

**Ю.Б. ГУСЕВ**, гл. конструктор, ОАО „Головной специализированный конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь,  
**А.Ю. ТАНЧЕНКО**, аспирант каф. ТММиСАПР, НТУ “ХПИ”

## **К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ СИНТЕЗЕ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ**

У статті реалізовано методику комплексного дослідження та синтезу елементів конструкції мостових перевантажувачів, запропоновану авторами. На основі узагальненого параметричного опису конструкції проведено дослідження впливу структури та параметрів верхньої будови крана на його міцність та загальну масу. Виконана оптимізація конструкції. Проведені верифікаційні розрахунки напружено-деформованого стану з використанням числових моделей, побудованих в програмних комплексах ANSYS та Ліра.

In the article the method of complex research and synthesis of elements of construction of bridge loaders is realized offered by authors. The research of influencing of structure and parameters of faucet's crest structure is conducted on its strength and general mass on the basis of the generalized parametrical description of construction. Optimization of construction is performed. Verification calculations of stressed and deformed state are conducted with the use of numerical models built in the programmatic complexes ANSYS and Lira.

**Введение.** В работах [1-3] описаны общие подходы к решению актуальной и важной задачи синтеза многофункциональных машин по критериям минимизации массы, обеспечения прочности, жесткости, долговечности на примере мостового перегружателя ПМГ-20. Задача сводится к многоэтапному решению задач структурной и параметрической оптимизации верхнего строения перегружателя по критерию минимальной массы с ограничением на напряжения, определению рекомендаций по обеспечению долговечности и работоспособности силовых элементов перегружателя с учетом утонения и усталости материала, а также решению частной задачи устранения сверхнормативного износа ходовых колес и рельсов грейферной тележки.

Естественно, что при выполнении таких масштабных исследований особую важность приобретают вопросы достоверности численных моделей для анализа физико-механических процессов при эксплуатации перегружателей, поскольку они кладутся в основу решения задач синтеза. В связи с этим в данной статье уделено внимание двум задачам:

- сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкции перегружателя в системах Лира и ANSYS;
- исследование влияния структуры и параметров верхнего строения перегружателя на его массовые и прочностные характеристики.

**Численное моделирование реакции металлоконструкции перегружателя на действие эксплуатационных нагрузок в программном комплексе Лира.** Целью данного исследования является определение напряженно-деформированного состояния металлоконструкции грейферного перегружателя 3281.01.00.000 РР грузоподъемностью 20т (200 кН) конструкции „Головной спе-

циализированный конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь (конечно-элементная модель (КЭМ) показана на рис. 1) . Исходные данные для расчета сведены в табл. 1.

Как известно, в настоящее время все шире внедряются современные методы расчета, например, метод расчета по предельным состояниям [1-10]. Метод расчета по предельным состояниям широко применяется в расчете металлических конструкций. Использование этого метода, основанного на статическом учете условий работы конструкции, позволяет отказаться от недостаточно обоснованного запаса прочности и открывает широкие возможности устанавливать необходимые размеры и сечения металлоконструкции, исходя из конкретных условий ее эксплуатации.

В течение заданного срока службы металлоконструкции могут возникать различные эксплуатационные нагрузки. Разрушение конструкции может произойти как в результате однократного, так и многократного приложения нагрузки. Все действующие нагрузки при этом расчете считают действующими статически. Если число нагружений достаточно велико, то необходима проверка на выносливость. Для многих конструкций проверка на прочность и выносливость может оказаться недостаточной. Вследствие наличия больших деформаций иногда при сохранении прочности и устойчивости конструкции теряется ее работоспособность, т.к. появляющиеся деформации или колебания препятствуют ее нормальной эксплуатации.

Таблица 1

Характеристика	Значение
Масса крана, т	615
Масса металлоконструкции, т	376,5
Строение верхнее, т	186,73
Опора жесткая, т	54,632
Опора шарнирная, т	61,15
Установка шпренгелей, т	66,95
Подкос ветровой, т	4,17х2 = 8,34
Установка ЛПО, т	30,236
ЛПО строения верхнего, т	23,106
ЛПО опоры жесткой, т	5,18
ЛПО опоры шарнирной, т	1,95
Масса тележки с грейфером, т	58,697
Масса грейферной тележки, т	32,133
Масса прицепной тележки, т	16,864
Масса грейфера, т	9,7
Кран ремонтный, т	6,34
Ремонтное помещение и подкрановая эстакада, т	26,71
Механизм передвижения и противоугонные захваты, т	64 + 4 = 68
Барабан кабельный, т	0,671
Установка электропомещения, т	15,5
Установка троллей, т	3,12
Продукция кабельная, т	25,5
Буфера концевые, т	5,033
Выход тележки на консоли, м жесткой опоры шарнирной опоры	15 16
Скорость подъема грейфера, м/сек	1,2
Скорость передвижения, м/сек перегружателя тележки грейферной	0,385 3,73
Количество ходовых колес	32
Марка стали	09Г2С
Режим работы	ВТ
Время аварийного торможения, с	5,905
Время разгона механизма передвижения, с	3

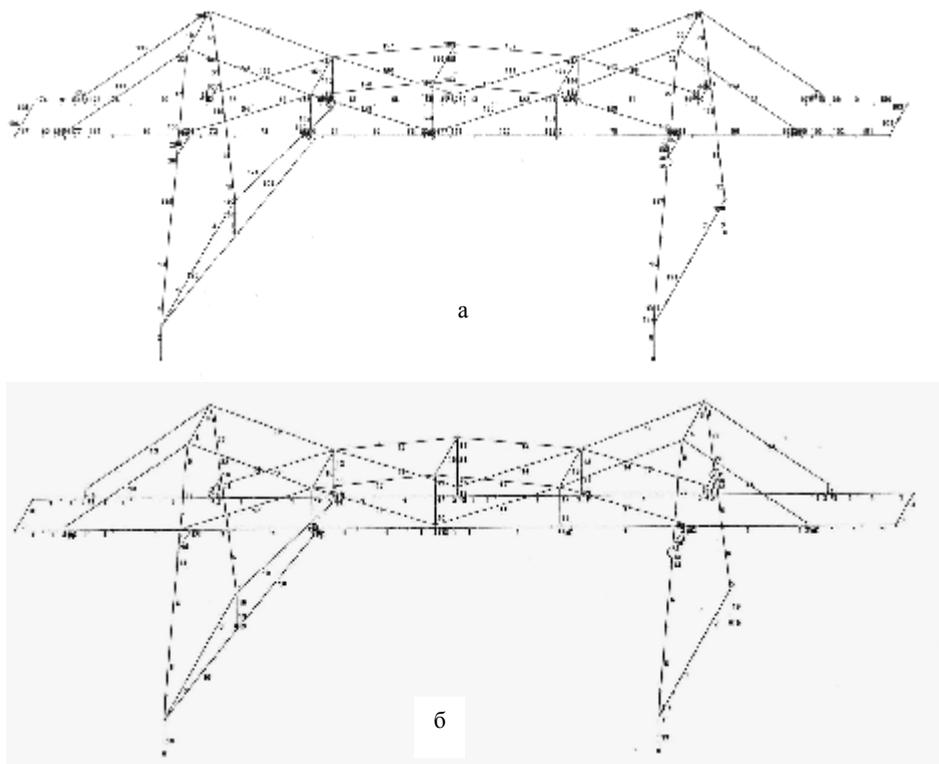


Рис. 1. Схема конструкции перегружателя ПМГ-20  
 а – конечно-элементная модель (с номерами элементов)  
 б - схема жесткостей элементов

Для мостов с соотношением высоты к пролету в пределах  $\geq 1/18$  критерием жесткости являются статический прогиб середины моста, составляющий не более  $1/700$  пролета.

Для стальных конструкций и их элементов должны выполняться расчеты согласно РТМ 24.090.26-77 для следующих предельных состояний:

- *первое предельное состояние* – по прочности и устойчивости форм элементов от однократного действия наибольших нагрузок, ожидаемых за срок службы крана;
- *второе предельное состояние* – по выносливости несущих элементов от многократного действия нагрузок;
- *третье предельное состояние* – по упругой деформации несущих элементов.

Расчеты стальных конструкций выполняются по методу предельных состояний. В расчетах должны выполняться условия [6]:

$$S_p \leq m \cdot R, \quad (1)$$

где  $S_p$  – расчетное напряжение;  $m$  – коэффициент условий работы;  $R$  – расчетное сопротивление материала, равное [6]:

$$R = R^H / k_M, \quad (2)$$

где  $R^H$  – нормативное сопротивление материала;  $k_M$  – коэффициент безопасности по материалу.

В расчетах на прочность и устойчивость должны учитываться следующие нормативные нагрузки: весовые постоянные; весовые подвижные, действие которых возможно в любом сечении вдоль пролета крана; инерционные нагрузки; особые нагрузки; другие нагрузки. Рассмотрим эти нагрузки.

*Нормативные весовые постоянные нагрузки:* вес стальных конструкций (нагрузки берутся с коэффициентом условий работы  $m = 0,9$ ); вес механического и электрического оборудования.

*Нормативные весовые подвижные нагрузки:* вес грузовой и грейферной тележки  $G_T$ ; вес груза  $G_{Гр}$ . Горизонтальные силы от веса груза при отклонении грузовых канатов от вертикали:  $Q_X = Q \cdot \text{tg } \alpha$ ;  $\alpha = 3^\circ$  – угол отклонения канатов;  $Q_Y = Q \cdot \text{tg } \beta$ ;  $\beta = 3^\circ$ . Горизонтальные силы приложены в месте контакта ходовых колес тележки с рельсом (рис. 2).

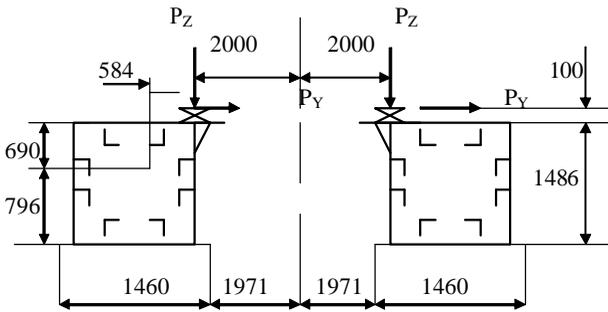


Рис.2. Давление колеса на рельс (от вертикальной нагрузки)

*Нормативные инерционные нагрузки:* горизонтальные инерционные продольные нагрузки  $T$ , возникающие при разгоне или торможении тележки, принимаются для мостовых перегружателей 1/10 от суммы давлений всех колес тележки; приложены в месте контакта ходовых колес и направлены вдоль подтележечных рельсов; горизонтальные инерционные поперечные нагрузки  $H$ , возникающие при передвижении грузовой тележки, принимаются равными 1/10 от давления на колесо и направлены поперек подтележечных рельсов; горизонтальные инерционные нагрузки, возникающие при разгоне и торможении крана [6]:

$$H_i = (G_{KP} \cdot V_{KP}) / gt; H_i^{mel} = (G_T + Q)V_{KP} / gt. \quad (3)$$

*Особые нормативные нагрузки:* горизонтальные продольные нагрузки при наезде крана на упоры. Все нормативные нагрузки принимаются с учетом коэффициентов перегрузок; динамическое воздействие груза при подъеме учитывается динамическим коэффициентом; динамическое воздействие стальных конструкций, оборудования, тележки, груза при передвижении крана учитывается коэффициентом толчков  $k_m$ .

Другие виды нормативных нагрузок – перекос.

Расчет стальных конструкций мостовых перегружателей проводится в следующих расчетных случаях: рабочее состояние „Подъем груза и передвижение тележки”. Перегрузатель находится в неподвижном состоянии, а грейферная тележка – в середине пролета и в крайнем положении на консолях; рабочее состояние „Передвижение крана. Грейферная тележка располагается в пределах пролета или на опорах”; нерабочее состояние „Перегрузатель не работает и застопорен, а тележка без груза расположена над одной из опор”.

Определение расчетного сопротивления [6]

$$S_p \leq mR = 248,0 \text{ МПа}, \quad (4)$$

где  $m$  – коэффициент условий работы;  $R = \sigma_T \cdot k = 276,0 \text{ МПа}$  – расчетное сопротивление материала, вычисляется как произведение нормативного сопротивления  $R_H$  и коэффициента однородности материала  $k$ . Этот коэффициент учитывает опасность снижения способности материала сопротивляться внешним воздействиям вследствие изменчивости механических свойств [5].

**Деформации стальных конструкций.** Деформации от нормативных нагрузок не должны превышать: прогиб балок моста при статическом воздействии грейферной тележки  $\leq 1/700$  пролета; уклон пути на консолях, создающийся под воздействием грейферной тележки с грузом  $\leq 0,003$  длины консоли [6]. Был выполнен расчет на определение жесткостных характеристик сечений. Получены  $F$ ;  $W_Y$ ;  $W_Z$ ;  $W_{KP}$ ;  $EJ_Y$ ;  $EJ_Z$ ;  $EF$ ;  $GJ_{KP}$  – жесткостные и геометрические характеристики сечений.

Расчет на статику выполнен ПК „Лира – WINDOWS”, предназначенным для численного исследования на ЭВМ прочности и устойчивости конструкций „ЛИРА-9” – программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Реальная металлоконструкция перегружателя представлена в виде пространственной стержневой системы. Расчет выполнен на статические и динамические нагрузки. Статические нагрузки моделируют силовые воздействия от сосредоточенных и распределенных сил и моментов. ПК „Лира” реализует численный метод дискретизации сплошной среды – метод конечных элементов (МКЭ). Варианты нагрузок приведены в табл. 2, 3, результаты – в табл. 4, 5.

#### **Анализ решения варианта I.**

1. Нагружение – тележка с грузом в центре пролета. Ветер вдоль подкрановых путей. Суммарная нагрузка на кран:  $\Sigma Y = 410 \text{ кН}$ ;  $\Sigma Z = 7,66 \text{ МН}$ .

Таблица 2

## Сочетание нагрузок в расчетных вариантах

Наименование нагрузки	Обозначение, напр.	Рабочее состояние „Подъем груза и передвижение тележки”				Рабочее состояние „Передвижение крана”				Нерабочее состояние	
		Основное сочетание		Особое сочетание		Основное сочетание		Особое сочетание		Основное состояние	
		нагрузки	Кс	нагрузки	Кс	нагрузки	Кс	нагрузки	Кс	нагрузки	Кс
1. Вес стальных конструкций	$G_M$	$G_M$	1	$G_M$	1	$K_T \cdot G_M$	1	$G_M$	1	$G_M$	1
2. Вес перегрузочных устройств	$G_{П}$	$G_{П}$	1	$G_{П}$	1	$K_M \cdot G_{П}$	1	$G_{П}$	1	$G_{П}$	1
3. Вес механического и электрического оборудования	$G_O$	$G_O$	1	$G_O$	1	$K_M \cdot G_O$	1	$G_O$	1	$G_O$	1
4. Вес грейферной тележки	$G_T$	$\varphi G_T$	1	$\varphi G_T$	1	$K_M \cdot G_T$	1	$G_T$	1	$G_T$	1
5. Вес груза	$Q$	$\varphi Q$	1	$\varphi Q$	1	-	-	-	-	-	-
6. Горизонтальные инерционные продольные нагрузки при передвижении тележки с грузом	$T$	$T$	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-
7. Горизонтальные инерционные поперечные нагрузки при передвижении тележки с грузом	$T$	$T$	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Горизонтальные инерционные нагрузки при передвижении крана	$H_i$	-	-	-	-	$H_i$	0,9	-	-	-	-
9. Нагрузки при перекосе	$H_S$	$0,5 H_S$	0,9	-	-	$H_S$	0,9	-	-	$H_S$	0,9
10. Ветровая нагрузка рабочего состояния	$W_{pc}$	$W_{pc}$	0,9	$W_{pc}$	0,8	$W_{pc}$	0,9	$W_{pc}$	0,8	-	-
11. Ветровая нагрузка нерабочего состояния	$W_{wc}$	-	-	-	-	-	-	-	-	$W_{wc}$	0,9
12. Нагрузка от обледенения конструкции	$G_{CH}$	$G_{CH}$	0,9	$G_{CH}$	0,8	$G_{CH}$	0,9	$G_{CH}$	0,8	$G_{CH}$	0,9
13. Горизонтальная продольная нагрузка при наезде тележки на упоры	$T_O$	-	-	$T_O$	0,8	-	-	-	-	-	-
14. Горизонтальные поперечные нагрузки при наезде тележки на упоры	$H_O$	-	-	-	-	-	-	$H_O$	0,8	-	-
15. Нагрузка при аварийном перекосе	$H_{SO}$	-	-	-	-	-	-	$H_O$	0,8	-	-

Таблица 3

## Нагрузки рабочего состояния

Наименование нагрузки	Обозначение	Нагрузки
1. Вес металлоконструкции пролета балки	$G_M^M$	$G_M^M = 1,86728$ МН; $n_1 = 1,05$ – коэффициент перегрузки; $m = 1,05$ – коэффициент неполноты расчета; $q_1 = 9,2$ кН/м
2. Вес м/к ЛПО (лестницы, площадки, ограждения)	$G_M^{ЛПО}$	$G_M^{ЛПО} = 231,06$ кН; $n_1 = 1,05$ ; $m = 1,05$ ; $q_2 = 1,13$ кН./м ; $q_0 = q_1 + q_2 = 9,2 + 1,13 = 10,33$ кН
3. Вес опоры жесткой вместе с ЛПО	$G_M^{Ж,О}$ $G_M^{ЛПО}$	$G_M^{Ж,О} = 546,32$ кН; $G_M^{ЛПО} = 659,5$ кН;
4. Вес опоры шарнирной вместе с ЛПО	$G_M^{Ш,О}$ , $G_M^{ЛПО}$	$G_M^{Ш,О} = 611,5$ кН; $G_M^{ЛПО} = 695,7$ кН;
5. Ветровой подкос	$G_M^{В,П}$	$G_M^{В,П} = 91,95$ кН
6. Установка шпренгелей	$G_M^{ШПР}$	$G_M^{ШПР} = 738,1$ кН;
7. Ремонтное помещение и подкрановая эстакада	$G^{Р,П}$	$G^{Р,П} + G^{П,Э} = 336,55$ кН; $q = G/L = 11,22$ кН./м
8. Кран ремонтный	$G^{К,Р}$	$G^{К,Р} = 79,88$ кН
9. Барабан кабельный	$G^{К,Б}$	$G^{К,Б} = 8,052$ кН ( расположен на краю консоли)
10. Установка электропомещения	$G^{ЭП}$	$G^{ЭП} = 186$ кН; ( расположено на $l_1 = 5,5$ м от жесткой опоры и консолю к балке $l_2 = 2,1$ м); $M_{\chi} = -390,6$ кНм
11. Установка троллей	$G^{ТП}$	$G^{ТП} = 31,2$ кН ( равномерно по мосту)
12. Кабельная продукция	$G^{КАБ}$	$G^{КАБ} = 343,44$ кН; $q = 1,5$ кН/м (равномерно по мосту)
13. Буфера конечные	$G^b$	$G^b = 50,3$ кН·1,2 = 60,4кН
14. Механизм передвижения и противоугонные захваты	$G^{М,П}$	$G^{М,П} = 660$ кН; $\Sigma = 1,80632$ МН
15. Вес тележки грейферной	$G^T$	$G^T = 321,33$ кН

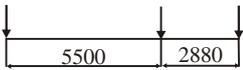
Наименование нагрузки	Обозначение	Нагрузки
16. Вес прицепа	$G^{ПП}$	$G^{ПП}=168,64$ кН; $G_0^T=321,33+168,64=489,97$ кН; 489,97 кН·1,2·1,05=617,4 кН
17. Вес груза	$G^{ПР}$	$G^{груз+грейфера}=252$ кН; $R_1=164,22$ кН; $R_2=164,22$ кН; $R_3=106,24$ кН 
18. Горизонтальные инерционные нагрузки при передвижении грейферной тележки с грузом (нагружение 3)	$T^X$ ; $K_c=0,9$	$T_1^X = 22,2$ кН; $T_1^X = 0,1 \cdot K_c \cdot n \cdot R_j$ , где $n=1,5$ - коэффициент перегрузки; $M_y=22,2 \cdot 0,79=17,5$ кН·м; $T_3^X = 9,56$ кН; $M_y=7,6$ кН·м
19. Горизонтальная инерционная поперечная нагрузка при передвижении грейферной тележки	$H$ ; $K_c = 0,9$ ;	$H_1^y = 22,2$ кН; $M_x=17,5$ кНм; $H_3^y = 0,1 \cdot 0,9 \cdot 1,5R_3=9,56$ кН; $M_x = 7,6$ кНм
20. Горизонтальные силы от веса груза при отклонении грузовых канатов	$Q_x$ ; $Q_y$	$Q_x = Q_y = Q \cdot \text{tg}3^\circ=13,2$ кН
21. Нагрузка перекоса	$0,5H_S$ ; $K_c=0,9$	$\Delta = 150$ мм - нормативное взаимное смещение опор; $\Delta = 0,005 \cdot 60\text{м} = 0,3\text{м}$ ; $0,5 \cdot 0,3\text{м} = 0,15\text{м}$ ; $\Delta = 0,15 \cdot 0,9 = 0,135\text{мм}$
22. Ветровая нагрузка рабочего состояния: на мост; на опоры; на ветровой подкос; на шпренгельную систему; на тележку и груз	$W_{PC}$ ; $K_c=0,9$	$W_{1\text{МОСТ}}^y=88,3$ кН и $W_{2\text{МОСТ}}^y= 21,6$ кН (на первую и на вторую балку моста соответственно); $q_1 = 0,83$ кН/м; $q_2 = 0,2$ кН./м; $W_{\text{ОПОРЫ}}^y=12,6$ кН (на первую и затененную стороны); $W_{\text{ОПОРЫ}}^1 = 2,52$ кН (на 1 узел шарнирной и жесткой опоры); $W_{\text{ПОДКОС}} = 5,4$ кН ( на обе ветви подкоса); $W_{1\text{ШПР}} = W_{2\text{ШПР}} = 41$ кн.; $q = 0,257$ кН./м; $W_{\text{СТ}^* \text{CP}} = 1,2$ кН; $W_{\text{СТ}^* \text{KP}}=0,09$ ; $W_{\text{ТЕД}} = 18$ кН; $W_{\text{ГР}} = 5,4$ кН
23. Нагрузка от обледенения	$G_{\text{снег}}$ $K_c=0,9$	$W_{\text{снег}} = 0,1 \cdot 0,9G_{\text{крана}} = 480$ кН

Таблица 4

Напряжения в металлоконструкции перегружателя. Кран неподвижен. Передвижение тележки

Жесткость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_N$ , МПа	$\sigma_{MY}$ , МПа	$\sigma_{MZ}$ , МПа
1	93	2	4	96,6	-14,8	-39,6	-42,2
2	89	1	5	67,3	-1,7	59,6	9,3
3	105	1	4	39,2	-0,4	-12,5	-26,3
4	39	2	1	93,2	-0,4	-90,7	-2,1
5	10	2	4	76,1	-32,8	-40,7	-2,7
6	116	1	4	104,7	-39,2	-45,0	-20,6
7	4	2	4	80,6	11,1	67,7	1,8
8	20	1	1	95,8	-11,6	-76,5	-7,7
9	26	2	5	67,9	-27,6	-37,4	-2,8
10	123	1	3	62,3	-12,7	-45,5	-4,1
11	131	2	1	110,9	7,3	68,2	35,4
12	134	2	1	95,0	10,3	47,0	37,7
13	111	2	4	120,1	76,5	33,7	9,9
14	113	2	5	121,3	73,5	25,0	22,8
15	158	1	1	99,1	-70,1	-23,2	-5,8
16	151	2	1	129,1	-8,3	-119,3	-1,5
17	154	1	1	94,8	-66,4	-25,6	-2,8
18	29	2	4	108,4	-16,0	-90,7	-1,7
20	130	2	3	35,3	5,2	4,8	25,4
21	184	2	1	38,0	9,1	0,7	28,26
22	186	2	4	126,2	-22,6	-101,8	-1,9

Таблица 5

Напряжения в металлоконструкции перегружателя. Вариант 1.  
Кран неподвижен (с учетом перекоса)

Жест- кость	№ стерж- ня	№ сече- ния	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_N$ , МПа	$\sigma_{MY}$ , МПа	$\sigma_{MZ}$ , МПа
1	92	2	4	96,0	-14,2	-29,0	-42,3
2	90	1	5	72,5	2,5	64,4	5,6
3	103	1	5	42,9	-0,01	-12,9	-29,9
4	39	2	1	105,4	-1,1	-101,0	-2,3
5	10	2	4	30,1	-31,4	-37,4	-10,3
6	116	1	4	96,0	-37,5	-25,1	-28,8
7	4	2	4	82,6	11,5	67,2	3,9
8	20	1	4	105,7	-14,9	-84,2	-6,7
9	24	1	4	75,3	-25,7	-44,3	-5,3
10	124	1	3	78,5	-21,4	-47,5	-9,6
11	132	2	1	120,3	18,4	78,9	24,9
12	133	1	1	141,0	26,1	108,8	11,0
13	111	2	4	129,2	79,5	34,4	15,3
14	113	2	5	127,4	74,2	24,8	28,4

Жесткость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_N$ , МПа	$\sigma_{MY}$ , МПа	$\sigma_{MZ}$ , МПа
15	158	1	1	96,3	-73,5	-11,1	-10,6
16	151	2	1	193,8	-7,6	-184,3	-1,9
17	154	1	1	100,9	-76,0	-22,9	-2,1
18	29	2	4	112,9	-16,2	-92,6	-4,1
20	143	2	3	35,4	5,9	9,4	20,2
21	134	2	1	45,8	13,5	1,5	30,7
22	186	2	4	132,0	-22,9	-104,6	-4,5

2. Нагружение – тележка с грузом в центре без учета массы крана. Суммарные нагрузки на кран:  $\Sigma Z = 869$  кН.

3. Нагружение – тележка в центре. Ветер вдоль подтележечных путей. Суммарные нагрузки на кран:  $\Sigma X = 250$ кН;  $\Sigma Z = 7,66$  МН.

4. Нагружение – тележка с грузом на консоле жесткой опоры ( в крайнем положении). Суммарная нагрузка на кран:  $\Sigma Y = 410$  кН;  $\Sigma Z = 7,66$  МН.

5. Нагружение – тележка с грузом на консоли шарнирной опоры. Суммарная нагрузка на кран:  $\Sigma Y = 410$  кН;  $\Sigma Z = 7,66$  МН.

Прогибы конструкции от статического воздействия грейферной тележки с грузом должны подчиняться условию:  $\Delta f / L \leq [f_{cm}]$ , где  $\Delta f$  - фактический прогиб,  $L$  – характерный линейный размер,  $f_{cm}$  – критерий жесткости (для пролета моста  $f_{cm} = 1/700$ , для консольных балок  $f_{cm} = 0,003$ ). В результате расчета получены следующие значения:

1) середина пролета:

$$\Delta f = 47,5 \text{ мм}, L = 60 \text{ м}; \Rightarrow \Delta f / L = 0,00008 < 1/700 \sim 0,0014;$$

2) ремонтная консоль (жесткой опоры), прогиб конца консоли от действия тележки

$$\Delta f = 30 \text{ мм}, L = 20,65 \text{ м}; \Delta f / L = 0,0014 < 0,003.$$

3) длина консоли шарнирной опоры

$$L = 25 \text{ м}; \Delta f = 55 \text{ мм}; \Delta f / L = 0,0022 < 0,003.$$

**Описание расчетного варианта: „Рабочее состояние, передвижение крана”.** Здесь рассматривается два случая сочетания нагрузок при передвижении крана: 1. Особые сочетания. 2. Основное сочетания. Нагрузки для особого сочетания приведены в табл. 6. Здесь приведены варианты нагружения: 1 – тележка в центре пролета, ветер поперек моста крана; 2 – вес тележки; 3– тележка в центре, ветер на кран вдоль моста; 4– тележка у опоры крана. Максимальные напряжения для этого варианта сведены в таблицу максимальных напряжений. Для случая „Основное сочетание”  $V_{кр} = 0,385$  м/сек = 23,1 м/мин;  $k_m = 1$  – коэффициент толчков на металлоконструкцию, оборудование и тележку.

Нагрузки для основного сочетания приведены в табл. 7, результаты расче-

тов – в табл. 8. Для особого сочетания определены инерционные нагрузки на элементы и приложены в соответствующие узлы схемы. Рассмотрены два варианта: удар крана на два буфера и удар крана о буфер с перекосом (табл. 9, 10).

К расчету горизонтальных инерционных нагрузок, возникающих при разгоне и торможении крана: инерция тележки с грузом  $H_m = (G_T + Q)V_{KP}^2 / q \cdot a = 33$  кН;  $M_X = 13$  кН·м; инерция моста:  $H_M = 172$  кН;  $q_T = 1,61$  кН/м;  $q' = 0,805$  кН/м; инерция жесткой опоры  $H_{ЖО} = 9$  кН; инерция шарнирной опоры:  $H_{ШО} = 30,3$  кН; инерция механизма передвижения:  $H_{М.П.} = 32$  кН. Общая инерционная нагрузка: 296 кН. Связь наложена в месте установки буфера. Для нерабочего состояния перегружателя данные расчетов сведены в табл. 11, 12

Таблица 6

Рабочее состояние „Передвижение крана. Тележка без груза располагается в пределах пролета или на опорах”. Особое сочетание. Удар о буфер.  
Нагрузки для II-го рабочего состояния

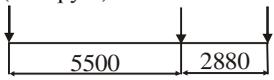
Наименование нагрузки	Обозначение	Нагрузки
1. Вес стальных конструкций	$G_M$ ; $K_C = 1$	Нагрузки металлоконструкции крана из 1-го варианта
2. Вес тележек (без груза) 	$G_M$	$G_{срейф.тел} + G_{срейфера} = 527,1$ кН; $G_{прещел.тел} = 212,48$ кН; $R_1 = R_2 = 131,78$ кН.; $M_x = \pm 77$ кН/м; $R_3 = 106,24$ кН; $M_x = \pm 62$ кН/м; $R_j = 131,78$ кНН; $R_2 = 131,78$ кН; $R_3 = 106,24$ кН
3 Ветер рабочего состояния	$W_{PC}$ ; $K_C = 0,8$	Ветер вдоль подкрановых путей. $\Sigma W_{PC}^Y = 300$ кН; (1 и 4 нагружение) Ветер поперек подкрановых путей $\Sigma W^Y = 140$ кН (3 нагружение)
4. Нагрузка от обледенения конструкций	$G_{ОБЛ}$ ; $K_C = 0,9$	$G_{ОБЛ} = 0,1 \cdot 0,9 \cdot G_{KP} = 430$ кН
5. Горизонтальная поперечная нагрузка при наезде крана на упоры	$H_0$ ; $K_C = 0,8$	$H_0 = \frac{(G_M + G_0 + G_T)}{qa} V_{KP}^2$ , где $a = 0,0787$ м (ход поршня); $V_{KP} = 0,385$ м/сек; берется $50\% V_{KP}$ ; $V_{KP}^1 = 0,1925$ ; $H_0 = 236,4$ кН (буфер установлен на $h = 710$ мм от УГР)
6. Нагрузка при аварийном перекосе	$H_{СО}$ ; $K_C = 0,8$	Нагрузка при перекосе определяется нормативным взаимным смещением опор крана $\Delta S = 1,2\% \cdot L = 0,012 \cdot 60 = 0,72$ м

Таблица 7

Рабочее состояние „Передвижение крана. Основное сочетание”.

Нагрузки для П-го рабочего состояния

Наименование нагрузки	Обозначение	Нагрузки
1. Вес стальных конструкций	$G_M^1$ ; $K_C = 1$ ; $K_m = 1$	Нагрузки металлоконструкции и оборудования взяты из 1-го варианта. $K_m = 1$ (коэффициент толчков, т.к. $V_n = 0,385$ м/сек)
2. Вес тележки ( без груза )	$G_{MEL}$ ; $K_m = 1$	$R_1 = R_2 = 131,78$ кН; $M_x = \pm 77$ кНм; $R_3 = 106,24$ кН; $M_x = \pm 62$ кНм
3. Горизонтальная нагрузка при передвижении крана	$H_i$ ; $K_C = 0,9$	$F_{ин} = m \cdot a$ ; $a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = 0,1193$ м/с <sup>2</sup> ; $F_{ин \cdot крана} = 65,7$ кН; $F_{ин \cdot опоры жестк} = 6,4$ кН; $F_{ин \cdot опоры шарн} = 6,8$ кН; $F_{ин \cdot мех перед} = 3,55$ кН; $F_{ин \cdot пролет строен} = 46,4$ кН; $F_{ин тел} = 6,3$ кН
4. Нагрузка при перекосе	$H_S$ ; $K_C = 0,9$	$\Delta S = 0,005 L = 0,3$ м; $0,3 \cdot 0,9 = 0,27$ м – взаимное смещение опор
5. Ветровая нагрузка рабочего состояния	$W_{P,C}$ ; $K_C = 0,9$	Ветер вдоль подкрановых путей $\sum W_{P,c}^y = 300$ кН; ветер поперек подкрановых путей $\sum W_{P,c}^x = 140$ кН
6. Нагрузка от обледенения конструкций	$G_{CH}$ ; $K_C = 0,9$	$G_{OBL} = 0,1 \cdot 0,9 G_{KP} = 480$ кН

Таблица 8

Напряжения в металлоконструкции перегружателя. Вариант 2. Основное сочетание

Жесткость	№ стержня	№ сечения	Нагружение	$\sigma_{max}$ (МПа)	$\sigma_N$ (МПа)	$\sigma_{MY}$ (МПа)	$\sigma_{MZ}$ (МПа)
1	74	1	1	74,6	1,6	1,7	40,9
2	54	2	1	65,4	13,9	15,2	36,3
3	103	1	1	33,9	-0,5	-7,0	-26,4
4	39	2	4	129,4	-1,5	-121,5	-5,4
5	9	2	1	75,6	-27,3	-13,0	-35,4
6	13	2	1	36,6	-33,8	-13,8	-39,4
7	3	2	1	54,6	6,3	31,7	16,7
8	20	1	4	116,8	-12,4	-90,3	-14,0
9	24	1	4	71,0	-14,4	-47,7	-8,9
10	124	1	1	86,2	-23,5	-45,7	-17,1
11	132	2	1	113,0	18,1	73,3	21,7
12	133	1	1	138,8	28,7	96,5	13,5
13	111	2	1	93,1	46,5	32,2	14,4
14	167	2	3	82,7	35,2	24,7	22,8
15	158	1	1	90,8	-67,1	-9,3	-14,3
16	151	2	1	225,3	-7,1	-216,6	-1,7
17	154	1	1	100,5	-75,1	-23,1	-2,3

Жесткость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ (МПа)	$\sigma_N$ (МПа)	$\sigma_{MY}$ (МПа)	$\sigma_{MZ}$ (МПа)
18	29	2	4	115,3	-10,0	-104,0	-1,3
20	143	2	1	36,6	5,3	10,5	20,8
21	184	2	1	44,7	12,2	2,6	29,4
22	186	2	4	132,2	-14,1	-117,5	-0,5

Таблица 9

Напряжения в металлоконструкции перегружателя. Вариант 2.  
Особое сочетание нагрузок. Удар в оба буфера

Жесткость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ (МПа)	$\sigma_N$ (МПа)	$\sigma_{MY}$ (МПа)	$\sigma_{MZ}$ (МПа)
1	93	2	4	65,1	-6,5	-23,4	-35,2
2	51	1	1	46,4	9,0	29,6	6,0
3	106	1	4	31,7	-0,6	-13,8	-17,3
4	39	2	4	106,1	0,4	101,5	4,1
5	9	2	1	78,9	-24,2	-39,5	-15,3
6	116	1	4	101,5	-33,0	-51,8	-15,7
7	3	2	1	70,5	4,1	58,7	7,7
8	20	1	4	99,9	-12,5	-87,3	-0,1
9	24	1	4	65,6	-15,9	-46,2	-2,6
10	124	1	1	59,9	-8,6	-36,7	-14,6
11	131	2	1	109,9	9,5	77,0	23,4
12	133	1	1	120,9	20,9	91,9	8,2
13	111	2	1	78,5	41,8	31,7	5,0
14	153	1	1	71,8	30,5	35,5	5,8
15	158	1	1	81,7	-64,2	-13,0	-4,6
16	151	2	1	160,1	-7,4	-151,4	-1,3
17	154	1	1	36,4	-64,3	-20,1	-1,5
18	29	2	4	123,7	-8,9	-113,5	-1,4
19	191	1	1	45,4	-19,3	-3,5	-22,6
20	143	2	1	34,9	5,8	4,8	24,3
21	184	2	1	45,4	11,5	0,5	33,4
22	186	2	4	143,1	-12,6	-123,3	-2,3

Таблица 10

Напряжения в металлоконструкции перегружателя. Вариант 2.  
Особое сочетание нагрузок. Удар о буфер с перекосом

Жесткость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ (МПа)	$\sigma_N$ (МПа)	$\sigma_{MY}$ (МПа)	$\sigma_{MZ}$ (МПа)
1	74	1	1	74,3	16,4	17,2	40,7
2	54	2	1	65,2	13,4	15,1	36,2
3	103	1	1	33,3	-0,5	-7,0	-26,4
4	39	2	4	128,5	-1,5	-121,6	-5,4

Жесткость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ (МПа)	$\sigma_N$ (МПа)	$\sigma_{MY}$ (МПа)	$\sigma_{MZ}$ (МПа)
5	9	2	1	75,5	-27,3	-13,0	-35,2
6	13	2	1	86,5	-33,5	-13,8	-39,2
7	3	2	1	54,6	6,3	31,6	16,7
8	20	1	4	116,8	-12,4	-90,4	-14,0
9	24	1	4	71,0	-14,4	-47,7	-8,9
10	124	1	1	86,1	-23,4	-45,6	-17,0
II	132	2	1	112,9	18,1	73,2	21,7
12	133	1	1	138,6	28,7	96,4	13,5
13	111	2	1	92,9	46,5	32,2	14,3
14	167	2	3	82,9	35,3	24,7	22,1
15	158	1	1	90,8	-67,1	-9,4	-14,3
16	151	2	1	224,5	-7,1	-215,7	-1,7
17	154	1	1	100,4	-75,0	-23,1	-2,3
18	29	2	4	115,3	-10,	-104,0	-1,3
20	143	2	1	36,6	5,3	10,5	20,8
21	184	2	1	44,6	12,2	2,6	29,8
22	186	2	4	132,2	-14,1	-117,6	-0,6

Таблица 11

Нерабочее состояние. Кран не работает и застопорен, тележка без груза располагается над одной из опор. Нагрузки для нерабочего состояния крана

Наименование нагрузки	Обозначение	Нагрузки
1. Вес стальных конструкций	$G_M; K_C=1;$	Нагрузки от веса металлоконструкции крана и оборудования крана взяты из 1-го варианта
2. Вес тележки (без груза)	$G_m; K_C=1;$	$R_1 = R_2 = 131,78 \text{ кН}; M_x = \pm 77 \text{ кН};$ $R_3 = 106,24 \text{ кН}; M_x = \pm 62 \text{ кН}$
3. Нагрузки при перекосе	$H_S; K_C=0,9;$	$\Delta S = 0,005L = 0,3\text{м}; 0,3\text{м}\cdot 0,9=0,27\text{м}$ – взаимное смещение опор
4. Ветровая нагрузка нерабочего состояния	$W_{HC};$ $K_C=0,9;$	$\Sigma W_{HC}=543,8\text{кН}\cdot 0,9 =489,42\text{кН};$ 1. $q_1 = 1,49 \text{ кН/м}$ – на переднюю балку моста; 2. $q_2 = 0,456 \text{ кН/м}$ – на вторую затененную балку моста; 3. $P = 4,5 \text{ кН}$ – на жесткую и шарнирную опору 4. $q_{шпр} = 0,41 \text{ кН/м}$ – ветер на 1 и 2 ветвь шпр. системы 5. $W_{ТСЛ} = 36 \text{ кН}$ 6. Ветер на подкос $F_1 = F_2 = 11\cdot 0,9 = 9,9 \text{ кН}$
5. Нагрузка от обледенения		$G_{Обл}=0,1\cdot 0,9\cdot G_{кр}=480\text{кН}$

## Напряжения в металлоконструкции перегружателя. Вариант 3. Нерабочее состояние

Жесткость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ (МПа)	$\sigma_N$ (МПа)	$\sigma_{MY}$ (МПа)	$\sigma_{MZ}$ (МПа)
1	74	1	4	66,5	13,4	13,5	39,6
2	54	1	4	59,4	11,	10,4	37,7
3	106	1	4	32,3	-0,6	-10,8	-20,8
4	39	2	4	130,9	-0,8	-124,9	-5,2
5	9	2	1	86,2	-29,3	-20,3	-36,5
6	13	2	1	96,8	-36,1	-20,7	-40,0
7	3	2	4	71,5	7,2	47,2	17,1
8	20	1	4	137,8	-12,8	-109,7	-15,3
9	24	1	4	83,8	-15,4	-58,0	-10,3
10	124	1	1	89,1	-23,9	-44,7	-20,5
11	131	2	4	132,0	8,0	116,6	7,4
12	133	1	1	148,9	30,3	116,7	1,9
13	111	2	1	100,1	49,2	34,1	16,8
14	153	1	1	85,3	39,7	38,7	6,9
15	158	1	4	60,9	-36,1	-7,0	-17,8
16	151	1	4	242,4	-8,6	249,0	1,9
17	154	1	4	84,4	-629,013	-17,3	-4,2
18	29	2	1	130,8	-10,1	-116,9	-3,8
20	130	2	4	44,1	3,7	39,7	0,7
21	184	1	4	45,4	5,4	32,3	7,7
22	186	2	1	151,0	-14,3	-133,0	-3,7

**Расчет на усталость.**

Элементы стальных конструкций мостовых перегружателей воспринимают многократно действующую подвижную нагрузку, которая может привести к усталостному разрушению. Расчет на выносливость

производится для кранов, работающих в условиях среднего, тяжелого и весьма тяжелого режимов работы. При расчете на усталость по РТМ 24.090.62-81 и РТМ 24.090.53-79 учитываются весовые нагрузки: вес стальных конструкций  $G_K$ ; вес механического и электрического оборудования  $G_0$ ; вес грейферной тележки  $G_T$  (развесовка по осям приведена на рис. 3); вес груза  $G=0$ ; горизонтальная инерционная продольная нагрузка при передвижении грейферной тележки с грузом в размере  $0,5T$ ; горизонтальная инерционная поперечная нагрузка при передвижении грейферной тележки с грузом  $0,5H$ . При этом принимается  $\varphi=1$ ;  $\kappa_r=1$ ; для перегружателей коэффициент режима нагрузки принимается равным  $\varphi_3 = 0,9$ .

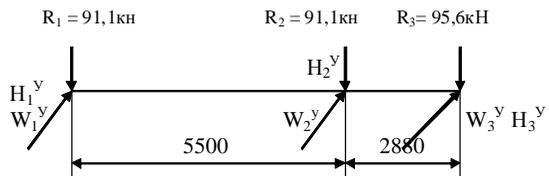


Рис. 3. Схема распределения нагрузок на ось тележки

$G_{гр.тел} + G_{грейфера} = 418,33$  кН;  $R_1 = R_2 = 91,1$  кН;  $M_X = \pm 53$  кН·м;  $G_{тел.прицеп} = 191,2$  кН;  $M_X = 55,8$  кН·м. Горизонтальные поперечные инерционные нагрузки при передвижении тележки:  $H_1^y = 4,6$  кН;  $M_X = 3,6$  кН·м;  $H_3^y = 4,8$  кН;  $M_X = 3,8$  кН·м. Горизонтальная продольная инерционная нагрузка при передвижении тележки:  $T_1^x = 4,6$  кН;  $M_y = 3,6$  кН·м;  $T_3^x = 0,48$  кН;  $M_y = 3,8$  кН·м;  $W_1^y = 5,15$  кН;  $W_2^y = 9,95$  кН;  $W_3^y = 4,8$  кН·м – ветровые нагрузки.

Элементы стальных конструкций мостовых перегружателей, непосредственно воспринимающие многократно действующую подвижную нагрузку, которая может привести к усталостному разрушению, спроектированы с применением таких конструктивных решений, которые не вызывают значительной концентрации напряжений. Расчет элементов перегружателя на выносливость производится для кранов, работающих в условиях среднего, тяжелого и весьма тяжелого режимов согласно РТМ 24.090.53-79. При расчете элементов на выносливость учитываются весовые нагрузки: весовые постоянные, весовые подвижные, инерционные, вес грейферной тележки  $G_T$ , вес груза  $Q$ . Инерционные продольные и поперечные нагрузки принимаются в размере 0,5·Т и 0,5·Н, при этом  $\psi=1$ ,  $k_r=1$  [6]. Для мостовых перегружателей коэффициент режима нагрузки принимается равным  $\phi_3=0,9$  [6]. При работе перегружателя металлоконструкции испытывает переменные напряжения. Это приводит к необходимости учитывать их при расчете на выносливость. Расчет на выносливость производится по нагрузкам первого случая по условию [8]  $s = [s] = s_{rk} / n_1$ , где  $G_{rk}$  – предел выносливости с учетом коэффициента асимметрии цикла  $r$  эффективного коэффициента концентрации  $k$ ;  $n_1$  – запас прочности для нагрузок первого случая. Если  $[s_{rk}] \geq [\sigma]$ , то расчет на выносливость не производится. Значение  $s_{rk}$  при  $r \leq 1$  выбирается в соответствии с таблицей РТМ 24.090.53, где  $r = s_{min} / s_{max}$  – отношение алгебраических значений минимальных и максимальных напряжений цикла. Пределы выносливости  $s_{rk}$  для элементов конструкции из стали класса 46/33 ( $\sigma_B = 460$  МПа,  $\sigma_T = 330$  МПа) определяются в зависимости от эффективного коэффициента концентрации напряжений  $k$  и коэффициента асимметрии расчетного цикла  $r$  [10]. Расчетные напряжения сведены в табл. 13, 14.

Таблица 13

Напряжения в металлоконструкции перегружателя.  
Расчет на усталость без учета перекоса

Жесткость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{max}$ (МПа)	$\sigma_N$ (МПа)	$\sigma_{MY}$ (МПа)	$\sigma_{MZ}$ (МПа)
1	93	2	4	73,7	-11,3	-32,1	-30,4
2	90	1	5	57,4	0,7	53,9	1,7
3	106	1	1	31,6	-0,7	-9,9	-21,1
4	39	2	1	82,3	-0,4	-79,5	-2,4
5	10	2	4	57,3	-28,9	-27,7	-0,7
6	116	1	4	83,3	-34,3	-32,8	-16,2
7	4	2	4	57,1	9,6	47,5	0,05

Жест- кость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ (МПа)	$\sigma_N$ (МПа)	$\sigma_{MY}$ (МПа)	$\sigma_{MZ}$ (МПа)
8	20	1	1	80,8	-11,0	-65,7	-4,1
9	24	1	4	56,5	-21,4	-33,6	-1,5
10	123	1	3	55,4	-8,9	-42,4	-4,0
11	131	2	1	95,1	8,7	66,7	19,7
12	134	1	1	101,7	13,8	83,5	4,4
13	111	2	4	103,3	63,5	32,1	7,7
14	113	2	5	99,7	59,8	24,4	15,5
15	158	1	1	72,8	-53,5	-13,6	-5,7
16	151	2	1	102,0	-7,1	-94,0	-0,8
17	154	1	1	78,7	-55,4	-19,6	-3,8
18	29	2	4	95,4	-13,8	-80,9	-0,7
20	143	2	1	25,1	4,8	3,8	16,5
21	184	2	1	29,7	9,0	1,1	19,6
22	186	2	4	110,6	-19,6	-90,4	-0,6

Таблица 14

Напряжения в металлоконструкции перегружателя. Расчет на усталость  
с учетом перекоса.  $\Delta=0,15$  м  $0,9=0,135$  м

Жест- кость	№ стержня	№ сечения	Нагружен.	$\sigma_{\max}$ (МПа)	$\sigma_N$ (МПа)	$\sigma_{MY}$ (МПа)	$\sigma_{MZ}$ (МПа)
1	93	2	4	73,1	-10,7	-31,9	-30,5
2	89	1	5	56,3	-1,0	51,5	6,3
3	106	2	4	32,0	-0,5	-15,8	-15,7
4	39	2	1	95,2	-1,0	-90,6	-3,6
5	10	2	4	65,1	-27,6	-24,7	-12,9
6	116	1	4	73,8	-33,6	-22,6	-18,6
7	4	2	4	62,9	10,0	47,1	5,8
8	20	1	4	95,6	-13,2	-74,9	-7,4
9	24	1	4	65,9	-21,1	-39,5	-5,3
10	124	1	1	72,0	-15,1	-39,5	-17,4
11	132	2	1	98,1	14,8	61,6	21,8
12	133	1	1	113,4	23,4	82,1	7,9
13	111	2	4	112,4	66,4	32,4	13,1
14	113	2	5	102,4	60,1	24,4	17,9
15	158	1	1	78,2	-56,1	-11,2	-10,3
16	151	2	1	164,9	-7,3	-156,3	-1,3
17	154	1	1	87,4	-62,0	-21,1	-3,4
18	29	2	4	100,4	-14,1	-83,3	-2,1
20	143	2	1	27,9	4,4	7,6	16,0
21	184	2	1	32,3	9,7	0,8	21,8
22	186	2	4	116,8	-19,9	-93,8	-3,1

**Ветровые нагрузки.** Ветровая нагрузка на кран должна быть определена как сумма статической и динамической составляющих. Статическую составляющую ветровой нагрузки  $F$ , действующую на элемент конструкции или на груз, нужно определить по формуле [10]:  $F = p \cdot A$ , где  $p$  – распределенная ветровая нагрузка на единицу расчетной площади;  $A$  – расчетная площадь элемента.

*Расчет ветра рабочего состояния (фронтальный ветер).* Распределенную ветровую нагрузку  $P$  определяют по формуле [10]:  $P = q \cdot k \cdot c \cdot n$ , где  $q = 250$  н/м<sup>2</sup> – динамическое давление ветра;  $V_b = 20$  м/с – скорость ветра;  $k = 1,25$  – коэффициент, учитывающий изменение по высоте;  $h = 22$  м.  $C_X = 1,65$  – коэффициент лобового сопротивления коробчатых балок (определяется как  $h/a = 1,1$ , где  $h$  – высота балки моста с учетом подтележечного рельса);  $n = 1,1$  – коэффициент перегрузки при расчете по методу предельных состояний. Отсюда  $P = 567,2$  н/м<sup>2</sup>. Расчетную площадь пролетной балки определяют по формуле [10]:  $A = l \cdot h = 173,5$  м<sup>2</sup>, где  $h$  – габаритная высота;  $l$  – длина балки;  $F_1 = P \cdot A = 9,84$  т – ветер на лобовую балку моста.

Вторая балка моста (затененная) находится на расстоянии  $S = 4$  м от первой, высота ее  $h = 1,58$  м, т.к.  $S > 2h$ , то площадь второй балки берем полностью.

Суммарный коэффициент лобового сопротивления  $C_X^1$  определяется с учетом коэффициента затенения по формуле [10]:  $C_X^1 = C_X [1 + \eta (i - l)]$ , где  $C_X = 1,65$  – коэффициент лобового сопротивления одной конструкции;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий аэродинамическое затенение конструкции впереди стоящей конструкцией. Из [10]  $S/h = 2,53$ ;  $\eta = 0,4$  (т.к.  $\varphi = 1$ );  $C_X^1 = 1,65 \cdot 1,4$ ;  $p^1 = 137,5$  н/м<sup>2</sup>;  $F_{cm}^1 = 24$  кН – ветер на вторую балку моста.

**Анализ результатов.** Выполнен расчет металлоконструкции грейферного перегружателя 3281.01.00.000 г/п 20т на жесткость, деформативность, статический и прочностной расчеты, а также расчет на усталостную прочность.

Расчет металлоконструкции перегружателя и его элементов был выполнен по методу предельных состояний согласно РТМ 24.090.26-77. Расчет на прочность показал, что максимальные напряжения в металлоконструкции не превышают расчетного сопротивления  $\sigma_p = 240$  МПа (см. табл. 4, 5, 8-10, 12-14).

Расчет на выносливость элементов металлоконструкции перегружателя показал, что максимальные напряжения не превышают допустимых на выносливость  $\sigma_{max} < [\sigma_{rk}]$ . Расчет на деформативность показал, что прогибы металлоконструкции моста от статического давления грейферной тележки с грузом не превышают допустимых  $\Delta f/L \leq [f_{cm}]$ .

**Численное моделирование реакции металлоконструкции перегружателя на действие эксплуатационных нагрузок в программном комплексе ANSYS.** В качестве сравниваемой была создана конечно-элементная модель (КЭМ) в среде ANSYS. На рис. 4 представлена КЭМ металлоконструкции перегружателя и ее фрагменты. На рис. 5 показаны результаты расчета напряженно-деформированного состояния металлоконструкции перегружателя при варианте действия нагрузок, соответствующего основному рабочему состоянию (см. табл. 3).

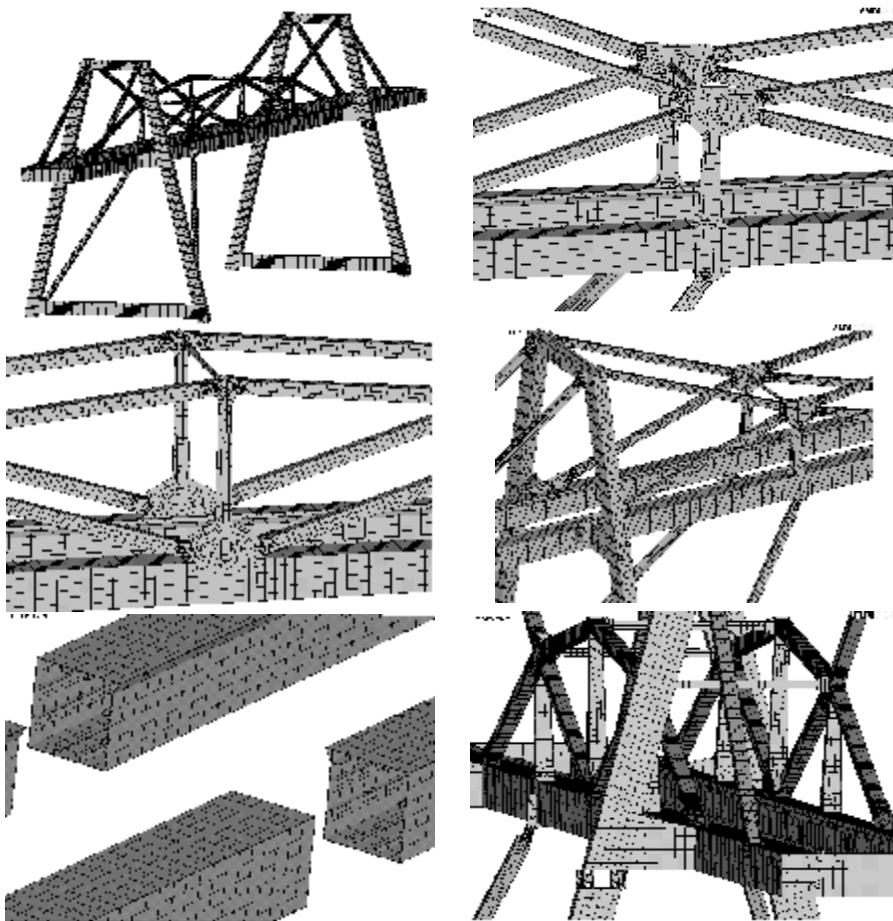


Рис. 4. Конечно-элементная модель исследуемой конструкции и ее фрагментов

В табл. 15 приведены интегральные характеристики напряженно-деформированного состояния металлоконструкции перегружателя.

Сравнительный анализ расчетов напряженно-деформированного состояния, проведенных в комплексах Лира и ANSYS, дает основание для следующих выводов:

1. По характеру распределения компонент НДС результаты расчетов, выполненные в среде Лира и ANSYS, соответствуют друг другу (рис. 6).

2. Количественное несоответствие результатов, полученных в среде Лира и ANSYS (табл. 15), составляет: по напряжениям – около 3 %; по перемещениям – около 9 %, что свидетельствует о хорошем соответствии моделей. На рис. 6 представлено сравнительное распределение напряжений по номерам жесткостей в металлоконструкции перегружателя. На рис. 7 – несоответствие этих

распределений. При этом полного соответствия добиться очень сложно в силу разнотипности моделей. Анализ распределений и интегральных характеристик свидетельствуют о некоторых существенных локальных несоответствиях напряжений в отдельных элементах конструкции. При этом максимальные напряжения в конструкции в целом и перемещения в целом, полученные в 2-х моделях, практически совпадают.

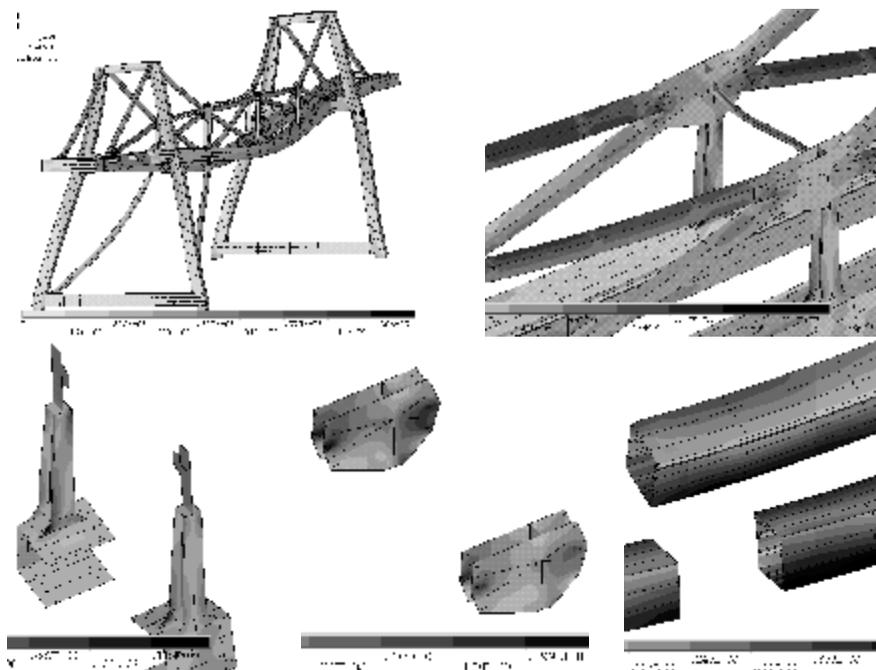


Рис. 5. Графическое представление эквивалентных напряжений в структурных элементах

### 3. Густота и зоны сгущения-разрежения конечно-элементной сетки, созданной в среде ANSYS, обеспечивают удовлетворительную точность модели (объем – около 100 000 элементов и 90 000 узлов), которая и рекомендуется для проведения дальнейших исследований как базовая.

Таблица 15  
Сравнение результатов ПК Lira vs Ansys

Программный продукт	Прогиб, мм	Эквив. напряжения, МПа
LIRA	64	129
ANSYS	58	133

4. Модель, созданная в ANSYS, обладает широкой параметричностью, т.е. возможностью оперативного перестраивания при изменении геометрических параметров, структуры и действующих усилий. Это, с одной стороны, позволяет использовать ее для верификации по результатам, получен-

ным в комплексе Ли́ра, а с другой – для решения задач структурного и геометрического синтеза, когда требуется вариация и уточнение параметров и структуры конструкции перегружателя на основе многократного решения задач анализа (с использованием уже верифицированной на 1-м этапе модели).

Рис. 6. Сравнение результатов расчетов в ПК Lira и ANSYS (макс. напряжения в структурных элементах, МПа)

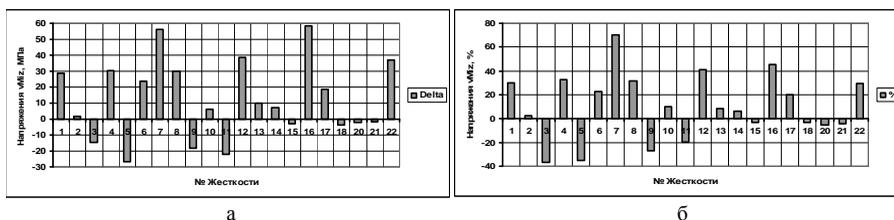
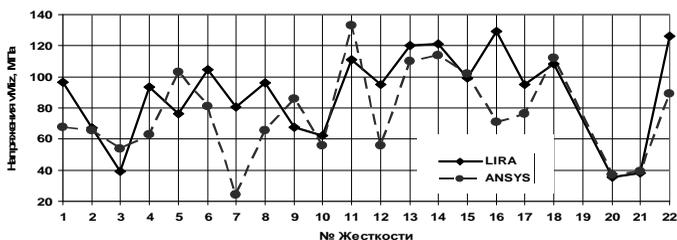


Рис. 7. Различие результатов эквивалентных напряжений в структурных элементах: а – абсолютное, б - относительное

**Решение тестовой задачи оптимизации структуры и параметров верхнего строения перегружателя.** При решении задачи оптимального выбора структуры и параметров мостового перегружателя рассмотрим следующие задачи: 1) сравнительное исследование напряженно-деформированного состояния верхнего строения базового варианта (прототип – перегружатель рег. № 9174 фирмы KRAF, г. Лейпциг, Германия). Схема его приведена на рис. 8, модель – на рис. 9, а) и предлагаемого варианта (рис. 9, б); 2) оптимизация конструктивных параметров (толщин основной балки и шпренгелей) по критерию минимизации массы и увеличения несущей способности.

На рис. 9 представлена базовая и предлагаемая структура шпренгельной системы перегружателя. На рис. 10 – результаты исследования их напряженно-деформированного состояния. Видно, что введение дополнительных раскосов (рис. 11, 12) незначительно увеличивает общую массу шпренгельной системы (на 16 тонн, т.е. около 4 %), однако приводит к существенному перераспределению напряжений в сторону уменьшения их уровня (на 40 МПа, около 27 %, рис. 13) и ужесточению конструкции (порядка 50 % на консолях). Это свидетельствует в пользу применения предлагаемого нового варианта верхнего строения. При этом вводимые в конструкцию раскосы (см. рис. 11, 12) рассматриваются как элементы изменяемой толщины (по оси абсцисс отложено процентное утонение относительно его номинальной толщины).

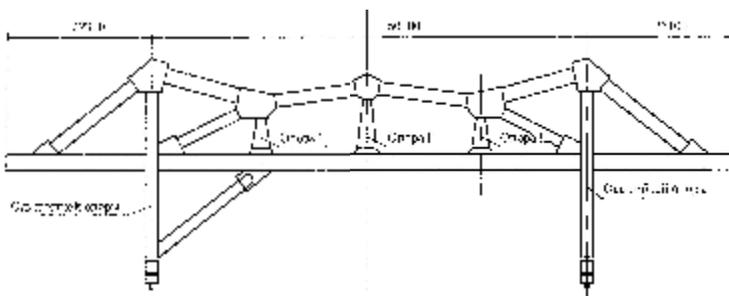


Рис. 8. Схема перегружателя рег.№ 9174 (прототип)



Рис. 9. Различие шпренгельных систем: а – прототип; б – исследуемая модель

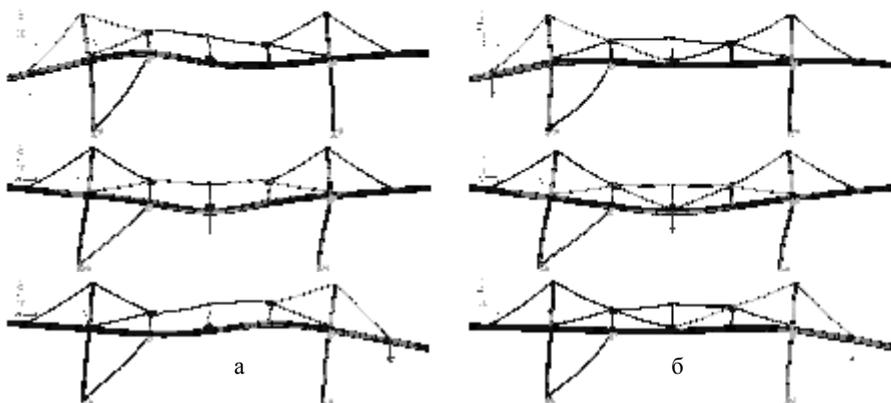


Рис. 10. Результаты расчетов, напряженно-деформированного состояния:  
а – прототипа; б – исследуемой модели

На рис. 14 приведены зависимости максимальных напряжений (а на рис. 15 – максимального прогиба балки) в верхнем строении перегружателя от коэффициента уменьшения толщины основной балки  $\gamma$  (при условии, что общая масса  $M = \gamma_{\sigma} S_{\sigma} + \gamma_{ш} S_{ш} = const$  при различных заданных уровнях  $M$ ) – решение задачи 2.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что существует тенденция к уменьшению напряжений в верхнем строении при некотором уменьшении  $\gamma_{\sigma}$ . Это дает основание для правомерности постановки и целесообразности решения по определению оптимального набора  $(\gamma_{\sigma}, M)$ , соответствующего максимальной нагрузочной способности верхнего строения при минимальной его массе. Более

того, налицо наличие четко выраженного минимума напряжений в балке (при положении тележки в центре пролета) в интервале  $\gamma_b \in [-0.25; 0.1]$ .

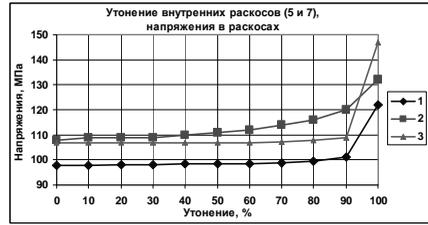
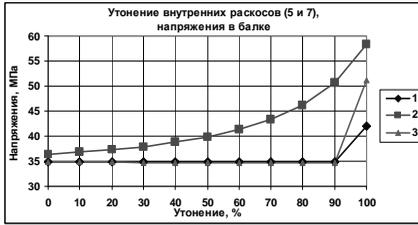


Рис. 11. Изменение максимальных напряжений в балке (а) и раскосах (б) при утонении центральных раскосов %, 100 – полное отсутствие

**Заключение.** Результаты решения задач, описанных в статье, дают основание заключить, что решены основные проблемные вопросы проектирования оптимальной конструкции мостового перегружателя: построена сбалансированная по точности и объему конечно-элементная модель перегружателя в среде ANSYS, позволяющая формализовать задачи оптимизации конструкции верхнего строения; обоснована более рациональная структура шпренгельной системы, обеспечивающая потенциальную возможность создания перегружателя минимальной массы и заданной грузоподъемности и производительности; продемонстрирована возможность управления уровнем напряжений в верхнем строении перегружателя за счет перераспределения материала между основной балкой и шпренгельной системой.

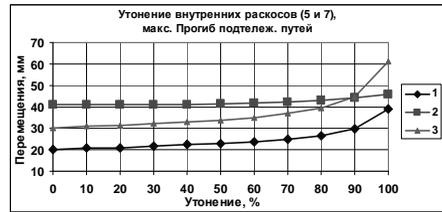


Рис. 12. Изменение прогиба подтележных путей при утонении центральных раскосов %, 100 – полное отсутствие (как в прототипе):

- 1 – тележка на ремонтной консоли,
- 2 – тележка в центре пролета, 3 – тележка на консоли за шарнирной опорой

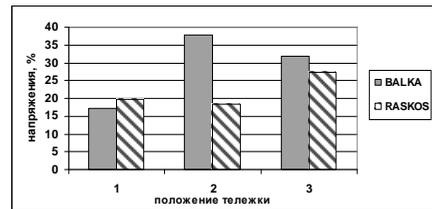
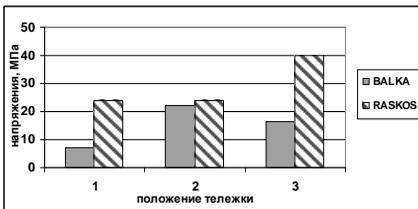
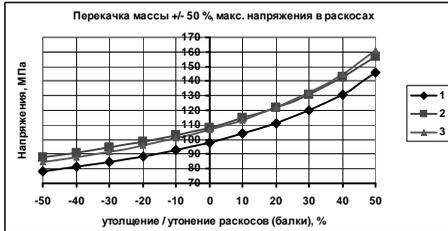


Рис. 13. Различие максимальных напряжений в балке и шпренгельной системе при наличии/отсутствии центральных раскосов (модель и прототип): а – абсолютное, б – относительное



а



б

Рис. 14. Изменение максимальных напряжений в балке (а) и раскосах (б) при перераспределении массы между шпренгельной системой и балкой (1 – тележка на ремонтной консоли, 2 – тележка в центре пролета, 3 – тележка на консоли за шарнирной опорой)

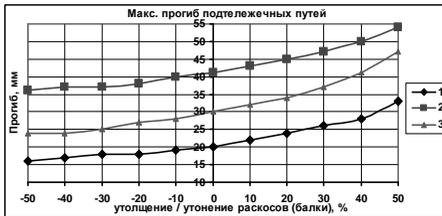


Рис. 15. Изменение максимального прогиба в подтележных путях при перераспределении массы между шпренгельной системой и балкой: 1 – тележка на ремонтной консоли, 2 – тележка в центре пролета, 3 – тележка на консоли за шарнирной опорой

грузоподъемные. Выносливость стальных конструкций. ГОСТ 1451-77.

Таким образом, можно утверждать, что обоснована возможность, определены пути структурной и параметрической оптимизации мостового перегружателя, а также эффективная конечно-элементная модель для многовариантного решения задач определения НДС металлоконструкции перегружателя. Реализации этих возможностей будут посвящены дальнейшие исследования.

**Список литературы. 1.** Ткачук Н.А., Головченко В.И., Барчан Е.Н., Гусев Ю.Б., Глинин Г.П. Структура специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза сложных механических систем // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2007. – №9 (115), част. 1. – С.206-216. **2.** Гусев Ю.Б., Шкода В.А., Танченко А.Ю. Формирование конечно-элементной модели металлоконструкции углеперегрузателя // Вісник НТУ "ХП". Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2007. – №23. – С.33-39. **3.** Гусев Ю.Б., Литвиненко А.В., Танченко А.Ю. К вопросу моделирования напряженно-деформированного состояния металлоконструкции углеперегрузателя // Вісник НТУ "ХП". Тем. вип.: Транспортне машиностроєння. 2007. – №33. – С.41-45. **4.** Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин – Л.: Машиностроєння, 1976. – 453 с. **5.** Беллов Б.В. Кох П.И., Онищенко В.И. Мостовые перегружатели. – М.: Машиностроєння, 1974. – 224 с. **6.** Руководящие материалы на нормы расчета и проектирования мостовых перегружателей тяжелого и весьма тяжелого режимов работы. РТМ 24.090.52-81. **7.** Вершинский А.В., Гохберг М.М., Семенов В.П. Строительная механика и металлические конструкции. – Л.: Машиностроєння, 1984. – 232 с. **8.** Дукельский А.Д. Справочник по кранам. – Л.: Машиностроєння. – Т.1. – 400 с. **9.** РТМ 24.090.53-79 Краны грузоподъемные. Выносливость стальных конструкций. **10.** Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. ГОСТ 1451-77.

Поступила в редколлегию 02.03.08