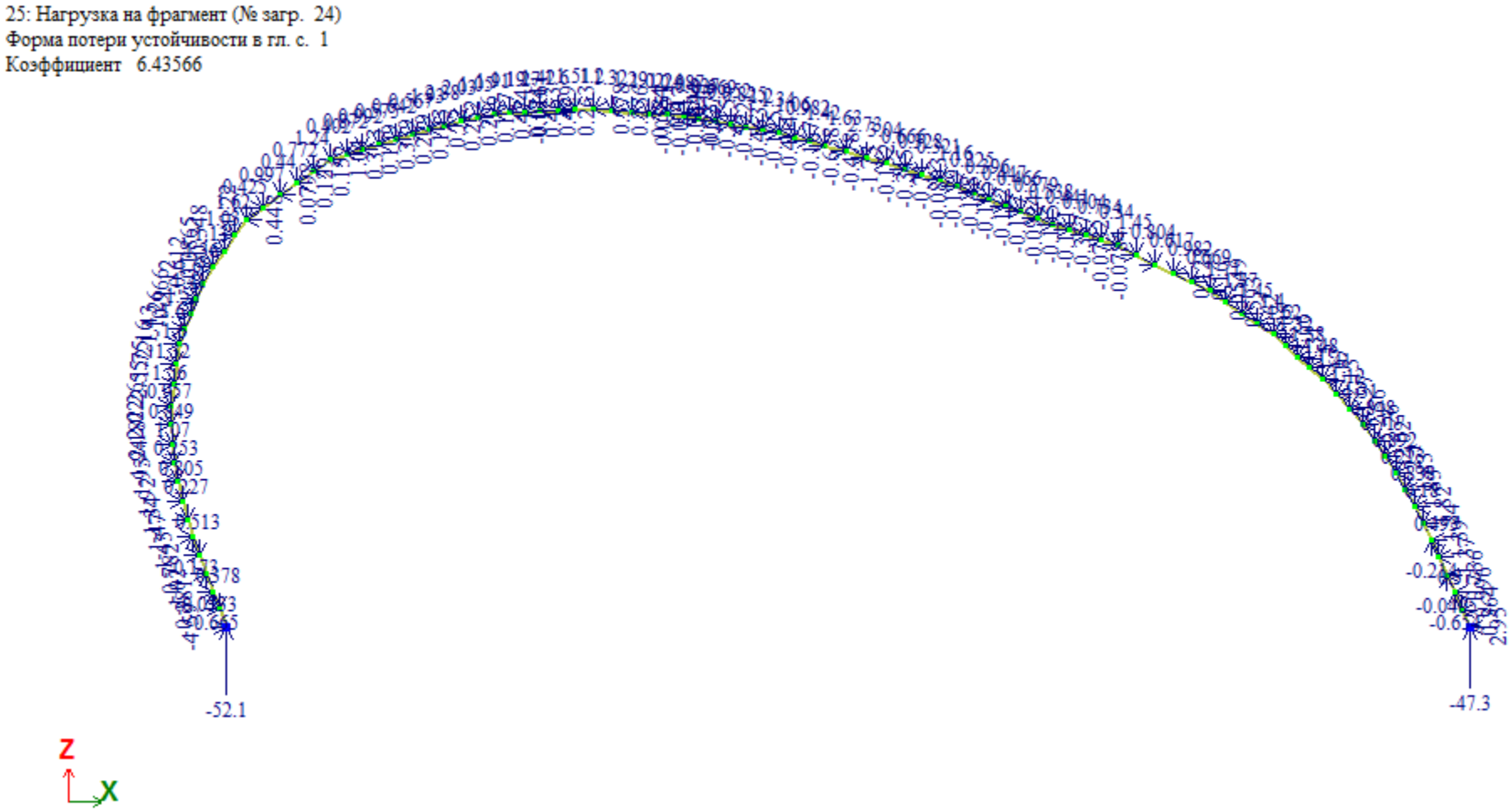
Усилия в арке на последней стадии (наверху установлена нагрузка Н14 с учетом распределения давления в грунте):

M= +17,5 / -15,5 т*м;

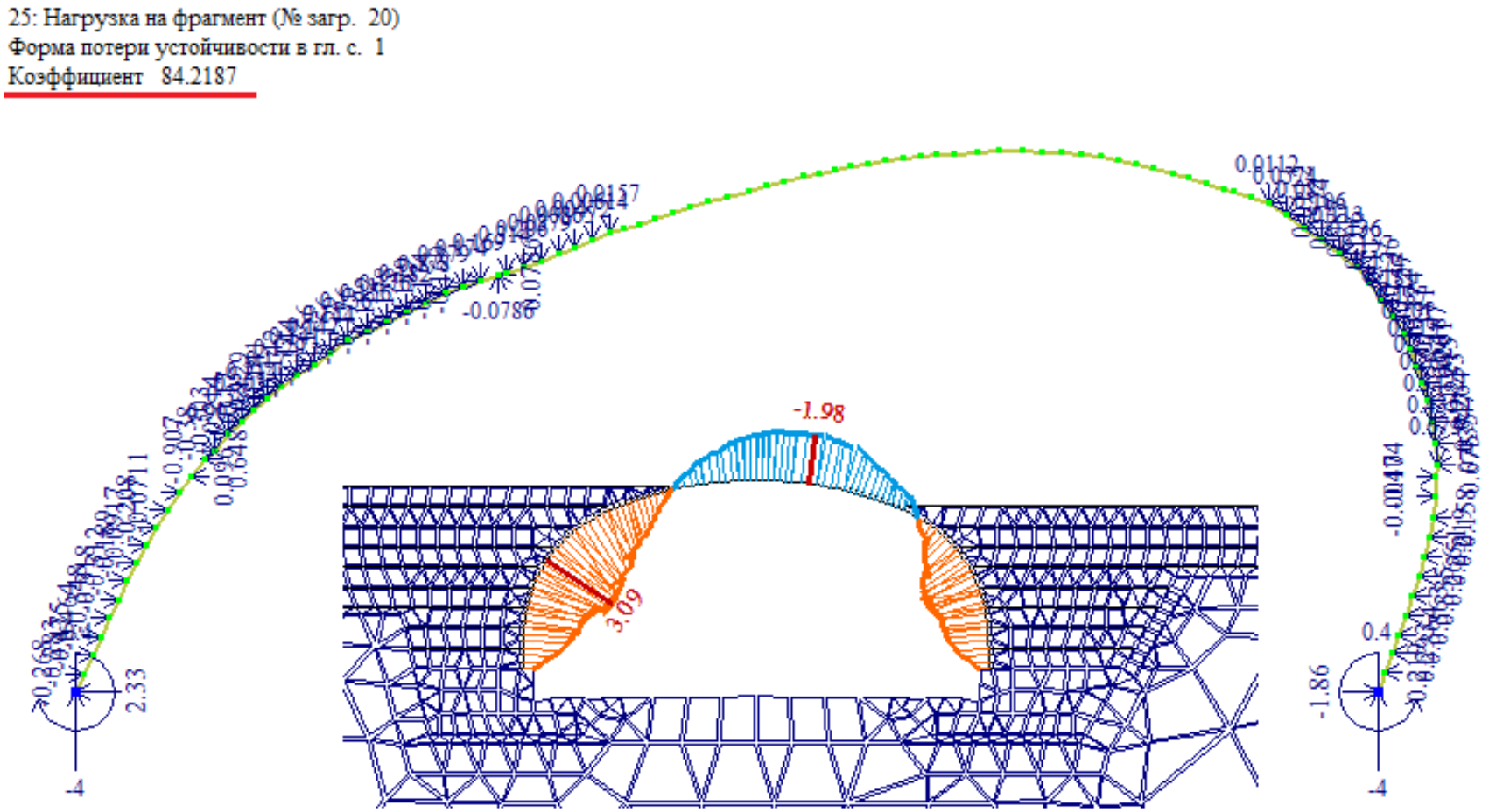
N= -52,9 т.

Расчет подтвердил конструктивное решение по установке контргофра, т.к. одиночный гофр не мог воспринимать такие усилия.

Анализ общей устойчивости



От последней стадии монтажа были собраны нагрузки на фрагмент, и в отдельной линейной задаче проведен расчет устойчивости арки: по первой форме коэффициент запаса 6,44.



Также был выполнен расчет устойчивости на стадии послойной засыпки арки, но т.к. нагрузки при этом намного меньше эксплуатационных, коэффициент запаса получился очень большим – 84.

Спасибо за внимание

Алексей Козлов

ООО «ПРАКТИС-ЦЕНТР» г. Воронеж

79204023292@ya.ru

+7 (920) 402-32-92