

УДК (UDC) 621.86

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ РАМЫ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ
МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСАLOAD SIMULATION OF A BASE STATION CHASSIS OF THE MOBILE TRANSPORT
AND OVERLOADING ROPE COMPLEXТаричко В.И., Шалупина П.И.
Tarichko V.I., Shalupina P.I.АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)
Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования напряженно-деформированного состояния рамы шасси, предназначенного для размещения оборудования базовой станции мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. Определены основные расчетные случаи. Построены геометрические и расчетные конечноэлементные модели, учитывающие особенности металлической конструкции и элементов подвески. Применена методика склейки элементов сеточной модели. На основе выполненных расчетов сделаны выводы о соответствии разработанной конструкции требованиям прочности и жесткости.

Ключевые слова: мобильная канатная дорога, шасси, рама, напряженно-деформированное состояние.

Дата принятия к публикации: 31.03.2021
Дата публикации: 25.06.2021

Сведения об авторах:

Таричко Вадим Игоревич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – главный конструктор АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: 32.6909@mail.ru.

Шалупина Павел Игоревич – начальник конструкторского бюро расчетов и надежности АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: p.shalupina@gmail.com.

Abstract. The article deals with the issues of modeling the stress-strain state of a chassis designed to accommodate the equipment of a mobile transport and overloading rope complex. The main computational cases are determined. Geometric and computational finite element models are constructed, taking into account the features of the metal structure and suspension elements. The method of gluing elements of the grid model is applied. On the basis of the performed calculations, conclusions are drawn about the compliance of the developed structure with the requirements of strength and rigidity.

Keywords: mobile ropeway, chassis, frame, stress-strain state.

Date of acceptance for publication: 31.03.2021
Date of publication: 25.06.2021

Authors' information:

Vadim I. Tarichko – Candidate of Technical Sciences, Deputy general director – General designer, Bryansk Automobile Plant JSC, e-mail: 32.6909@mail.ru.

Pavel I. Shalupina – Head of the Design Bureau of Calculations and Reliability, Bryansk Automobile Plant JSC, e-mail: p.shalupina@gmail.com.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8

Acknowledgements

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8

1. Введение

Мобильные транспортно-перегрузочные канатные комплексы используются для выполнения транспортных операций в труднодоступной местности, а также в сложных опе-

ративных условиях. Оборудование канатной дороги (канатные шкивы, мачты, натяжные устройства, тяговые и несущие канаты, при- выходы) размещаются на мобильных шасси различной конструкции (на колесных или гусеничных шасси) [1-13].

Известны различные варианты компоновки основного оборудования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базовом шасси. Один из вариантов предполагает размещение мачты канатной дороги на конце рамы (в районе заднего свеса) [14]. При работе рама воспринимает внешние нагрузки, действующие со стороны канатной дороги [14, 15].

В работе рассмотрен расчет напряженно-деформированного состояния рамы шасси базовой станции, на основе результатов которого сделан вывод о соответствии конструкции условиям прочности и жесткости.

2. Конструкция рамы базовой станции

Конструкция рамы базового шасси показана на рис. 1. Основные эксплуатационные нагрузки воспринимает рама 1 и надрамник 2, состоящие из ряда лонжеронов. Базовая станция комплекса оснащается аутригерами 3 и 4, позволяющими обеспечить общую устойчивость системы согласно рекомендациям [3]. Узел установки 5 мачты канатной дороги представляет собой опорный круг, к которому мачта крепится шпильками.

Элементы конструкции рамы и надрамника изготавливаются из стали марки 09Г2, элементы конструкции аутригеров – из стали 30ХГСА или аналогов.

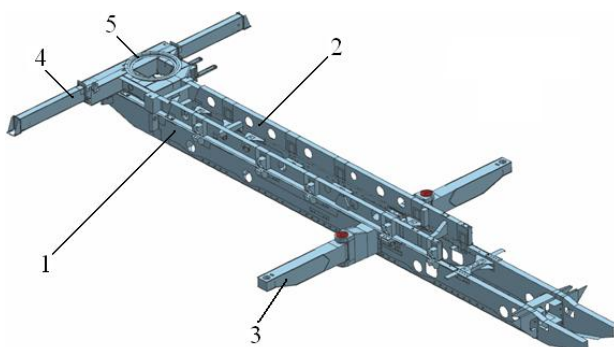


Рис. 1. Идеализированная геометрическая модель рамы базовой станции: 1 – основная рама; 2 – надрамник; 3 – передний аутригер; 4 – задний аутригер; 5 – узел установки мачты канатной дороги

В ходе проектирования базового шасси построена его геометрическая твердотельная модель (рис. 1). Для этого согласно извест-

ным методикам [16-18] использовалась система инженерного геометрического моделирования (CAD-система).

3. Определение расчетных нагрузок, действующих на раму базовой станции

При исследовании динамической нагруженности учитываются два режима работы – монтаж (развертывание) мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса на месте (режим 1) и эксплуатационный режим (режим 2). При этом статическая прочность конструкции однозначно определяется режимом 2.

Расчетная схема для определения нагрузок приведена на рис. 2. В зависимости от текущего значения угла ориентации мачты γ_t можно выделить две стадии, каждой из которых соответствует своя система внешних нагрузок.

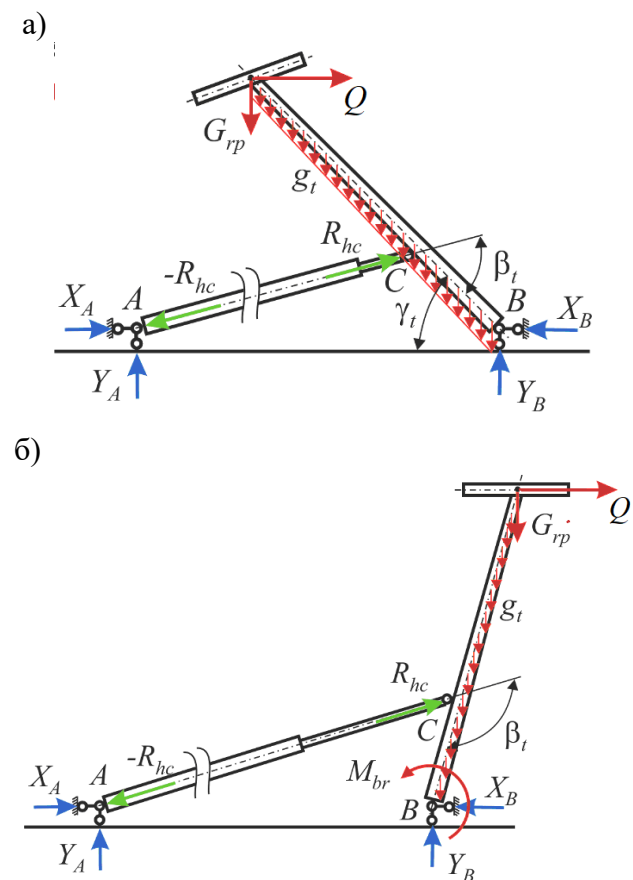


Рис. 2. Расчетная схема для определения нагрузок от мачты: а – стадия 1 при $\gamma_{ts} \leq \gamma_t \leq \pi/2$; б – стадия 2 при $\pi/2 < \gamma_t \leq \gamma_{ws}$ [19]

Усилие на гидроцилиндре можно вычислить следующим образом:

- стадия 1 ($\gamma_{ts} \leq \gamma_t \leq \gamma_{br}$)

$$R_{hc} = k_R \frac{(G_{rp} + 0,5g_t H_t - Q)H_t \cos \gamma_t}{n_{hc}(l_{Bc} - l_{Cc} \cos \beta_t) \sin \beta_t};$$

- стадия 2 ($\gamma_{br} < \gamma_t \leq \pi/2 + \gamma_{ws}$)

$$R_{hc} = k_R \frac{M_{br} + (G_{rp} + 0,5g_t H_t - Q)H_t \cos \gamma_t}{n_{hc}(l_{Bc} - l_{Cc} \cos \beta_t) \sin \beta_t},$$

где G_{rp} – динамическая нагрузка со стороны канатной дороги и сосредоточенный вес канатного шкива с элементами механизма его ориентации; g_t – распределенный вес мачты; Q – рабочее натяжение канатной системы; $M_{br}(\gamma_t)$ – тормозной момент относительно шарнира В, создаваемый специальным тормозным устройством; H_t – плечо гидроцилиндра; k_R – коэффициент запаса по усилию гидроцилиндра, учитывающий инерционные нагрузки при повороте концевой опоры вокруг шарнира В и весовые нагрузки от дополнительных элементов опоры (можно принять $k_R \sim 1,2 \dots 1,4$); n_{hc} – число силовых гидроцилиндров механизма; l_{ij} – расстояние между точками i и j [19].

Опорные реакции в местах шарнирного крепления к несущей раме концевой опоры и гидроцилиндра составляют:

$$Y_A = R_{hc} \left| \sin \left[\operatorname{atg} \left(\frac{l_{Bb} - l_{Aa} + l_{Bc} \sin \gamma_t - l_{Cc} \cos \gamma_t}{l_{ab} - l_{Bc} \cos \gamma_t - l_{Cc} \sin \gamma_t} \right) \right] \right|;$$

$$Y_B = G_{rp} + g_t H_t -$$

$$- n_{hc} R_{hc} \left| \sin \left[\operatorname{atg} \left(\frac{l_{Bb} - l_{Aa} + l_{Bc} \sin \gamma_t - l_{Cc} \cos \gamma_t}{l_{ab} - l_{Bc} \cos \gamma_t - l_{Cc} \sin \gamma_t} \right) \right] \right|;$$

$$X_A = R_{hc} \cos \left[\operatorname{atg} \left(\frac{l_{Bb} - l_{Aa} + l_{Bc} \sin \gamma_t - l_{Cc} \cos \gamma_t}{l_{ab} - l_{Bc} \cos \gamma_t - l_{Cc} \sin \gamma_t} \right) \right];$$

$$X_B = -n_{hc} X_A \quad [19].$$

4. Расчетная модель для исследования напряженно-деформированного состояния рамы базовой станции

Моделирование напряженно-деформированного состояния рамы базовой станции

мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса выполнено методом конечных элементов [16-17, 20].

На основе геометрической модели (рис. 1) разработана расчетная конечноэлементная модель (рис. 3). Геометрия листовых тел аппроксимируется плоскими оболочечными трех и четырехузловыми конечными элементами, учитывающими толщину металла в каждом узле, твердых тел – объемными тетраэдральными четырехузловыми конечными элементами.

Листовые элементы соединены между собой посредством инструмента моделирования «сшивка», при использовании которого грани «сшиваются» между собой в единое тело по совпадающим ребрам. В дальнейшем образуется сплошная согласованная конечноэлементная сетка.

Массы установленных узлов и агрегатов приняты согласно весовой ведомости на шасси и учтены в модели в виде точечных масс, расположенных в их центрах тяжести и связанных с местами крепления специальными интерполяционными конечными элементами распределения массовых нагрузок.

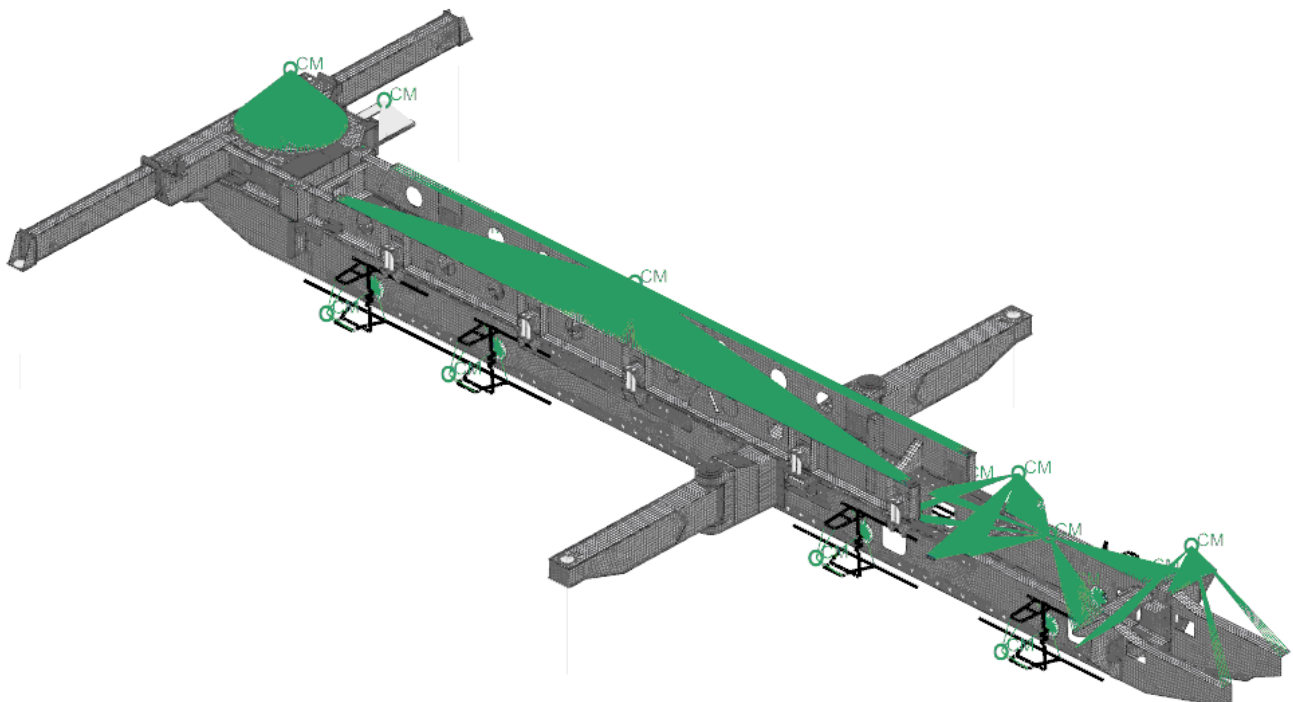
Дополнительно для корректной передачи усилий между элементами конструкции в некоторых частях модели применяются специальные объекты моделирования типа «склейка», которые технически реализуются в виде абсолютно жестких соединений.

Соединение некоторых конструктивных элементов осуществляется при помощи болтовых соединений. В связи с этим в предложенной модели реализованы упрощенные модели болтовых соединений, представляющих собой набор одномерных элементов. Тело болта моделируется балочным элементом, имеющим геометрические размеры и свойства материала болта, а взаимодействие шляпки/гайки к конструкцией – элементами связи, что обеспечивает корректную силовую схему в области болтового соединения.

Средний размер плоских конечных в модели составляет 30 мм, объемных – 20 мм. Количество узлов в модели равно 143302, элементов – 221670.

Общий вид разработанной конечноэлементной модели представлен на рисунке 2.

a)



б)

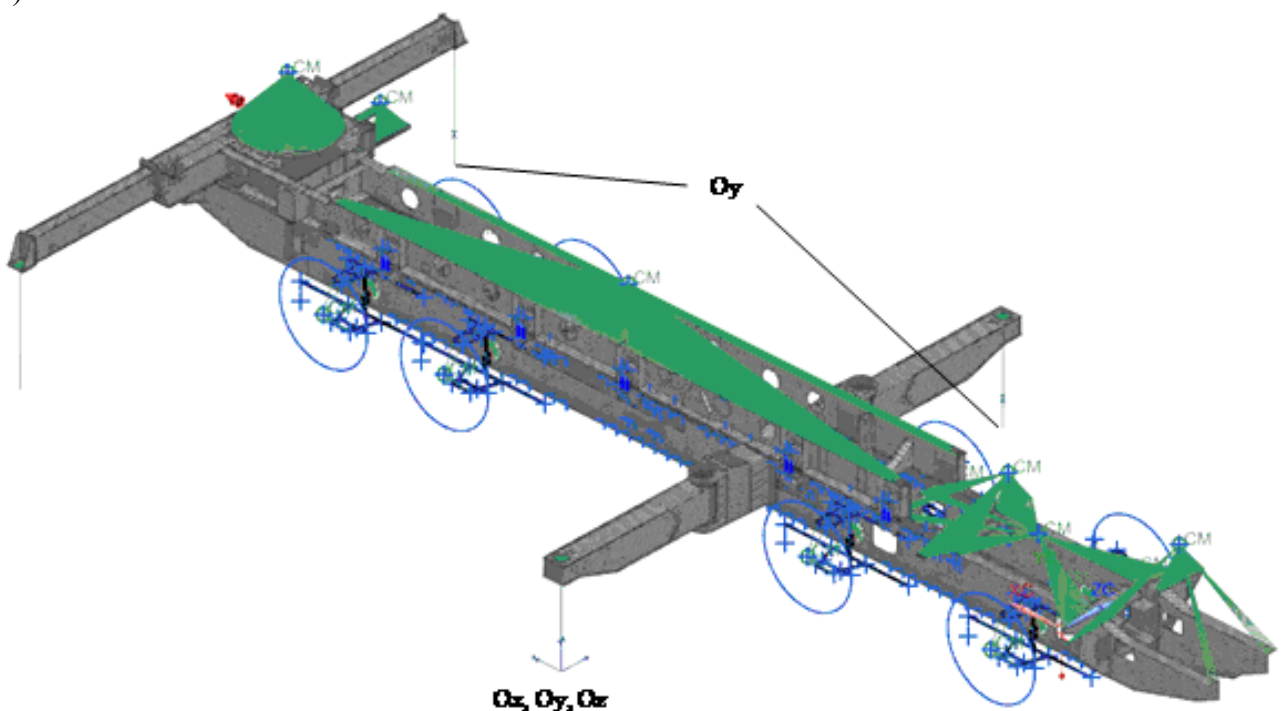


Рис. 3. Расчетная конечноэлементная модель рамы базовой станции:
а – сеточная модель с заданными массами элементов конструкции;
б – конечноэлементная модель с закреплениями

5. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния рамы базовой станции

На рис. 4 показана картина распределения суммарных деформаций рамы базового шасси (геометрическая сумма деформаций по осям координат). Максимальные деформации рамы достигают 120 мм. Это связано с относительно высокой длиной рамы при сравнительно малой ее ширине (отношение составляет 10:1). При оценке общей устойчивости базовой станции следует учитывать эти упругие деформации. Экспериментальные исследования показали, что расчет устойчивости без учета деформаций рамы приводит к нарушению равновесия. Однако детальное описание этого вопроса не входит в предмет рассмотрения настоящей статьи.

На рис. 5 показана картина распределения эквивалентных напряжений по Мезису, действующих в элементах исследуемой конструкции. В целом напряжения в наиболее

нагруженных областях не превышают 120...160 МПа.

Значения действующих эквивалентных напряжений в характерных точках конструкции приведены в таблице.

Таблица
Эквивалентные напряжения по Мезису

Точка	Напряжение, МПа
Лонжероны в районе кабины	20...40
Лонжероны между передними и задними аутригерами	110...130
Лонжероны в зоне узла установки мачты канатной дороги	180...220
Передние аутригеры шасси	140...190
Надрамник в зоне узла установки мачты канатной дороги	140...190

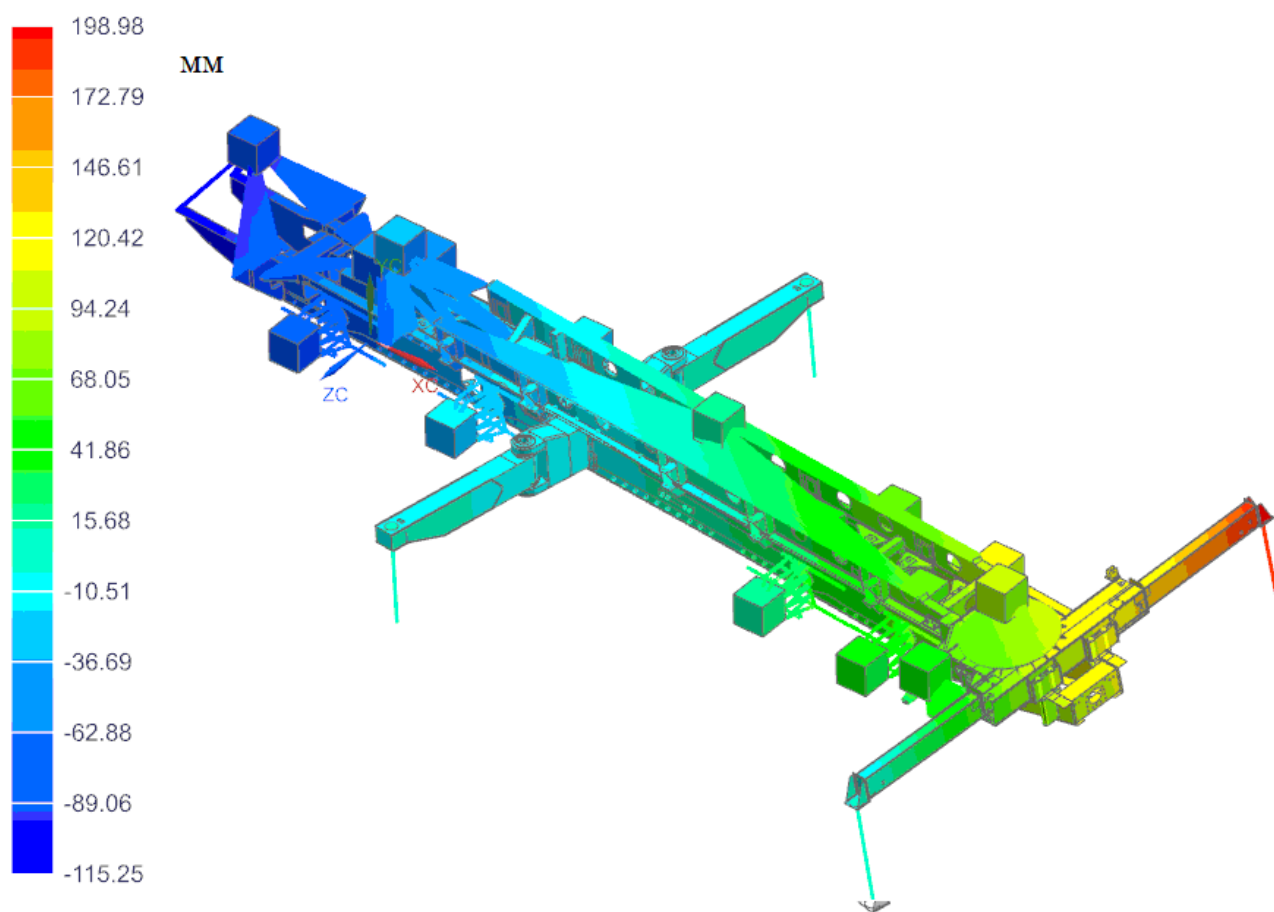


Рис. 4. Суммарные перемещения расчетных точек рамы базовой станции (в мм)

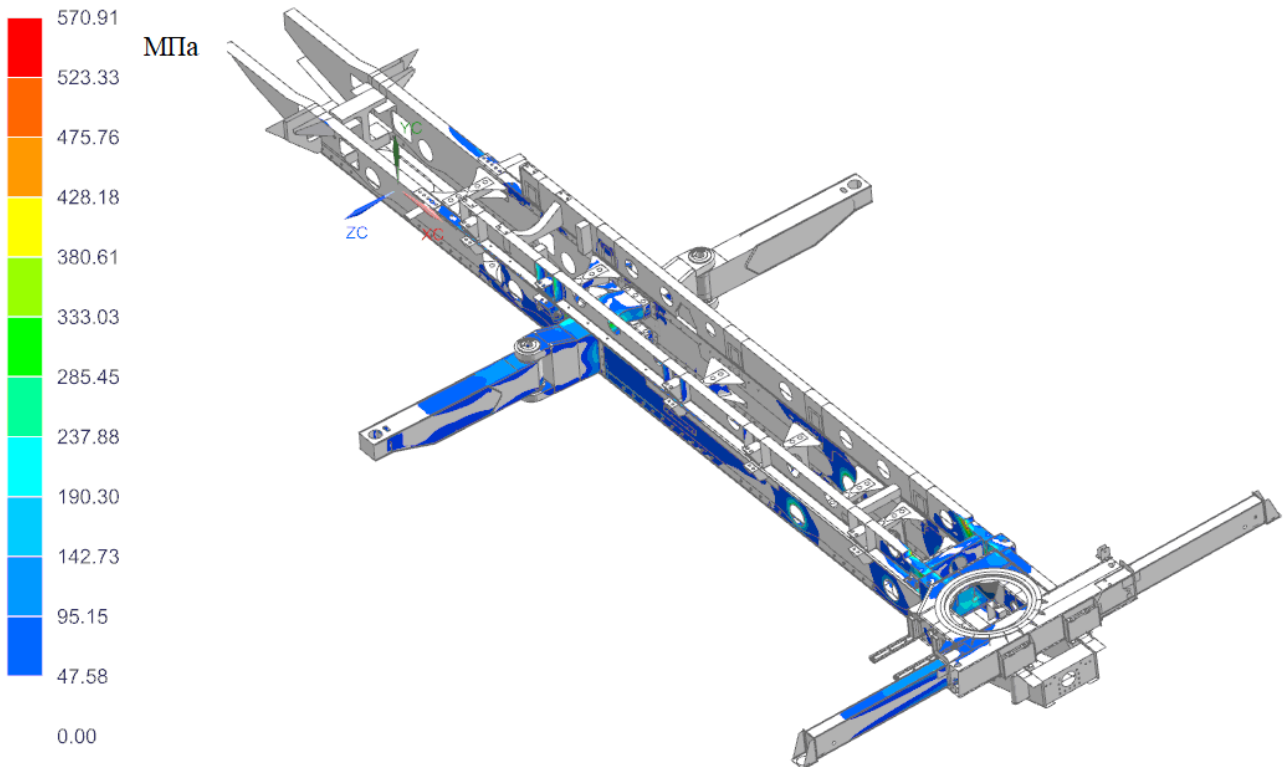


Рис. 5. Эквивалентные напряжения по Мезису рамы базовой станции (в МПа)

Расчеты базового шасси стандартной конструкции показали наличие в раме зон перегрузки, в которых могут возникнуть пластические деформации (рис. 6).

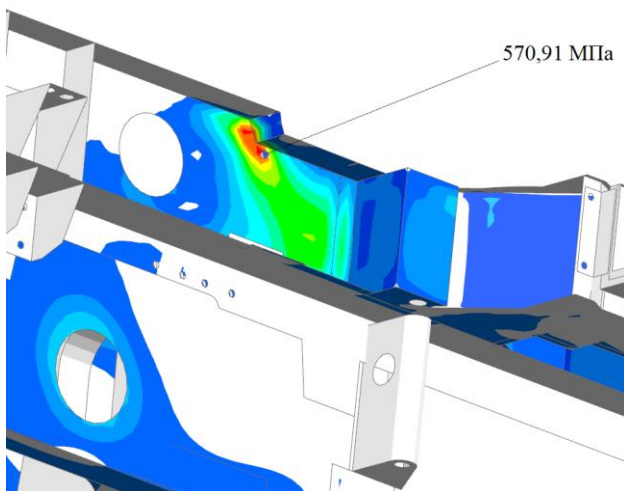


Рис. 6. Локальные зоны перегрузки в районе узла установки мачты канатной дороги

Эквивалентные напряжения в этих локальных зонах, расположенных возле узла установки мачты канатной дороги, достигают 570 МПа при пределе текучести материала 350 МПа.

Следует отметить, что реальные напряжения в зонах пластической деформации будут несколько ниже, так как в расчете используется линейно-упругая модель материала. Однако с точки зрения конструктора это не имеет значения, так как наличие зон пластической деформации не только не допустимо, но и необходимо обеспечить запас прочности не ниже 1,2...1,6.

Для решения выявленной проблемы предложен вариант усиления рамы стандартной конструкции (рис. 7).

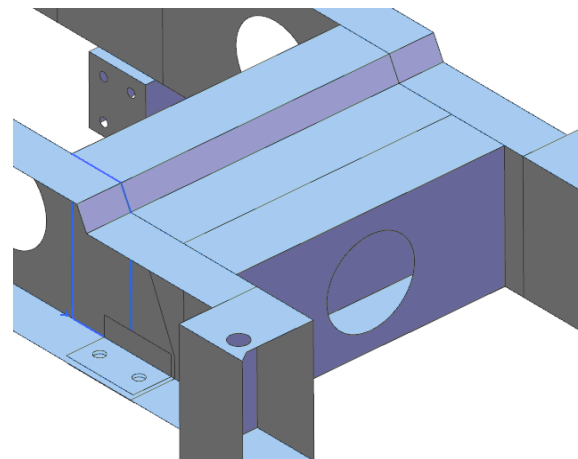


Рис. 7. Элемент усиления рамы

Расчет усиленной конструкции (рис. 8) показал, что максимальные деформации снижаются на 15%, запас прочности в выявленной зоне перегрузки составляет 1,24.

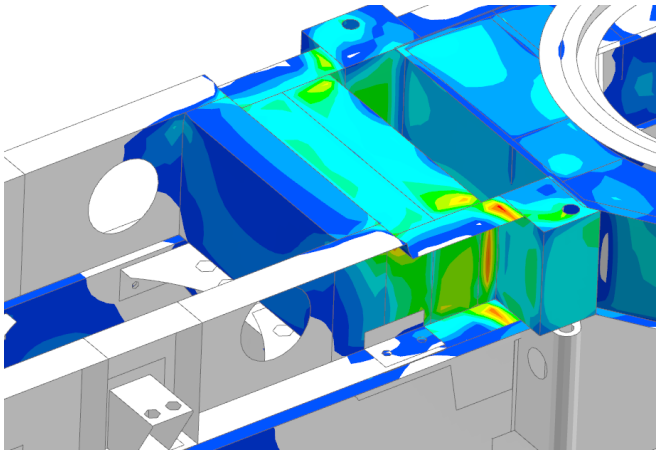


Рис. 8. Картина распределения эквивалентных напряжений в усиленной конструкции

Список литературы

1. Пат. 2337023 Рос. Федерация: МПК7 В61В 7/00. Мобильная подвесная канатная дорога / Короткий А.А., Хальфин М.Н., Маслов В.Б. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2007102705/11; заявл. 24.01.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. 30.
2. Пат. 2465423 Рос. Федерация: МПК7 E04H 3/14. Стадион / Короткий А.А., Приходько В.М. Кустарев Г.В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2011112660/03; заявл. 01.04.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. 30.
3. Лагереv А.В., Таричко В.И., Солдатченков С.П. Обеспечение общей устойчивости базовых колесных станций мобильных канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 210-220.
4. Макурин А.Н., Обрядин В.П. К вопросу об использовании мобильных воздушных канатных дорог для аварийно-спасательных работ // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 4. С. 73-77.

6. Основные выводы и рекомендации

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Спроектированная конструкция рамы базовой станции мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса удовлетворяет требованиям прочности и жесткости. Максимальные значения действующих эквивалентных напряжений не превышают 120...160 МПа.

2. При расчете общей устойчивости базовой станции следует учитывать упругие деформации рамы шасси. Это связано с высокими деформациями, обусловленными относительно высокой длиной рамы при сравнительно малой ее ширине.

3. При разработке комплексных математических моделей [21] рекомендуется разработка подмодели крутильных деформаций рамы, вызванных внешними воздействиями.

References

1. Patent RU 2337023, B61B 7/00. Mobilnaya podvesnaya kanatnaya doroga [Mobile ropeway]. Korotkiy A.A., Khalphin M.N., Maslov V.B. Published 27.10.2008. (In Russian)
2. Patent RU 2465423, E04H 3/14. Stadion [Stadium]. Korotkiy A.A., Prihodko V.M., Kustarev G.V. Published 27.10.2012. (In Russian)
3. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P. General stability of a base vehicle of a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 210-220. (In Russian)
4. Makurin A.N., Obryadin V.P. K voprosu ob ispolzovanii mobilnykh vozдушnykh kanatnykh dorog dlya avariyno-spasatelnykh rabot (On the use of mobile aerial ropeways for rescue operations). *Nauchnye i obrazovatelnye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2015, No. 4, pp. 73-77. (In Russian)
5. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P., Ignatov D.A. The experimental model creation of a mobile ropeway by 3D-printing. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 221-230. DOI: 10.22281/2413-

5. Лагерев И.А., Таричко В.И., Солдатченков С.П., Игнатов Д.А. Создание экспериментального макета мобильной канатной дороги с использованием 3D-печати // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 221-230. – DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230>.

6. Мехренцев А.В., Герц Э.Ф., Мартинек Я., Новак Л. Канатные трелевочные установки. Екатеринбург, Брно: УГЛТУ, 2012. 19 с.

7. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2015. Т.1. № 1. С. 57-65.

8. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Короткий А.А., Панфилов А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» // Вестник Брянского государственного технического университета. 2012. №3. С. 12-15. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>

9. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро // Вестник Брянского государственного университета. 2014. № 4. С. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302237>

10. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2017. 344 с.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913>

11. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Моделирование режимов работы гидрорывов с частотно-дрессельным регулированием мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480

12. Лагерев И.А., Таричко В.И., Лагерев А.В. Формирование стратегии восстановления канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного

9920-2019-05-02-221-230 (In Russian)

6. Mekhrentsev A.V., Gerts E.F., Martinek Ya., Novak L. *Kanatnye trelevochnye ustanovki* [Cable skidders]. Ekaterinburg, Brno, UGLTU, 2012. 19 p. (In Russian)

7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of cable subway lines in a highly urbanized city environment. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2015, Vol.1, No.1, pp. 57-65. (In Russian)

8. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Innovation transport system "Bryansk rope metro". *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 3, pp. 12-15. (In Russian)

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>

9. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Cable transport system "Kanatnoe metro" towers distance optimization. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.4, pp. 22-30.

10. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913> (In Russian)

11. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Modeling operation modes of hydraulic drives with frequency-throttle regulation of mobile transport and overloading ropes complexes. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480 (In Russian)

12. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Lagerev A.V. Formation of the strategy for restoring the rope system of the mobile transport and reloading rope complex during operation. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293 (In Russian)

13. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Probability-temporal analysis of reliability indicators kinetics at the stage of designing a rope system of a mobile transport and reload-

комплекса в процессе эксплуатации // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293

13. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Вероятностно-временной анализ кинетики показателей надежности на стадии проектирования канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 256-275. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275>

14. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Компоновка технологического оборудования на базовом шасси мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №3. С. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403

15. Лагерев И.А., Лагерев А.В. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Конструкции и условия эксплуатации. Брянск: РИО БГУ, 2018. 190 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1294622>

16. Вершинский А.В., Лагерев И.А., Шубин А.Н., Лагерев А.В. Численный анализ металлических конструкций подъемно-транспортных машин. Брянск: РИО БГУ, 2014. 186 с.

17. Вершинский А.В., Лагерев И.А., Шубин А.Н., Лагерев А.В. Расчет металлических конструкций подъемно-транспортных машин методом конечных элементов. Брянск: РИО БГУ, 2015. 210 с.

18. Киятина, И.И. Формирование компетенций в области современных сквозных цифровых технологий у обучающихся по направлению «Реклама и связи с общественностью» / И.И. Киятина, И.А. Лагерев // Ученые записки Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 11-15.

19. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Конструкции и основы проектирования мобильных транспортно-перегрузочных

ing ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 256-275. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275> (In Russian)

14. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Placement of technological equipment on the basic chassis of the mobile transportation and reloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.3, pp. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403 (In Russian)

15. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Sovremennaya teoriya manipulatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselevykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov. Konstruktsiya i usloviya ekspluatatsii* [Modern theory of manipulation systems of mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes. Design and operating conditions]. Bryansk, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, 2018. 190 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1294622>. (In Russian)

16. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Chislennyi analiz metallicheskih konstruktsii podemno-transportnykh maschin* [Numerical analysis of metal constructions of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2014. 186 p. (In Russian).

17. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Raschet metallicheskih konstruktsii podemno-transportnykh maschin metodom konechnykh elementov* [Calculation of metal structures of lifting and transport machines by the finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 210 p. (In Russian).

18. Kiyutina I.I. Lagerev I.A. Formation of competencies in the field of modern end-to-end digital technologies for students in the direction of PR, *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 11-15. (In Russian)

19. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruktsii i osnovy proektirovaniya*

