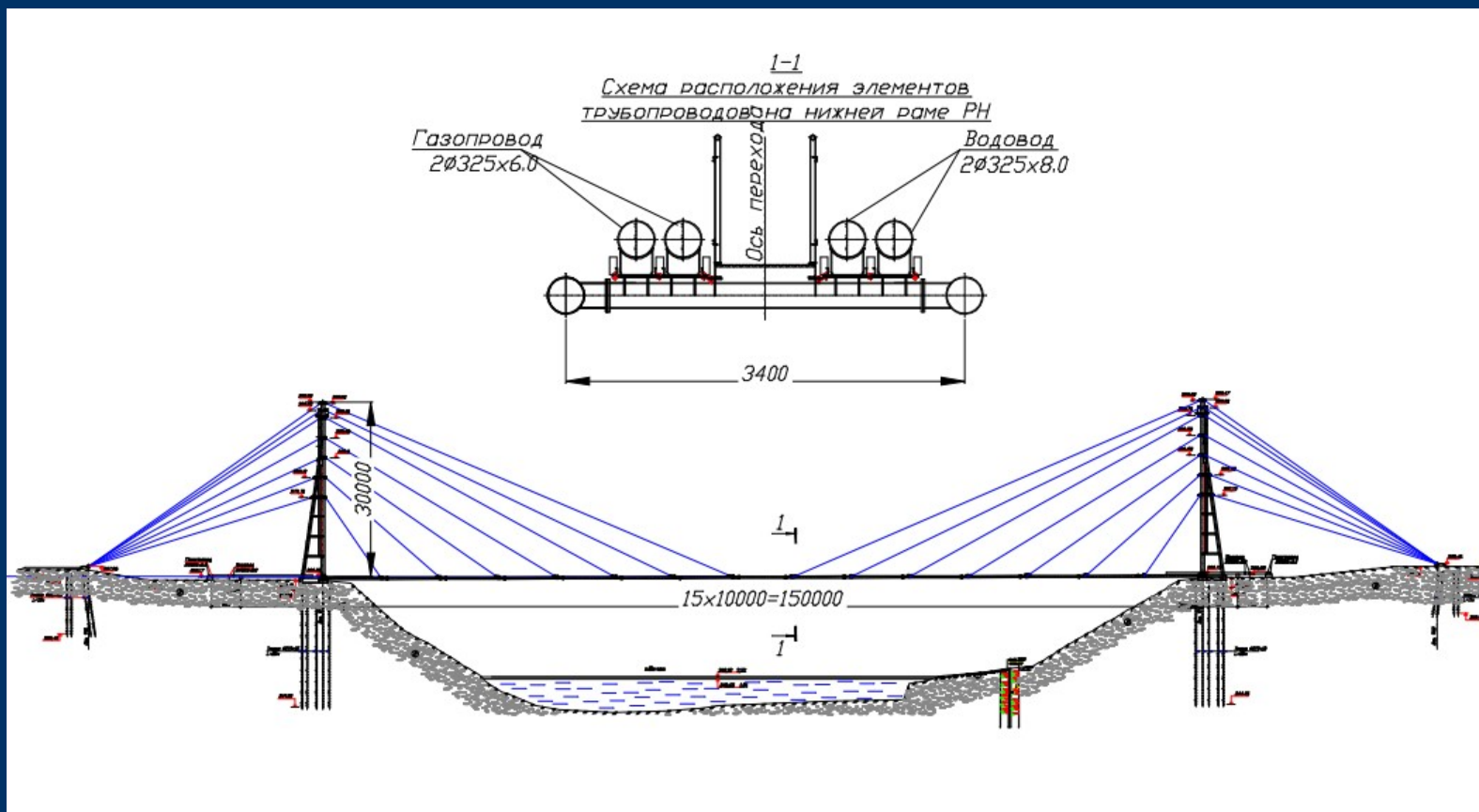


Расчет технологического вантового перехода пролетом 150 м

Козлов Алексей Владимирович, г. Воронеж



Задачи расчёта:

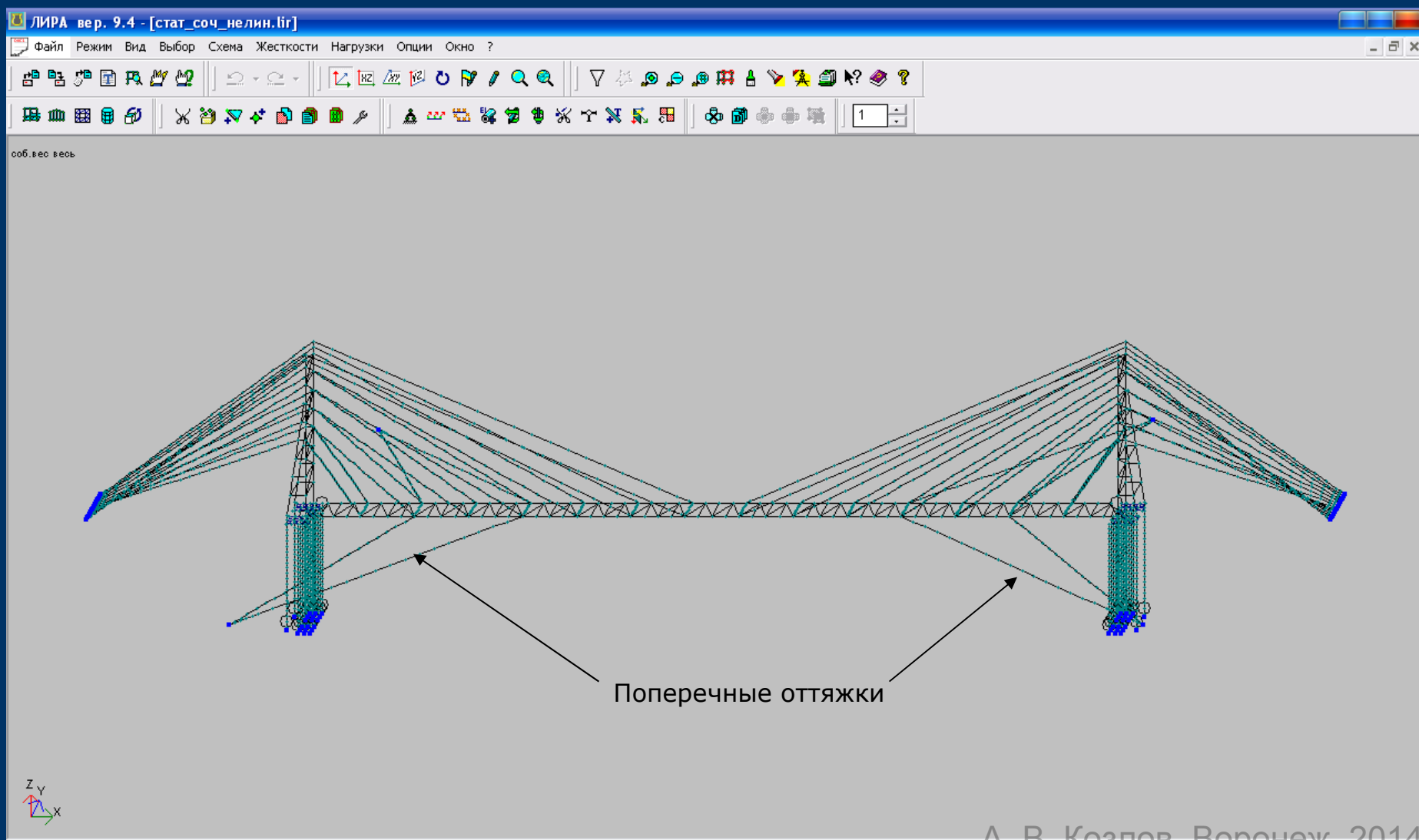
- Статический расчёт геометрически нелинейной схемы с учётом стадийности нагружений
- Динамический расчёт линейной схемы на пульсацию ветра и сейсмику (8 баллов) с использованием стандартных методов ПК ЛИРА
- Исследование аэроупругой устойчивости (расчёт на ветровой резонанс) по оригинальному алгоритму
- Анализ результатов расчётов, выбор неблагоприятных сочетаний нагрузок, проверка сечений в ЛИР-СТК, расчёт свайных фундаментов пилонов

Расчётные схемы

Делятся на две группы:

1. Схема для расчёта на статические нагрузки с учётом геометрической нелинейности и последовательности нагружений.
2. Линейная схема для динамических расчётов.

Нелинейная расчётная схема – элементы КЭ 309 и 308 (форкоп, натяжение вант)



Нагрузки, коэффициенты надежности и сочетаний для статических и динамических расчётов

Нагрузка	Вид	γ_f	Коэфф. сочетаний η	
			Основное	Особое
1. Собственный вес конструкции	Постоянная	1,05 (0,9)	1	1
2. Вес жидкости в коммуникациях	Длительная	1,0	0,95	1
3. Пешеходная нагрузка на служебном проходе	Кратковременная	1,2	0,9	0
4. Ветровая	Кратковременная	1,4	0,9(1)	1
5. Гололед	Кратковременная	1,3	0,9(1)	0
(В скобках – при совместном действии без других нагрузок с учетом п. 7.4 СНиП 2.01.07-85)				
6. Температура	Кратковременная	1,2	0,9	0
7. Сейсмика	Особая	1	0	1

Сочетания статических нагрузок и последовательность загрузений

- I – собственный вес, заполнение труб водой, натяжение вант, разгрузка (убирается вода из труб) – нормативное, определение выгиба от разгрузки;
- II – собственный вес, заполнение труб водой, натяжение вант, разгрузка (убирается вода из труб), толпа – строительное, все коэффициенты =1;
- III – собственный вес, заполнение труб водой, натяжение вант, разгрузка (убирается вода из труб), температурное сжатие – расчетное, $\gamma_f=0,9$ для собственного веса;
- IV – собственный вес, вода в трубах, температурное расширение, статический ветер - расчетное;
- V – собственный вес, вода в трубах, ветер, гололед - расчетное;
- VI – собственный вес, вода в трубах, статический ветер (коэфф. соч.=1);

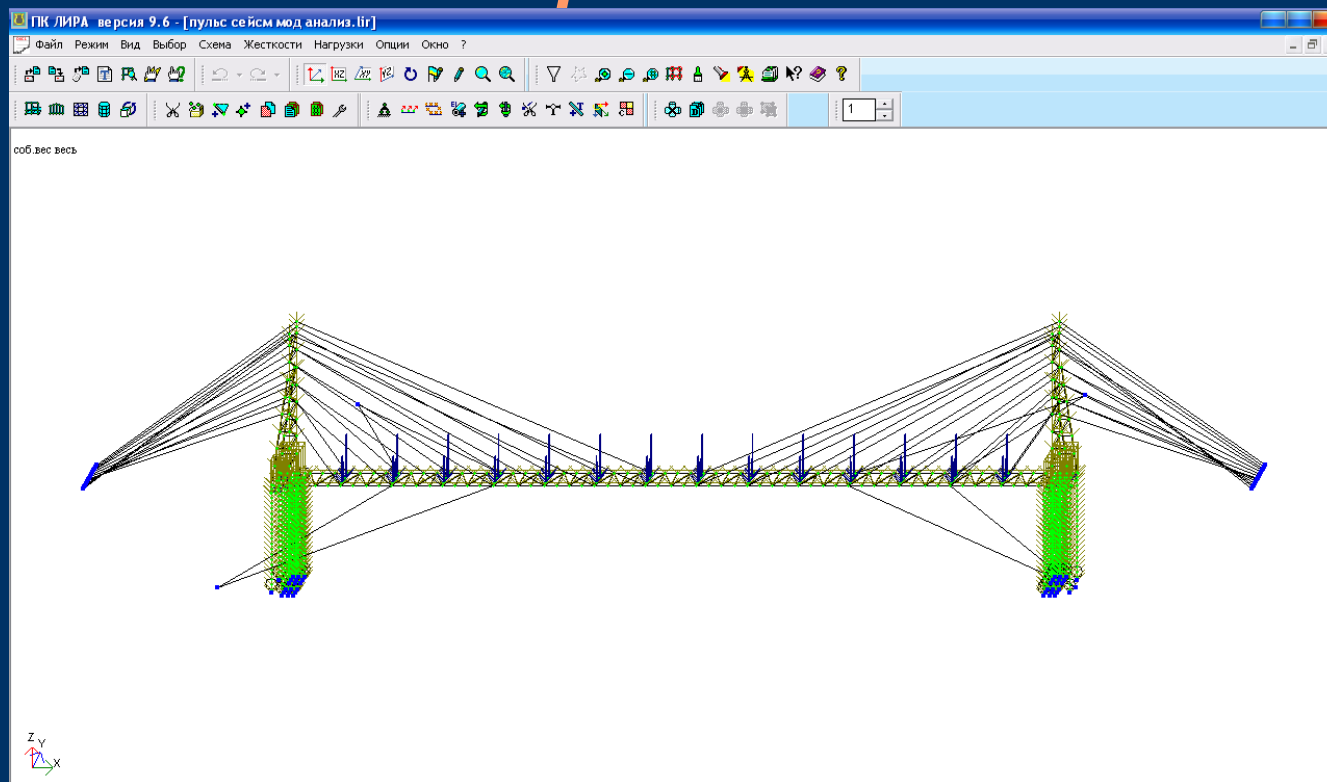
Основные результаты статического расчёта

Элемент, описание	Усилия (перемещения) в сочетаниях						
	I		II	III	IV	V	VI
Узел в середине пролета со стороны водопровода	ΔY	0	0	0	<u>+425</u>	+78	+383
	ΔZ	+127	+14	+295	<u>-146</u>	0	+5
Верхушка пилона	ΔX	-23	-3	<u>-49</u>	+26	+5	+3
	ΔY	0	0	0	+53	+19	<u>+56</u>
Максимальное провисание рабочего ванта	ΔZ	-350	-330	-270	-396	<u>-541</u>	-305
	ΔY	0	0	0	+898	+224	<u>+921</u>
Максимальное усилие в рабочем ванте	N	7,0	8,9	7,4	10,1	10,1	<u>10,3</u>
Середина пролета нижней рамы со стороны водопровода	N	36	45	45,6	<u>111,2</u>	62,1	110,7
	Q	0,47	0,44	0,4	0,34	0,42	0,42
	M_y	-0,92	-0,44	-0,36	0,11	-0,41	-0,43
	M_z	0,47	0,6	0,59	1,12	0,75	1,15
Опорная стойка пилона с подветренной стороны (более нагруженная)	N	-51,1	-68,8	-73,1	<u>-131,1</u>	-89,3	<u>122,7</u>
	Q	0,21	0,16	0	-0,4	0,27	5,2
	M_x	0,95	0,92	1,55	<u>9,97</u>	2,81	7,76
	M_y	-0,16	0,6	1,46	3,56	0,28	-1,6
	M_z	0,39	0,54	0,2	18,1	3,85	15,1

Выводы по результатам расчётов

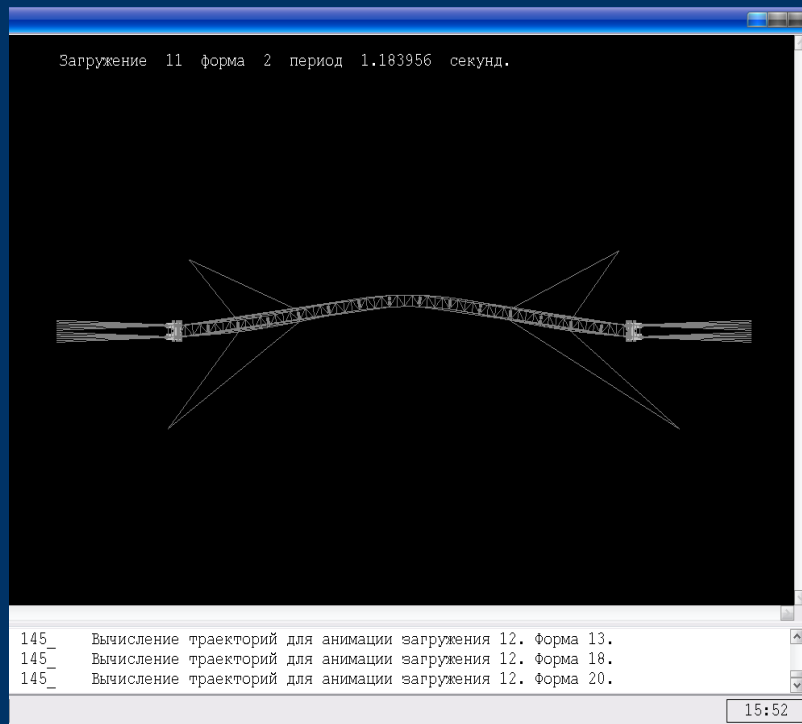
- Сочетанием, вызывающим максимальные усилия почти во всех основных элементах конструкции, является №IV – собственный вес, вода в трубах, температурное расширение, статический ветер.
- Как будет показано далее, вклад пульсации ветра при её динамическом учете почти повторяет результаты, полученные в IV сочетании, вклад сеймики незначителен (конструкция лёгкая и гибкая), а вклад ветрового резонанса даёт больший результат только для середины пролёта.
- Таким образом, проверку сечений всех основных элементов достаточно выполнить для сочетания № IV, для середины пролёта дополнительно вводится особое сочетание с ветровым резонансом, расчет по перемещениям выполняется в нормативных сочетаниях III, IV и особом – с ветровым резонансом.

Линейная расчётная схема



Отличается от нелинейной тем, что вант моделируется одним (от пилона до пролёта) КЭ 10. В статике такая схема работает почти так же, как и нелинейная, только нельзя выбрать начальное провисание пролёта от собственного веса. Нагрузку на вант задавать не следует, т.к. это приведёт к сбору масс в узлы стержня и возникновению множества «сорных» форм колебаний от поворота этих узлов.

Учёт конструктивных особенностей сооружения при расчёте на пульсацию ветра



мод анализ_09.мод анализ - WordPad

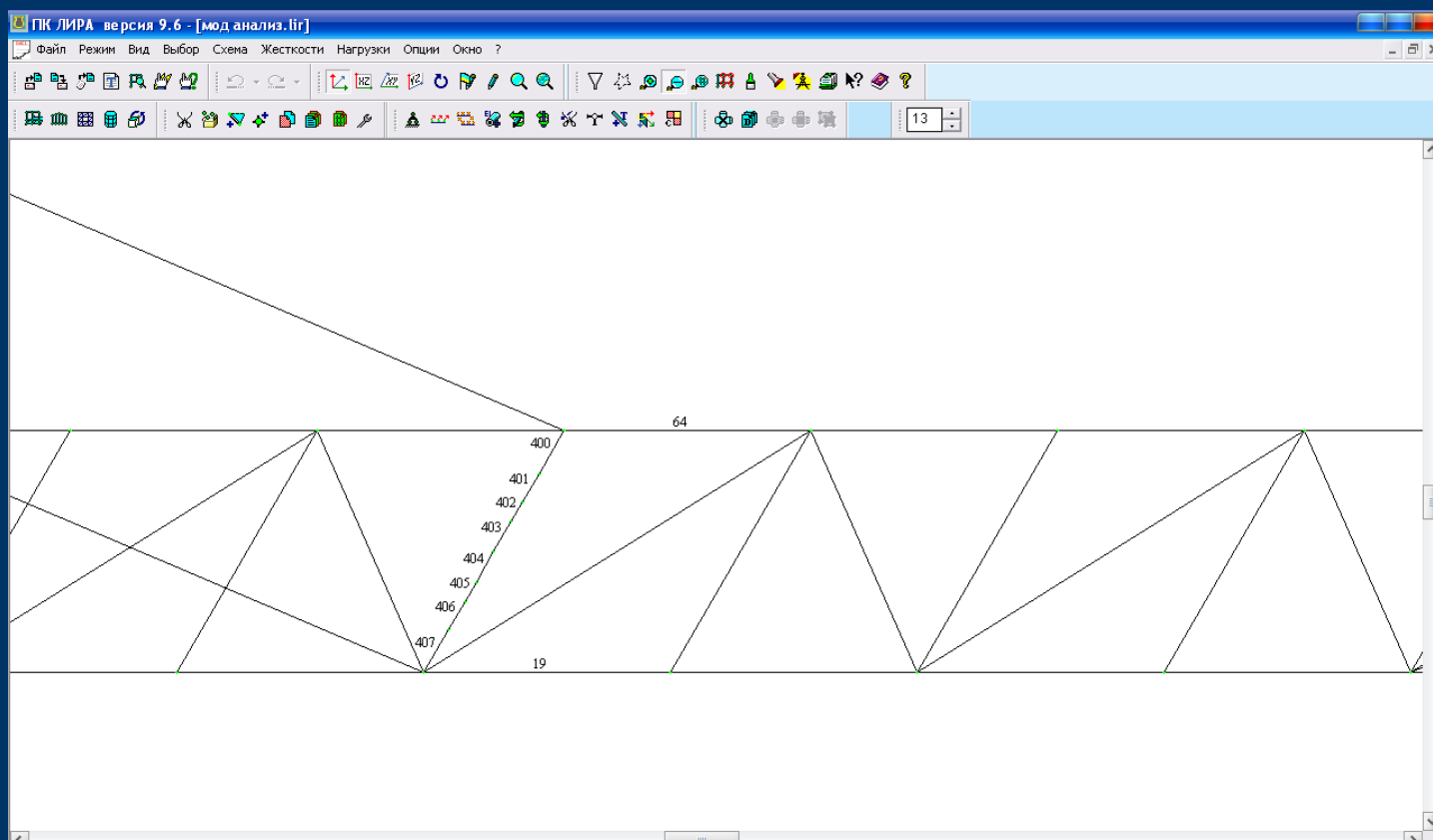
Файл Правка Вид Вставка Формат Справка

СВОБНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ, ЧАСТОТЫ, ПЕРИОДЫ КОЛЕБАНИЙ, ЗАГРУЖЕНИЯ 130

:N	: СОВСТВ.	: Ч А С Т О Т Ы	: ПЕРИОДЫ	: КОЭФФИЦИЕНТ	: МОДАЛЬНАЯ	: П/П: ЗНАЧЕНИЯ	: РАСПРЕДЕЛЕНИЯ: МАССА
:	:	: РАД/С	: ГЦ	: С	:	: В %	:
1	0.217614	4.60	0.73	1.3666	0.697362	0.4	0.40
2	0.188432	5.31	0.85	1.1834	-0.960776	0.8	1.20
3	0.187748	5.33	0.85	1.1791	3.201575	8.7	9.90
4	0.118486	8.44	1.34	0.7441	1.383010	1.6	11.50
5	0.115950	8.62	1.37	0.7282	0.866309	0.6	12.20
6	0.093155	10.73	1.71	0.5850	1.031564	0.9	13.10
7	0.091577	10.92	1.74	0.5751	-0.492139	0.2	13.30
8	0.087293	11.46	1.82	0.5482	0.310788	0.1	13.40
9	0.087201	11.47	1.83	0.5476	-0.862959	0.6	14.00
10	0.073310	13.64	2.17	0.4604	0.777159	0.5	14.50
11	0.069857	14.31	2.28	0.4387	1.436779	1.8	16.30
12	0.063318	15.79	2.51	0.3976	-0.759586	0.5	16.70
13	0.059854	16.71	2.66	0.3759	-1.708640	2.5	19.20
14	0.059110	16.92	2.69	0.3712	0.178005	0.0	19.30
15	0.058647	17.05	2.72	0.3683	2.776459	6.5	25.80
16	0.056952	17.56	2.80	0.3577	0.203019	0.0	25.80
17	0.055138	18.14	2.89	0.3463	0.274097	0.1	25.90
18	0.053033	18.86	3.00	0.3330	-1.539298	2.0	27.90
19	0.049462	20.22	3.22	0.3106	-0.549277	0.3	28.20
20	0.048146	20.77	3.31	0.3024	0.892116	0.7	28.80
21	0.045806	21.83	3.48	0.2877	-0.350926	0.1	29.00
22	0.039606	25.25	4.02	0.2487	-0.199884	0.0	29.00
23	0.038571	25.93	4.13	0.2422	0.674540	0.4	29.40
24	0.038395	26.05	4.15	0.2411	-0.775592	0.5	29.90
25	0.038323	26.09	4.16	0.2407	-0.205798	0.0	29.90

Результаты модального анализа линейной схемы показывают, что первой из низших форм, внесшей существенный вклад, является форма №3 с частотой 5.33 рад/с, однако наибольшие усилия от пульсации возникнут в пролёте при колебаниях по второй форме, т.к. они дают бОльшие горизонтальные перемещения, чем 3-я.

Результаты линейного динамического расчёта



Нумерация КЭ нижней рамы в середине пролёта. Результаты расчёта показали, что вклад сеймики в НДС сооружения невелик, т.к. конструкция лёгкая и гибкая.

Таблица 2.1

Расчетные усилия от пульсации ветра (2-я форма)



Таблица усилий (стержни)

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ загруз	Составл
		N (т)	<u>M_k</u> (т*м)	<u>M_y</u> (т*м)	<u>Q_z</u> (т)	<u>M_z</u> (т*м)	<u>Q_y</u> (т)	<u>R_y</u> (т/м)	<u>R_z</u> (т/м)			
19	1	-11.952	0.016	0.135	0.084	0.137	0.022	0.000	0.000	10	11	2
19	2	-11.952	0.016	0.346	0.084	0.082	0.022	0.000	0.000	10	11	2
64	1	15.112	0.051	0.154	0.089	0.164	0.039	0.000	0.000	10	11	2
64	2	15.112	0.051	0.376	0.089	0.065	0.039	0.000	0.000	10	11	2



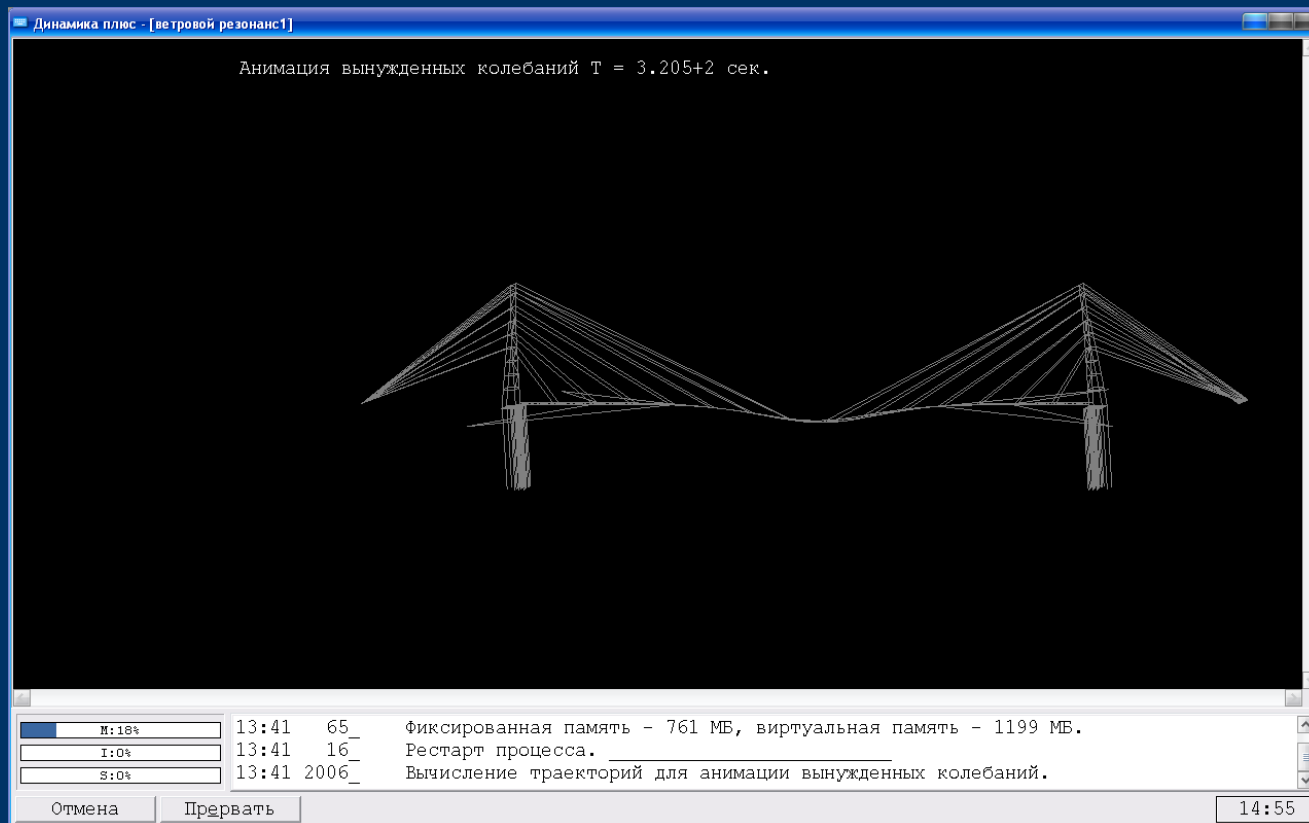
Таблица 2.2.

Расчетные суммарные усилия от сейсмических воздействий

Таблица усилий (стержни)

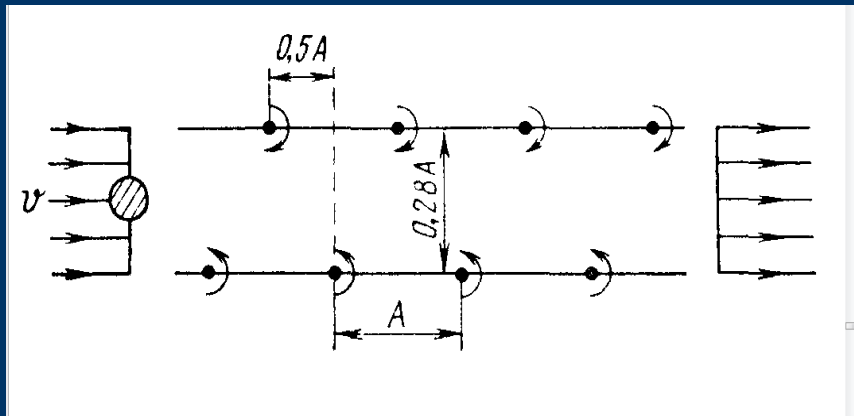
№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ загруз	Составл
		N (т)	<u>M_k</u> (т*м)	<u>M_y</u> (т*м)	<u>Q_z</u> (т)	<u>M_z</u> (т*м)	<u>Q_y</u> (т)	<u>R_y</u> (т/м)	<u>R_z</u> (т/м)			
19	1	-0.519	-0.227	-0.836	0.156	0.031	0.016	0.000	0.000	10	12	S
19	2	-0.519	-0.227	-0.446	0.156	-0.009	0.016	0.000	0.000	10	12	S
64	1	0.432	0.176	0.997	-0.193	-0.042	-0.021	0.000	0.000	10	12	S
64	2	0.432	0.176	-0.514	-0.193	0.012	-0.021	0.000	0.000	10	12	S

Исследование аэроупругой устойчивости с «Динамикой плюс»



Одним из обязательных условий, при отсутствии которого возникновение флаттера невозможно, является соответствие минимальной частоты собственных колебаний вращательной форме. На рисунке показано, что в исследуемой конструкции первая форма колебаний является изгибной.

Теоретические основы аэродинамического расчета



Вантовые мосты — уч. пособие под
ред. проф. А.А. Петропавловского.
М., Транспорт, 1985

Воздействие поочередного срыва вихрей на массивные конструкции мостов, в основном, невелико, опасность представляют флаттерные явления от изгибно-крутильных колебаний балки жесткости. Однако исследуемая конструкция легкая и гибкая, при этом первые формы колебаний — изгибные, что исключает возможность возникновения флаттера. Поэтому в качестве опасного предельного состояния был выбран ветровой резонанс от срыва вихрей с наветренной стороны пролета.

$$\omega = 0,22v/d. \quad (9.2)$$

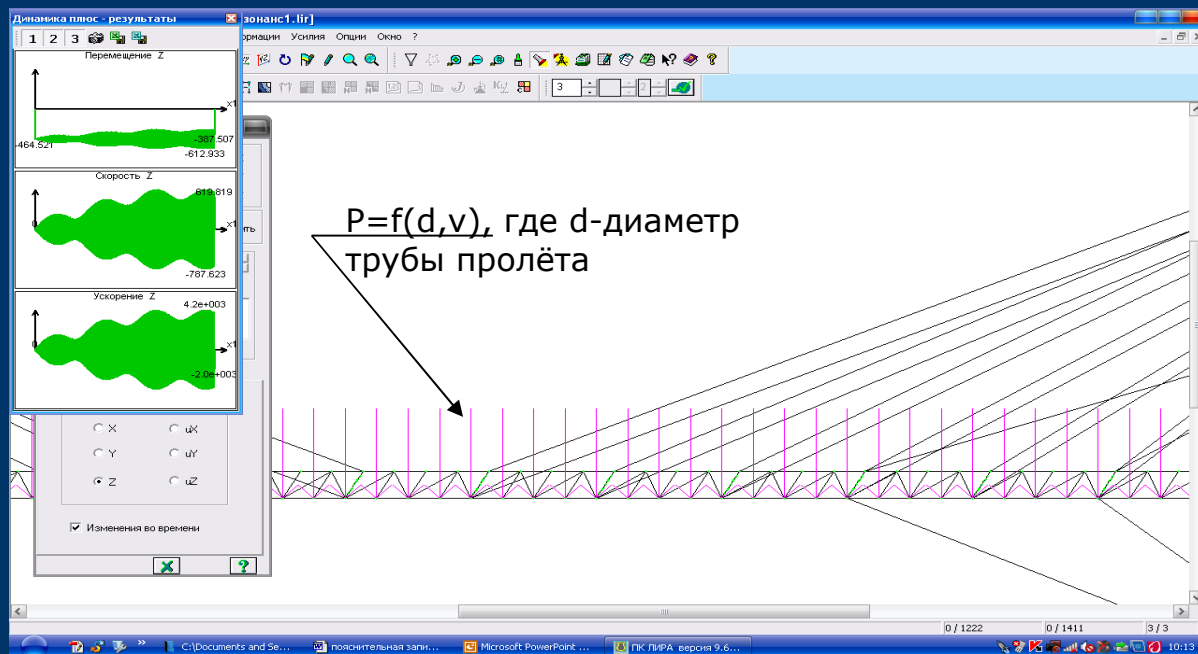
В результате поочередного отделения вихрей на обтекаемую конструкцию действует периодическая сила, направленная перпендикулярно движению потока воздуха. Эта сила может быть представлена гармоническим законом

$$P = 0,5\rho v^2 c_K S \sin(2\pi\omega t), \quad (9.3)$$

где S — площадь проекции препятствия на плоскость, перпендикулярную направлению потока; c_K — коэффициент, зависящий от формы обтекаемой конструкции (для цилиндра $c_K = 1$).

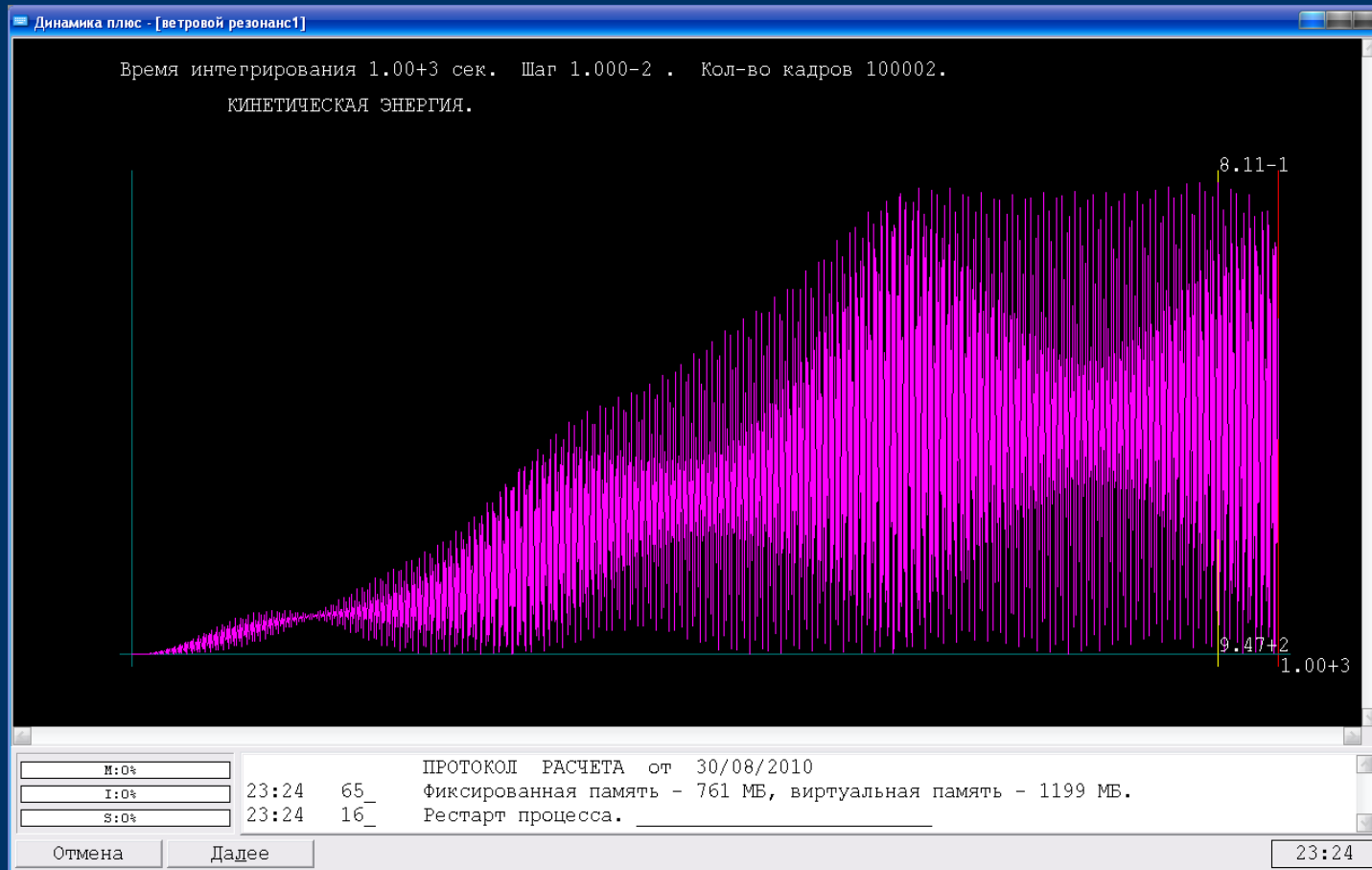
Расчёт на ветровой резонанс

Перемещения на пике резонанса, см. след. слайд



Ветровой резонанс от срыва вихрей при обтекании наветренной стороны пролёта возникнет при действии гармонической силы P с низшей собственной частотой ω . При этом сила P зависит только от скорости ветра V и геометрии пролёта, а V линейно связана с частотой ω , которую легко определить.

Определение пика резонанса



Определив первую собственную частоту ω , задаём большое время интегрирования, чтобы выявить точку, после которой колебания пойдут на убыль либо приобретут постоянную амплитуду. Здесь – около 600 сек. При этом расчёт занимает много времени и требует много места на диске, т.к. следует задавать шаг интегрирования не более 0.1 сек и дробление – не менее 10 (на рисунке кол-во кадров - 100000)

Значения приращений усилий и перемещений при пиковых колебаниях

Элемент (описание)	Вид усилия (перемещения)	Абсолютное значение изменения при достижении максимальных амплитуд резонансных колебаний
1	2	3
Середина пролета, продольная несущая труба нижней рамы	Перемещение в вертикальной плоскости ΔZ , мм	148,4
	Изменение продольного усилия ΔN , т	29,1
	Изменение изгибающего момента ΔM_y , т*м	1,1
Верхушка пилона (вертикальная консоль)	Перемещение в продольном направлении ΔX , мм	20
	Изменение продольного усилия ΔN , т	4,4
	Изменение изгибающего момента ΔM_y , т*м	3,0
	Изменение поперечной силы ΔQ_z , т	1,56
Опорная стойка несущей рамы пилона	Изменение продольного усилия ΔN , т	9,0
	Изменение изгибающего момента ΔM_y , т*м	1,0

Спасибо за внимание!