

УДК (UDC) 621.86

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАСЧЁТНЫХ СХЕМ ЭЛЕМЕНТОВ  
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОВЫХ ТЕЛЕЖЕК КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА  
НА ОСНОВЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ****JUSTIFICATION OF CALCULATION SCHEMES CHOICE FOR METALWARE  
SEGMENTS OF BRIDGE CRANE TROLLEYS BASED  
ON MULTIPURPOSE LAYOUT DRAWING CONFIGURATIONS**Гончаров К.А., Денисов И.А.  
Goncharov K.A., Denisov I.A.Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)  
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** Описаны особенности выбора компонентов матриц расчётных схем элементов металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основе универсальной компоновочной схемы в различных проектных ситуациях. Показана общая последовательность формирования структуры матрицы расчётных схем. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния типовой металлоконструкции грузовой тележки на основе универсальной компоновочной схемы при различных случаях нагружения. Определены закономерности распределения напряжений между элементами соседних секторов металлоконструкции в зависимости от особенностей расположения нагружающих силовых факторов. Обосновано применение и даны рекомендации по выбору различных типов простейших расчётных схем при проведении аналитических расчетов элементов металлоконструкций тележек.

**Ключевые слова:** мостовой кран, грузовая тележка, универсальная компоновочная схема, диагональный элемент, хордовый элемент, радиальный элемент.

**Дата принятия к публикации:** 27.03.2019  
**Дата публикации:** 25.06.2019

**Сведения об авторах:**

**Гончаров Кирилл Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», e-mail: [ptm\\_bstu@mail.ru](mailto:ptm_bstu@mail.ru).

ORCID: 0000-0002-5895-1162

**Денисов Илья Александрович** – аспирант, ассистент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», e-mail: [ilia.denisow@yandex.ru](mailto:ilia.denisow@yandex.ru)

**Abstract.** The article describes the choice features of the matrix elements of the calculation schemes of the metalware segments of the bridge crane trolleys on the basis of the multipurpose layout drawing in various design cases. The general sequence of the structure formation of the calculation scheme matrix is shown. The article proposes the analysis of the deformation mode of the standard load trolley metalware based on the multipurpose layout drawing when various loading cases occur. The stress distribution laws between the elements of the neighbouring metalware segments, depending on the characteristics of the arrangement of the loading forces, are determined. The implementation of the various types of the elementary calculations schemes, when performing analytical calculations of the metalware segments of the trolley, are justified, as well as the recommendations on the calculation scheme choice are given.

**Keywords:** bridge crane, load trolley, multipurpose layout drawing, diagonal element, chord element, radial element.

**Date of acceptance for publication:** 27.03.2019  
**Date of publication:** 25.06.2019

**Authors' information:**

**Kirill A. Goncharov** – PhD in Technical Sciences, associate Professor, head of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, e-mail: [ptm\\_bstu@mail.ru](mailto:ptm_bstu@mail.ru).

ORCID: 0000-0002-5895-1162

**Piia A. Denisov** – postgraduate student, assistant of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, e-mail: [ilia.denisow@yandex.ru](mailto:ilia.denisow@yandex.ru).

## 1. Введение

Под универсальной компоновочной схемой понимается многокомпонентная типовая схема расположения взаимосвязанных несущих элементов металлоконструкции, объединённых единой иерархической структурой, способная подстраиваться под любую конфигурацию устанавливаемого рабочего оборудования. Тип элемента и его положение в иерархической структуре универсальной компоновочной схемы регламентируется его функциональным назначением. В процессе компоновки несущих металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа общего назначения рационально использовать трёхкомпонентную принципиальную схему, включающую следующие составляющие:

1. Компоненты первого типа (К1) – элементы, образующие основной несущий каркас тележки. Представляют собой диагонали  $D_i$  компоновочной площади тележки (диаметры описанной вокруг номинальной площади окружности) (1, рис. 1).

2. Компоненты второго типа (К2) – элементы, используемые для соединения несущего каркаса в единую металлоконструкцию. Представляют собой хорды  $H_{ij}$  описанных и вписанных в компоновочную площадь окружностей (2, рис. 1).

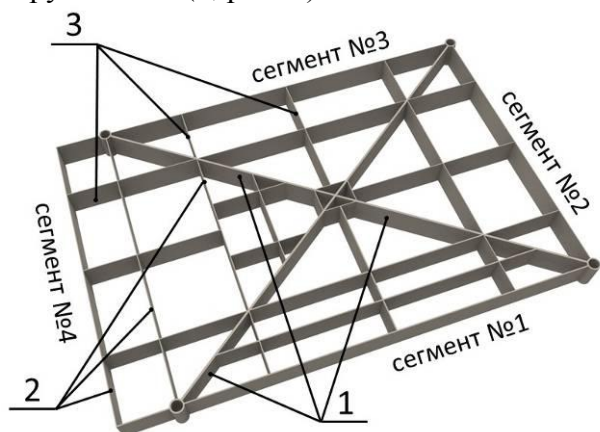


Рис.1. Металлоконструкция грузовой тележки на основе универсальной компоновочной схемы

3. Компоненты третьего типа (К3) – элементы, соединяющие компоненты второго типа между собой. Представляют собой звен-

ья  $R_{i,j,k}$ , сонаправленные с радиусами описанной и вписанных в компоновочную площадь окружностей (3, рис.1). Буквы индекса соответствуют:  $i$  – номеру сегмента, в котором располагается элемент,  $j$  – номеру хорды к которой относится элемент,  $k$  – номеру радиального элемента

Исследования, проведённые в работах [1-3], показали, что грузовые тележки, выполненные на основе универсальных компоновочных схем, обладают рядом преимуществ. Основное преимущество универсальной компоновочной схемы заключается в возможности её трансформации согласно действующим конструкционным и эксплуатационным требованиям и ограничениям путём корректировки положения и размерных параметров отдельных несущих элементов как индивидуально, так и в рамках крупных структурных единиц, с сохранением общей логики построения металлоконструкции и принципов взаимосвязи отдельных узлов. При компоновке металлоконструкций грузовых тележек возможно применение различных конфигураций универсальных компоновочных схем. Нагляднее всего процесс проектирования может быть показан на примере универсальной компоновочной схемы комплексной конфигурации (УКСКК) (рис. 1), которая подразумевает расчёт металлоконструкции с учетом общей картины нагружения тележки. Необходимые расчёты производятся на основе специально разработанной математической модели структурно-параметрического синтеза, в основу которой положен принцип матричного описания всех параметров и показателей несущей металлоконструкции. Так, взаимное расположение компонентов первого сегмента и второго можно описать с помощью структурных матриц  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ :

$$\Delta_1 = \begin{pmatrix} D_1 | H_{1.1} & R_{1.1.1} & R_{1.1.2} & R_{1.1.3} \\ 0 & H_{1.2} & R_{1.2.1} & R_{1.2.2} & R_{1.2.3} \\ 0 & H_{1.3} & 0 & R_{1.3.1} & 0 \end{pmatrix};$$

$$\Delta_2 = \begin{pmatrix} D_2 | H_{2.1} & R_{2.1.1} & R_{2.1.2} & R_{2.1.3} \\ 0 & H_{2.1.2} & 0 & R_{2.2.1} & 0 \end{pmatrix}.$$

Заменяя условные обозначения элементов в отдельных ячейках числовыми значениями, можно получать матрицы параметров, опи-

сывающие геометрические значения, прочностные, жёсткостные, усталостные и эксплуатационные характеристики элементов металлоконструкции тележки.

В ячейках матриц параметров могут содержаться не только числовые значения, но и математические взаимосвязи, соответствующие формулам, неравенствам и расчётным схемам, с помощью которых данные значения были получены

При составлении матриц расчётных схем  $ds_{Li}$  металлоконструкция тележки разбивается на отдельные элементы (в случае реализации аналитических способов анализа напряженно-деформированного состояния), для каждого из которых составляется своя расчётная схема, описываемая соответствующими математическими зависимостями. Расчётная схема каждого элемента формируется исходя из данных матриц длин элементов  $l_{Li}$  и матриц действующих усилий  $F_{Li}$ ,  $q_{Li}$ . Расчётные схемы отдельных элементов могут рассматриваться отдельно или объединяться в более крупные расчётные модели.

## 2. Постановка задачи

В [4-6] указано, что в проектных расчётах все элементы металлоконструкций грузовых тележек могут быть рассмотрены в качестве отдельных двухопорных балок, что позволяет значительно упростить вычисление действующих напряжений и перемещений. В рамках проводимого исследования необходимо определить – насколько данный подход применим к металлоконструкциям, выполненным на основе универсальной компоновочной схемы. Так как в рассмотренном примере (рис.1) элементы металлоконструкции тележки с каждого конца закрепляются с помощью сварных соединений, то в качестве простейшей расчётной схемы рационально использовать двухопорную балку с жёстко заземленными концами. Однако в реальной конструкции узлы соединения элементов не являются абсолютно жёсткими, что может привести к неправильной оценке напряжений по длине элементов. В связи с этим может быть использована схема с шарнирными опорами, что так же может повлиять на точ-

ность расчёта из-за невозможности оценки величины крутящих моментов, возникающих в сварных швах.

Так же возникает вопрос о степени влияния нагрузок, приложенных в каком-либо сегменте, на напряжённо-деформированное состояние элементов соседних сегментов.

Таким образом, целью настоящей работы является синтез рекомендаций по выбору типов расчетных схем элементов металлоконструкций грузовых тележек с обоснованием целесообразности их применения с позиции надежности получаемых результатов расчета в каждой конкретной проектной ситуации.

## 3. Теоретические исследования

Для достижения поставленной цели был произведён анализ напряжённо-деформированного состояния металлоконструкции произвольной конфигурации, учитывающей типовые возможности взаимного расположения структурных элементов, (рис. 2) с помощью метода конечных элементов в программном комплексе Siemens NX.

При проведении анализа металлоконструкция нагружалась вертикальными силами, прикладываемыми в первом и втором секторах. В рамках расчёта сформированы следующие случаи нагружения:

1. АI – вертикальная сила  $F_I = 30000$  Н приложена в точке №13 (рисунок 4.8).
2. АII – вертикальная сила  $F_I = 30000$  Н приложена в точке №25.
3. АIII – вертикальная сила  $F_I = 30000$  Н приложена в точке №24.
4. БI – вертикальные силы  $F_I = 30000$  Н и  $F_I = 30000$  Н приложены в точках №13 и № 25.
5. БII – вертикальные силы  $F_I = 30000$  Н и  $F_I = 30000$  Н приложены в точках №13 и № 24.

Для каждого случая нагружения фиксировались значения эквивалентных напряжений элементов первого и второго сектора в выбранных характерных сечениях, соответствующих точкам, показанным на рис. 2. Всего в рамках рассматриваемых сегментов было выделено 31 характерное сечение.

Так как металлоконструкция является тонкостенной, для построения её конечно-

элементной модели были использованы плоские 4-х узловые конечные элементы. Размеры конечных элементов задавались в диапа-

зоне  $3...5b$ , где  $b$  – толщина элемента металлоконструкции [7, 10].

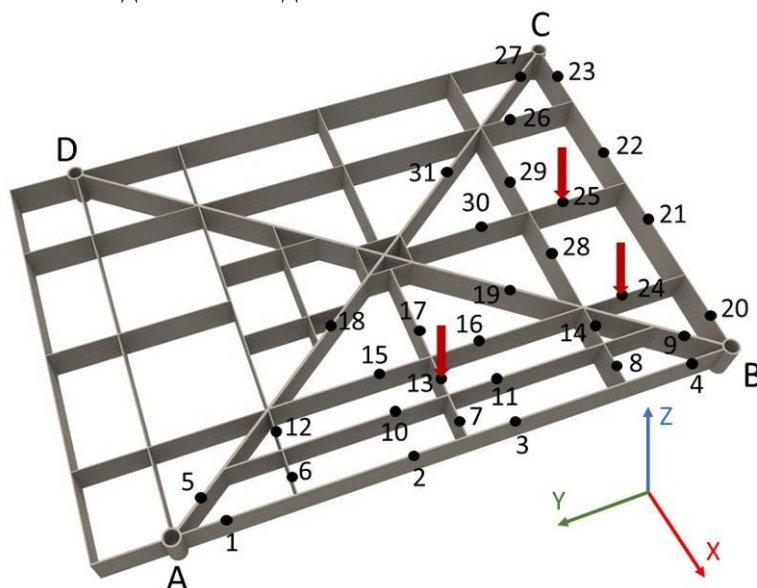


Рис. 2. Схема расположения характерных сечений элементов типовой металлоконструкции произвольной конфигурации на основе универсальной компоновочной схемы

В процессе ограничения степеней свободы рассматриваемой металлоконструкции требовалось избежать искусственного завышения жёсткости рамы. Поэтому при наложении ограничений были учтены рекомендации, изложенные в [7-9]. Так, в точке А (рис. 2) перемещения ограничены вдоль всех координатных осей, в точке В вдоль осей X и Z, в точке С только вдоль оси Z, в точке D вдоль осей Y и Z. Материал конструкции задан в виде линейно упругой изотропной мо-

дели с характеристиками, свойственными для углеродистых качественных и низколегированных конструкционных сталей, в частности модуль Юнга равен  $2,1 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона равен 0,3 [7, 8]. Картины распределения напряжений в указанных сегментах для некоторых расчётных случаев нагружения показаны на рис. 3-5. Значения напряжений (МПа) в характерных сечениях элементов в зависимости от случая нагружения указаны в табл. 1 и 2.

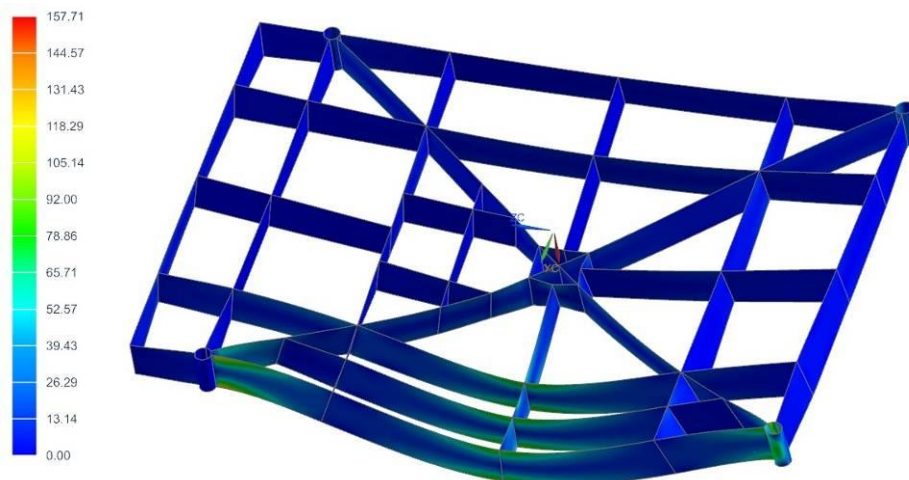


Рис. 3. Картина распределения напряжений (МПа) для случая нагружения А1

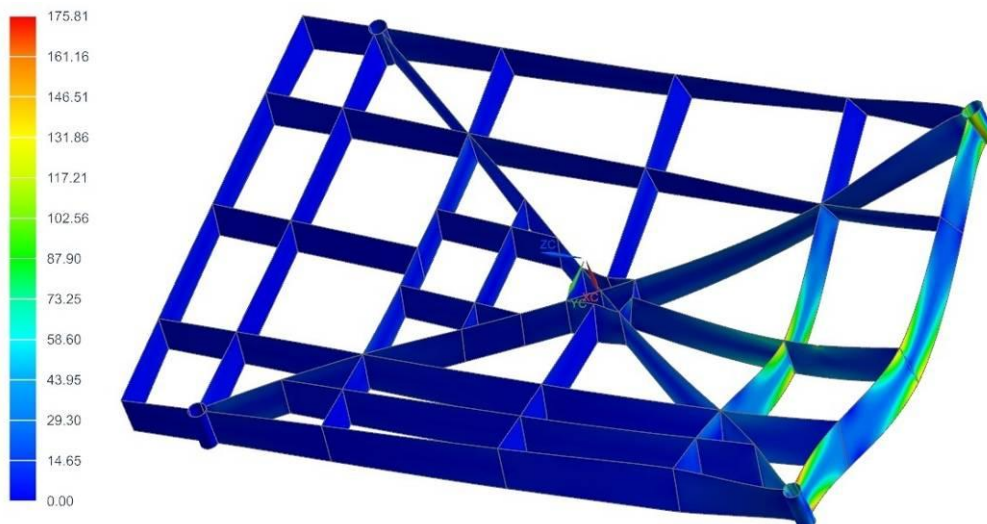


Рис.4. Картина распределения напряжений (МПа) для случая нагружения АII

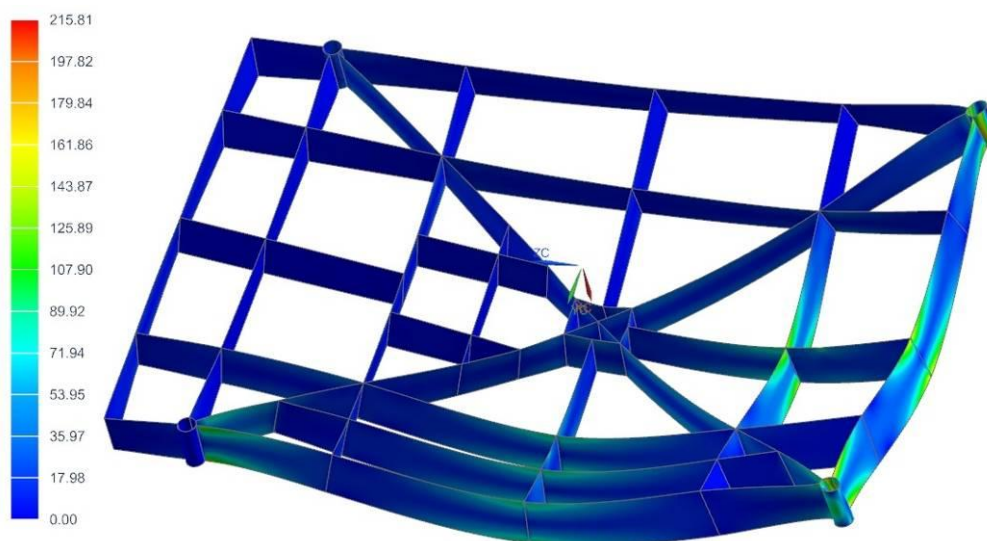


Рис.5. Картина распределения напряжений (МПа) для случая нагружения БI

Таблица 1

Напряжения (МПа) в характерных сечениях металлоконструкции (случай А)

№ точки	Расчётный случай			№ точки	Расчётный случай			№ точки	Расчётный случай		
	AI	API	АIII		AI	API	АIII		AI	API	АIII
1	118	6	13	12	15	4	2	23	6	100	32
2	82	5	9	13	100	3	3	24	10	38	153
3	81	4	10	14	12	30	14	25	2	162	2
4	72	10	2	15	83	1	1	26	3	30	4
5	61	21	13	16	85	1	1	27	18	32	8
6	15	1	1	17	48	6	6	28	9	135	28
7	33	3	3	18	24	4	6	29	8	128	11
8	8	15	1	19	27	28	20	30	2	60	10
9	41	48	44	20	4	145	118	31	3	32	7
10	84	2	3	21	3	117	36				
11	84	4	5	22	5	119	25				

Таблица 2

## Напряжения (МПа) в характерных сечениях металлоконструкции (случай Б)

№ точки	Расчётный случай		№ точки	Расчётный случай		№ точки	Расчётный случай	
	Б1	БП		Б1	БП		Б1	БП
1	127	120	12	18	16	23	107	35
2	86	88	13	94	100	24	12	162
3	85	95	14	17	24	25	186	16
4	58	74	15	86	82	26	33	9
5	83	72	16	86	82	27	45	17
6	16	14	17	56	50	28	142	25
7	32	33	18	30	30	29	134	11
8	4	9	19	55	49	30	68	23
9	100	86	20	145	122	31	32	10
10	84	88	21	121	39			
11	88	91	22	124	29			

В ходе численного моделирования установлено, что в большинстве случаев действующие напряжения распределяются между вспомогательными элементами того сектора, к которому приложено усилие, а также соответствующими главными диагональными элементами и не оказывают значительного влияния на напряжённо-деформированное состояние радиальных и хордовых элементов соседних секторов. Так в случае нагружения А1 наибольшие напряжения наблюдались в хордовом элементе  $H_{1,1}$  на участках соединения с соответствующими угловыми узлами (точки 1 и 4) и нагруженным радиальным элементом  $R_{1,1,2}$  (точки 2 и 3). В остальных хордовых элементах первого сектора так же наблюдается концентрация напряжений у узла соединения с радиальными элементами, соосными элементу  $R_{1,1,2}$ : в точках 10 и 11 на радиальном элементе  $H_{1,2}$ , в точках 15 и 16 на радиальном элементе  $H_{1,3}$ . При этом напряжения в характерных сечениях второго сектора не превысили 18 МПа. Аналогичная картина наблюдается в случаях нагружения АII и АIII.

Сопоставляя данные таблиц 1 и 2 можно отметить, что вне зависимости от количества действующих на металлоконструкцию сил напряжения в характерных сечениях в рамках одного сектора отличается незначительно. К примеру, напряжение в точке 1 в случае нагружения АI составляло 118 МПа. Для случая БI, в котором согласно описанным

условиям помимо силы в точке 13 к металлоконструкции тележки приложена сила в точке 25 напряжение в сечении 1 составило 127 МПа.

Для подтверждения адекватности использования той или иной расчетной схемы было проведено сравнение результатов, полученных в ходе расчёта действующих эквивалентных напряжений по предлагаемым схемам, с данными численного моделирования напряженно-деформированного состояния металлоконструкции. Напряжения определялись от действия сосредоточенной силы, прикладываемой поочередно в трёх различных точках на каждом радиальном элементе (рис. 6). Положение 2-й точки соответствует центру элемента, точки 1 и 3 расположены вблизи сварных соединений на одинаковом удалении от центра элемента. Значения действующих эквивалентных напряжений для радиальных элементов 2-го сегмента металлоконструкции приведены в табл. 3.

Из анализа данных табл. 3 можно увидеть, что для элементов  $R_{2,1,1}$  и  $R_{2,1,3}$  в ходе расчётов по схеме с жёсткими опорами и численном моделировании получены близкие по величине значения эквивалентных напряжений, что объясняется достаточной жёсткостью узлов крепления указанных элементов. Узлы крепления элементов  $R_{2,1,2}$  и  $R_{2,2,1}$ , находятся в центре соответствующих хорд, которые обладают значительной податливостью.

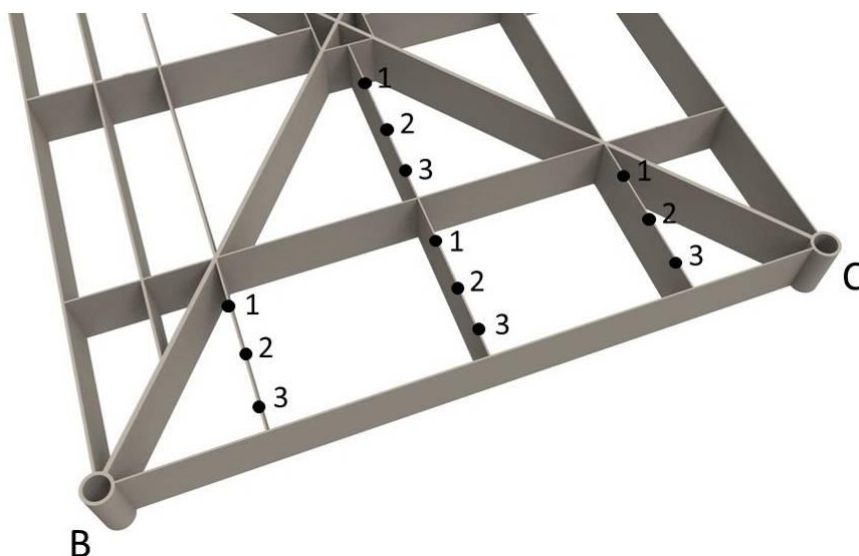


Рис. 6. Схема расположения точек приложения усилий

Таблица 3

Значения эквивалентных напряжений (МПа) в элементах металлоконструкции

Обозначение элемента № точки	R <sub>2.1.1</sub>			R <sub>2.1.2</sub>			R <sub>2.1.3</sub>			R <sub>2.2.1</sub>		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Тип схемы												
Схема с жёсткими опорами	165	162	165	165	162	165	165	162	165	174	188	174
Схема с шарнирными опорами	244	288	244	244	288	244	244	288	244	282	344	292
Численное моделирование	134	175	151	217	241	155	131	170	151	230	302	282

В связи с этим, полученные в ходе численного моделирования значения эквивалентных напряжений далеки от результатов аналитического расчёта по предлагаемым схемам и находятся в диапазоне между значениями, определёнными расчетом с учетом предложенных схем с жесткими и шарнирными опорами.

#### 4. Результаты и их анализ

С учетом результатов численного моделирования напряжённо-деформированного состояния металлоконструкции в различных случаях нагружения можно сделать вывод, что расчёт радиальных и хордовых элементов можно производить только от усилий, действующих на рассматриваемый сегмент. Итоговая расчётная схема главного диаго-

нального элемента формируется из всего спектра силовых факторов, воздействующих на него через вспомогательные элементы соседних секторов, описанных в соответствующих ячейках матриц расчётных схем.

Очевидно, что выбор расчётной схемы напрямую зависит от жёсткости элементов. При расчёте элементов небольшой протяжённости, соединяемых с жёсткими элементами металлоконструкции, рационально использовать в качестве расчётной схемы двухопорную балку с жёстким закреплением концов. При расчёте протяжённых элементов действующие напряжения могут быть приближено определены как среднее арифметическое значение величин, полученных при расчёте по двум предложенным схемам. При оценке максимальных возможных напряжений в протяжённых элементах с наименьшей

жесткостью может быть использована схема с шарнирным опиранием балки. Данные рекомендации распространяются на все типы элементов, входящих в структуру металлоконструкции тележки.

## 5. Заключение

Применение мощных программных комплексов, позволяющих осуществлять многоциклоый конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкций на основе трехмерных параметрических моделей с последовательным улучшением их характеристик после каждого расчетного цикла, является затратным не только с позиции стоимости соответствующего программного обеспечения, но и с позиции необходимости обучения соответствующего инженерного персонала. В таком

контексте поиск возможных аналитических решений проектных задач, дающих качественный расчетный результат с достаточной степенью точности, является актуальной задачей, так как позволяет при привлечении персонала с «классическим» набором инженерных навыков использовать простейшие программные средства для проведения всего комплекса проектных мероприятий.

В результате проведенных в настоящей работе исследований сформирован комплекс рекомендаций по аналитическому решению задачи комплексного анализа напряженно-деформированного состояния металлоконструкции грузовой тележки на основе универсальной компоновочной схемы, что в случае корректного применения снижает весь комплекс затрат на проведение проектных процедур при проектировании грузовых тележек кранов мостового типа.

## Список литературы

1. Гончаров, К.А. Подход к проектированию опорных тележек кранов общего назначения мостового типа с учётом универсальной компоновочной схемы их металлоконструкции / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – №3. – С. 43-49.
2. Гончаров, К.А. Универсальная компоновочная схема металлоконструкции грузовой тележки крана мостового типа / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – №1. – С. 60-66.
3. Гончаров, К.А. Модульная металлоконструкция рамы грузовой тележки крана мостового типа / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научное обозрение. – 2017. – №16. – С. 13-16.
4. Гохберг, М.М. Металлические конструкции подъёмно-транспортных машин / М.М. Гохберг. – Л.: Машиностроение, 1969. – 520 с.
5. Шабашов, А.П. Мостовые краны общего назначения / А.П. Шабашов, А.Г. Лысяков. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.

## References

1. Goncharov K.A., Denisov I.A. Approach to support truck design for general purpose cranes of bridge type taking into account universal layout diagram of their metal structure. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*, 2017, No. 3, pp. 43-49. doi :[https://doi.org/10.12737/article\\_59b11cbd491971.92745634](https://doi.org/10.12737/article_59b11cbd491971.92745634) (In Russian).
2. Goncharov K.A., Denisov I.A. Multipurpose layout drawing of metalware of bridge crane load trolley. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.1, pp. 60-66. doi :<https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-01-60-66> (In Russian).
3. Goncharov K.A., Denisov I.A. Modular metal structure of the frame of the jib crab of the bridge crane. *Nauchnoe obozrenie*, 2017, No. 16, pp. 13-16. (In Russian).
4. Gokhberg M.M. Metal structures of hoisting-and-transport machines. Leningrad, Mashinostroenie, 1969. 520 p. (In Russian).
5. Shabashov A.P., Lysyakov A.G. Bridge cranes of general purpose. Moscow, Mashinostroenie, 1980. 304 p. (In Russian).
6. Parnitsky A.B., Shabashov A.P. Bridge cranes of general purpose: design, calculation, operation. Moscow, MASHGIS, 1961. 319 p.



6. Парницкий, А.Б. Мостовые краны общего назначения: конструкция, расчёт, эксплуатация / А.Б. Парницкий, А.П. Шабашов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МАШГИС, 1961. – 319 с.

7. Вершинский, А.В. Численный анализ металлических конструкций подъёмно-транспортных машин / А.В. Вершинский, И.А. Лагереv, А.Н. Шубин, А.В. Лагереv. – Брянск: РИО БГУ, 2014. – 186 с.

8. Лагереv, И.А. Расчёты грузоподъёмных машин методом конечных элементов: монография / И.А. Лагереv. – Брянск: Издательство БГТУ, 2013. – 116 с.

9. Лагереv, И.А. Оптимальное проектирование подъёмно-транспортных машин: монография / И.А. Лагереv, А.В. Лагереv. – Брянск: БГТУ, 2013. – 228 с.

10. Титов, Н.А. Нелинейные конечно-элементные расчёты в задачах прочности подъёмно-транспортных машин / Н.А. Титов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2016. – №2. – С. 51-58.

(In Russian).

7. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. Numerical analysis of metal constructions of lifting-transport machines. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2014. 186 p. (In Russian).

8. Lagerev I.A. Calculations of load-lifting machines by the finite element method. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tehnicheskiiy Universitet, 2013. 116 p. (In Russian).

9. Lagerev I.A., Lagerev A.V. Optimalnoe proektirovanie podemno-transportnykh mashin [Optimum design of hoisting machines]. Bryanskiy Gosudarstvennyy Tehnicheskiiy Universitet, 2013. 228 p. (In Russian).

10. Titov N.A. Nonlinear finite element calculations in problems of strength of lifting-transport machines. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.2, pp. 51-58. (In Russian).