

УДК 629.33

EDN: KFNXSP

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОЛУПРИЦЕПА НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУТЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

П.С. Рубанов

ORCID: 0009-0000-2055-2046 e-mail: rubanov_ps@bk.ru

Инновационный центр «КАМАЗ»

Москва, Россия

Р.Б. Гончаров

ORCID: 0000-0003-4805-967X e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

А.О. Поляков

ORCID: 0009-0000-7892-2767 e-mail: artemdrezna@mail.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

И.О. Хренов

ORCID: 0009-0007-1949-9285 e-mail: hrenoviol@rubuses.ru

Инжиниринговый центр ЛиАЗ, территориально обособленное подразделение Москва

Москва, Россия

Использование полуприцепа с минимальной снаряженной массой для осуществления грузоперевозок в составе автопоезда позволяет повысить эксплуатационные свойства автомобиля-тягача, снизив общие затраты на изготовление и увеличив массу перевозимых грузов. Снаряженная масса полуприцепа в значительной степени зависит от конструкции его основных элементов, что делает актуальным выбор рациональных параметров несущей системы на стадии проектирования с учетом прочностных и жесткостных свойств. Представлено решение поставленной задачи при помощи метода конечных элементов. Для снижения массы несущей системы полуприцепа применялась параметрическая оптимизация методом градиентного спуска. Расчеты проводились в программном комплексе *Siemens NX*. Выявлены наиболее нагруженные места в несущей системе полуприцепа для различных вариантов конструкции, проведена параметрическая оптимизация элементов конструкции для снижения массы за счет варьирования геометрических параметров при условии сохранения свойств прочности и жесткости. После проведенной параметрической оптимизации масса полученной конструкции снизилась. Полученные результаты могут быть использованы для создания реальной конструкции полуприцепа.

Ключевые слова: несущая система, полуприцеп, расчет на прочность, МКЭ, параметрическая оптимизация, метод градиентного спуска.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рубанов, П.С. Совершенствование конструкции несущей системы полуприцепа на стадии проектирования путем параметрической оптимизации / П.С. Рубанов, Р.Б. Гончаров, А.О. Поляков, И.О. Хренов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 108-119. EDN: KFNXSP

PARAMETRIC OPTIMIZATION FOR IMPROVING DESIGN OF SEMI-TRAILER LOAD-BEARING SYSTEM AT DESIGN STAGE

P.S. Rubanov

ORCID: 0009-0000-2055-2046 e-mail: rubanov_ps@bk.ru

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

R.B. GoncharovORCID: **0000-0003-4805-967X** e-mail: **goncharov.roman@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia***A.O. Polyakov**ORCID: **0009-0000-7892-2767** e-mail: **artemdrezna@mail.ru**

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia***I.O. Khrenov**ORCID: **0009-0007-1949-9285** e-mail: **hrenoviol@rubuses.ru**

LiAZ Engineering Center is a geographically separate division in Moscow

Moscow, Russia

Abstract. The use of a semi-trailer with a minimum curb weight for cargo transportation as part of a road train makes it possible to increase the operational properties of a tractor vehicle, reduce overall manufacturing costs and increase the weight of transported goods. The curb weight of the semi-trailer largely depends on the design of its main elements, therefore, the choice of rational parameters of the load-bearing system at the design stage, taking into account strength and stiffness properties, is an urgent task. The article presents a solution to the problem using the finite element method. Parametric optimization by gradient descent was used to reduce the weight of the semi-trailer load-bearing system. The calculations were carried out in the Siemens NX software. The most loaded places in the semi-trailer load-bearing system for various design options were identified, after which parametric optimization of structural elements was carried out to reduce weight by varying geometric parameters, provided that the properties of strength and rigidity were preserved. After parametric optimization, the mass of the resulting structure was reduced. The results obtained can be used to create a real semi-trailer design.

Key words: load-bearing system, semi-trailer, strength calculation, FEM, parametric optimization, gradient descent.

FOR CITATION: P.S. Rubanov, R.B. Goncharov, A.O. Polyakov, I.O. Khrenov. Parametric optimization for improving design of semi-trailer load-bearing system at design stage. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 108-119. EDN: KFNXSP

Введение

В настоящее время рациональное распределение материала в проектируемых конструкциях с целью уменьшения массы при сохранении параметров прочности и жесткости является актуальной задачей [1-2]. Существует несколько путей снижения массы, которые могут быть применены при создании конструкций:

1) использование более легких материалов, таких как алюминиевые сплавы, титан, магний или композитные материалы с высокой прочностью, которые позволяют существенно снизить массу конструкции;

2) использование алгоритмов оптимизации для получения рациональных конструкций с учетом прочности, жесткости и массы.

Существует множество видов оптимизации, применимых при проектировании различных конструкций, среди которых можно выделить: топологическую оптимизацию [3-4] и параметрическую оптимизацию [5-6]. Топологическая оптимизация основана на изменении геометрии конструкции путем удаления лишнего материала и уменьшения массы при сохранении необходимых прочностных характеристик. Процедура параметрической оптимизации построена на изменении геометрических параметров конструкции для снижения массы и сохранения требуемой прочности. Преимуществами использования оптимизации при проектировании являются сокращение материалозатрат при производстве и снижение времени, затрачиваемого на разработку и проектирование новых изделий. Алгоритм параметрической

оптимизации выполняет серию итераций, корректируя переменные в рамках заданных ограничений, до достижения параметров конструкции, которые соответствуют цели оптимизации с учетом наложенных ограничений. В процессе оптимизации меняются геометрические параметры основной модели, идеализированной геометрии или конечно-элементной модели путем корректировки переменных, указанных в настройках программы. Существует множество оптимизационных алгоритмов [7], в приложении для прочностных расчетов программного комплекса NX для оптимизации используется метод градиентного спуска.

В данной работе рассматривается применение параметрической оптимизации для снижения массы несущей системы полуприцепа, использующегося в составе автопоезда, совместно с автомобилем ГАЗель. В ходе работы были рассмотрены различные типы конструкций полуприцепов [8], для которых получены напряженно-деформированные состояния (НДС) несущей системы для нескольких нагрузочных режимов, после чего проведена параметрическая оптимизация элементов конструкции для снижения массы.

Варианты конструкций несущей системы полуприцепа

В работе рассматриваются два типа конструкций несущих систем полуприцепа (рис. 1):

- 1) рама с высотой лонжерона в средней части 300 мм (с углублением под рулоны листового металла);
- 2) рама с высотой лонжерона в средней части 250 мм (без углубления под рулоны листового металла).

Для всех рассматриваемых вариантов конструкции толщина верхней полки лонжерона – 6 мм, нижней полки лонжерона – 6 мм, ребер и накладок – 4 мм (рис. 2).

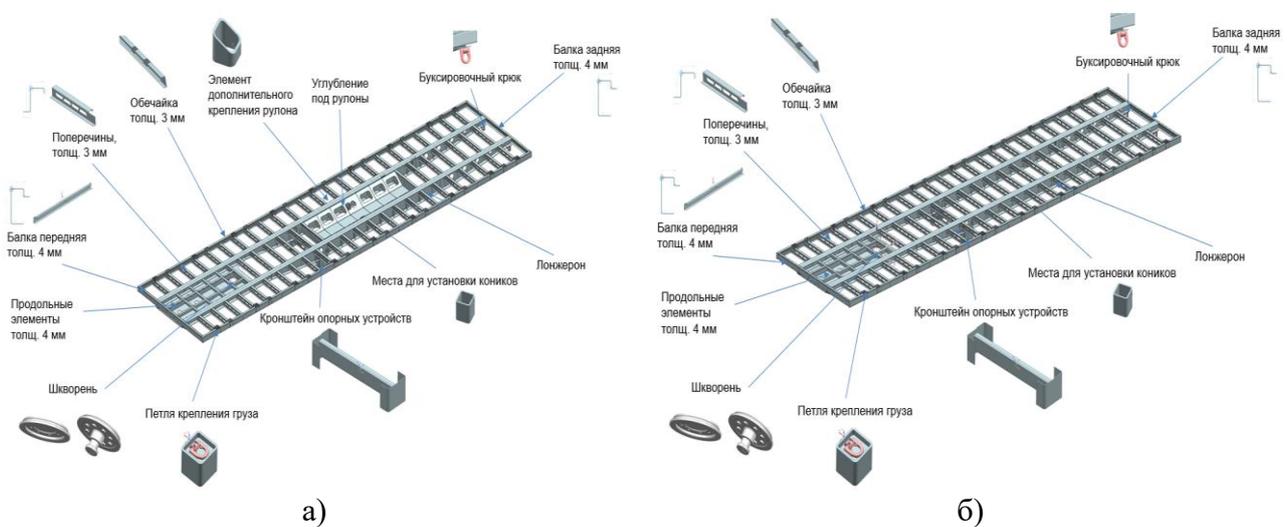


Рис. 1. Типы конструкций несущей системы полуприцепа:
а) первый вариант конструкции; б) второй вариант конструкции

Fig. 1. Types of semi-trailer load-bearing system designs:
a) first design; б) second design

Анализ напряженно-деформированного состояния несущей системы полуприцепа

Для проведения анализа НДС несущей системы полуприцепа были рассмотрены следующие нагрузочные режимы [9-1414]:

- статический режим нагружения;
- тяговый режим нагружения на ровной опорной поверхности;

- движение задним ходом на ровной опорной поверхности;
- разворот на месте.

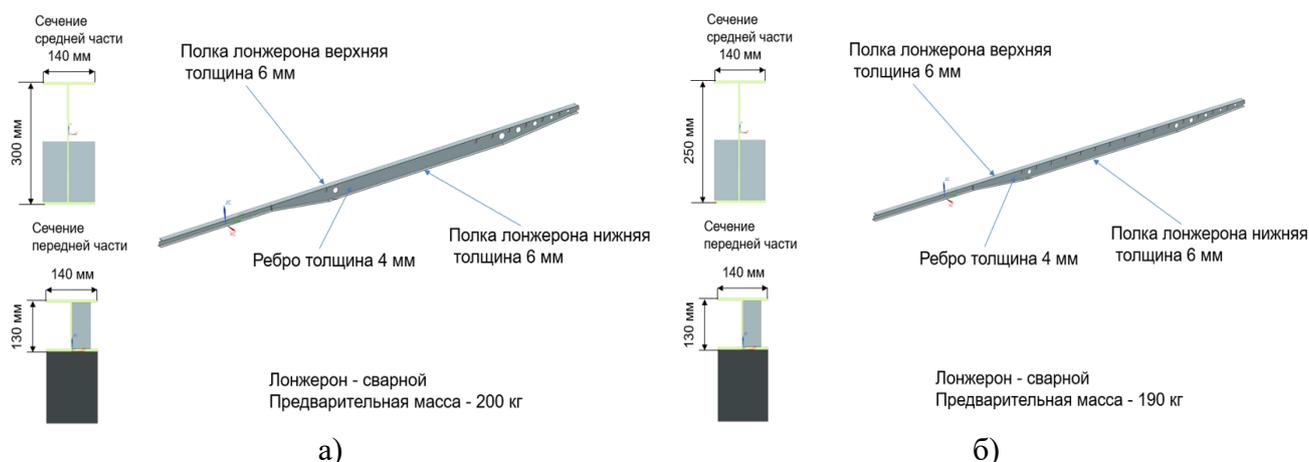


Рис. 2. Конструктивные элементы несущей системы полуприцепа:

- а) геометрические параметры элементов первого варианта конструкции;*
б) геометрические параметры элементов второго варианта конструкции

Fig. 2. Structural elements of the semi-trailer load-bearing system:

- a) geometric parameters of the elements of the first design;*
b) geometric parameters of the elements of the second design

Для первого типа конструкции дополнительно проводился расчет с закрепленными на несущей системе полуприцепа рулонами листового металла. Для всех нагрузочных режимов в местах контакта колес с опорной поверхностью и в месте крепления шкворня, осуществляющего соединение с транспортным средством (ТС), ограничены перемещения. Для левого колеса ограничены перемещения по всем трем осям системы координат, для правого колеса ограничено перемещение по осям Oy и Oz и в месте соединения с ТС ограничено перемещение по осям Ox и Oz . Расчетная схема показана на рис. 3.

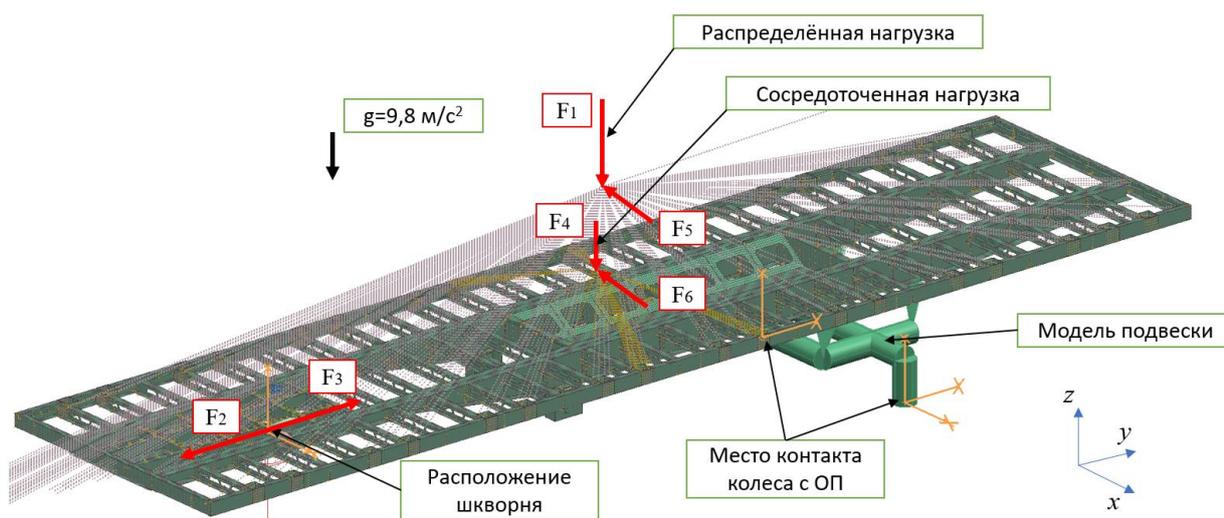


Рис. 3. Расчетная схема несущей системы полуприцепа

Fig. 3. Calculation scheme of the semi-trailer load-bearing system

Нагрузки, действующие на раму полуприцепа, для различных режимов нагружения представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Силы в расчетной модели
Table 1.
Forces in the calculation model

Нагрузка	Значение, Н
Сила тяжести от перевозимого груза (распределенная нагрузка), F_1	58860
Тяговое усилие, F_2	47088
Толкающие усилие при движении задним ходом, F_3	47088
Сила тяжести от рулонов листового металла (сосредоточенная нагрузка), F_4	58860
Сила инерции груза, F_5	11580
Сила инерции от рулонов листового металла, F_6	11580

Допущения, принятые при расчете:

- сварочные швы в конечно-элементной модели (КЭМ) не учитываются, детали жестко соединены между друг другом;
- упругие и демпфирующие свойства системы поддрессоривания в конечно-элементной модели не учитываются;
- податливость кронштейнов крепления подвески не учитывается, соединение осуществляется при помощи RBE2 элементов;
- свойства шин не учитываются, в месте контакта колес с опорной поверхностью задается жесткое закрепление.

На рис. 4 показана исходная модель несущей системы полуприцепа и полученная конечно-элементная (КЭ) модель, состоящая из элементов типа *Quad4*. КЭМ несущей системы состоит из 102730 элементов и 114047 узлов. Элементы конструкции несущей системы изготовлены из стали 10ХСНД и фанеры, укладываемой сверху. Характеристики материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2.
Характеристики материалов элементов конструкции несущей системы полуприцепа

Table 2.
Characteristics of materials of structural elements of the semi-trailer load-bearing system

Материал	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести σ_t , МПа	Предел прочности, σ_b , МПа
Сталь 10ХСНД ГОСТ 19282–73	200000	0,3	390	470
Фанера ламинированная ГОСТ 3916.1–2018	7000	0,06	—	25

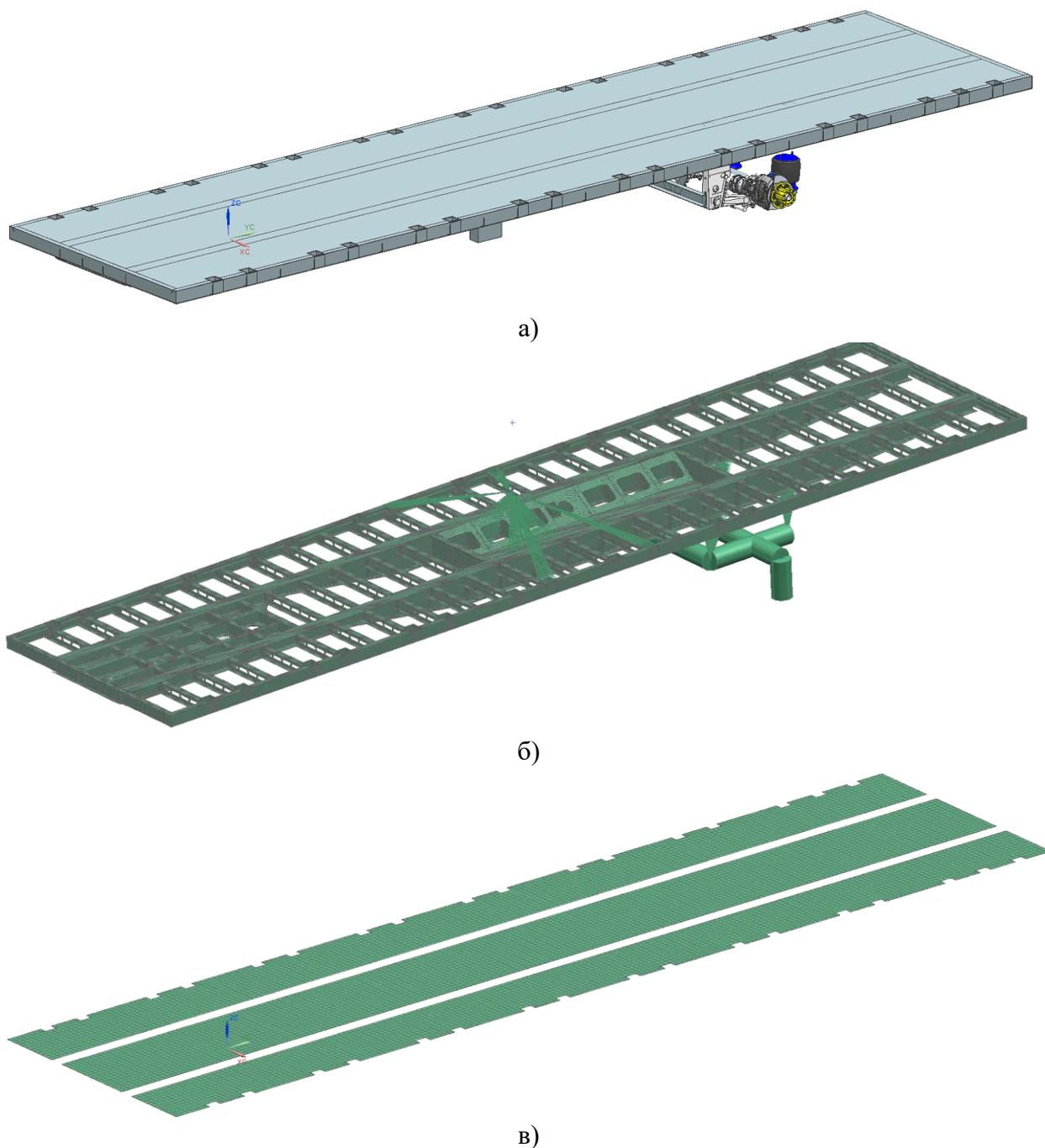


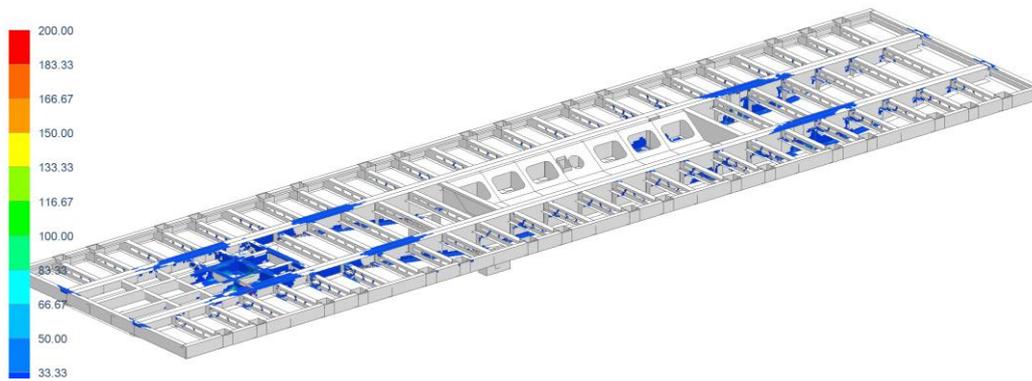
Рис. 4. КЭ модель несущей системы полуприцепа:

*а) модель несущей системы полуприцепа;
б) КЭМ несущей системы полуприцепа (листы фанеры не показаны); в) КЭМ листов фанеры*

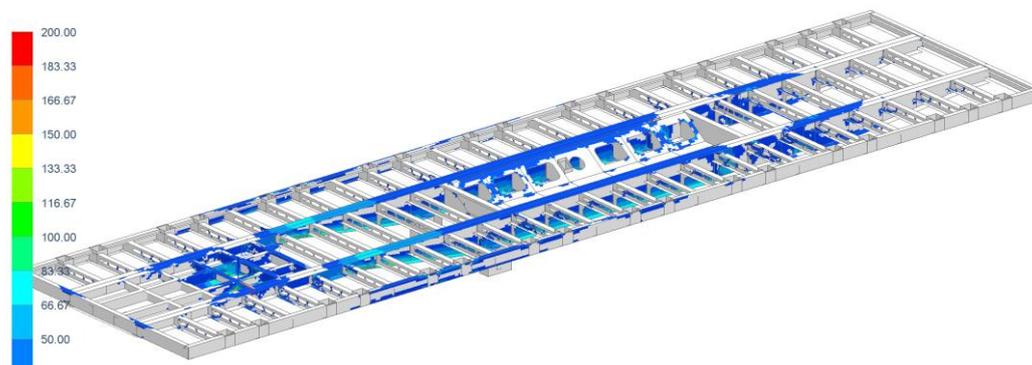
Fig. 4. Finite element model (FEM) of the semi-trailer load-bearing system:

*a) model of the semi-trailer load-bearing system;
б) FEM of the semi-trailer load-bearing system (plywood sheets not shown); в) FEM of plywood sheets*

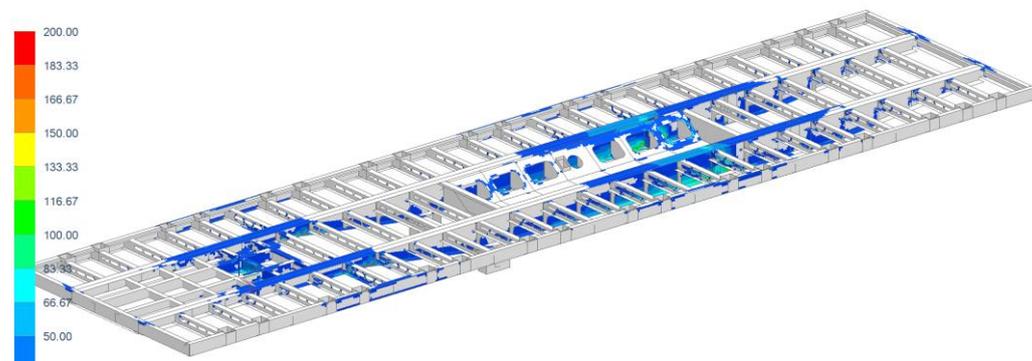
На рис. 5 показан пример полученного НДС несущей системы. Результаты расчета представлены в табл. 3.



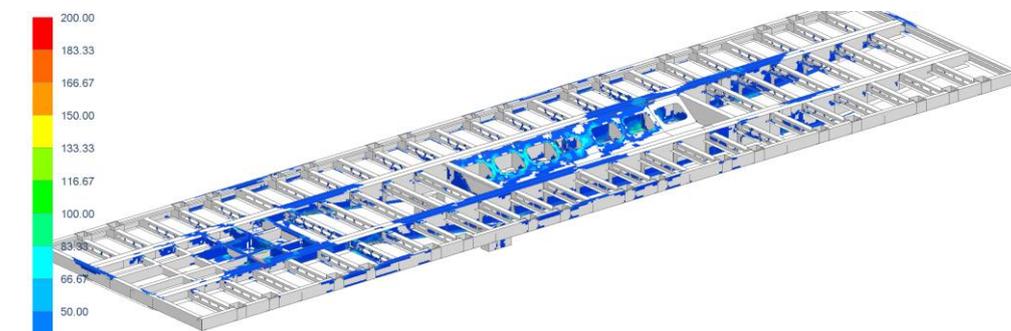
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Результаты расчета:

а) статический режим нагружения; б) тяговый режим;
в) движение задним ходом; г) разворот на месте

Fig. 5. Calculation results:

а) static loading mode; б) traction mode; в) driving in reverse; г) turn on the spot г) разворот на месте

Таблица 3.
Результаты расчета НДС несущей системы полуприцепа

Table 3.
Calculation results of stress-strain states of the semi-trailer load-bearing system

Рассматриваемый тип конструкции	Режим нагружения	Максимальные напряжения, МПа	Коэффициент запаса
1	Статический	60	6,5
	Тяговый	265	1,5
	Движение задним ходом	203	1,9
	Разворот на месте	190	2
1 (с закрепленными рулонами листового металла)	Статический	191	2
	Тяговый	300	1,3
	Движение задним ходом	195	2
	Разворот на месте	205	1,9
2	Статический	90	4,3
	Тяговый	203	1,9
	Движение задним ходом	228	1,7
	Разворот на месте	181	2,2

Анализ результатов расчета показал, что наибольшие эквивалентные напряжения в конструкции несущей системы возникают в тяговом режиме нагружения для первого варианта конструкции с закрепленными рулонами листового металла (коэффициент запаса составляет 1,3). Для второго варианта конструкции самым тяжелым режимом нагружения является движение задним ходом по ровной опорной поверхности (коэффициент запаса равен 1,7). Для остальных нагрузочных режимов коэффициенты запаса составляют 1,9 и более, следовательно, масса рассматриваемых вариантов несущих систем полуприцепов может быть уменьшена путем применения параметрической оптимизации с учетом сохранения прочности и жесткости.

Параметрическая оптимизация элементов конструкции несущей системы полуприцепа

С целью совершенствования конструкции несущей системы были добавлены накладки в виде стальных пластин в местах изменения жесткости рамы полуприцепа. Места расположения накладок показаны на рис. 6. Для проведения параметрической оптимизации выбраны следующие варьируемые параметры (толщины):

- диапазон изменения толщины для верхней и нижней полок лонжерона равен от 3 до 12 мм;
- диапазон изменения толщины ребра равен от 2 до 8 мм.

Для первого варианта конструкции несущей системы диапазон варьирования значений толщин накладок составляет от 2 до 8 мм, для второго варианта от 3 до 12 мм. Целевой функцией задачи оптимизации является минимизация массы. Накладываемые ограничения: максимальное эквивалентное напряжение, возникающее в конструкции, не должно превы-

шать 250 МПа, что соответствует коэффициенту запаса 1,56. Оптимизация проводилась в программном комплексе *Siemens NX*.

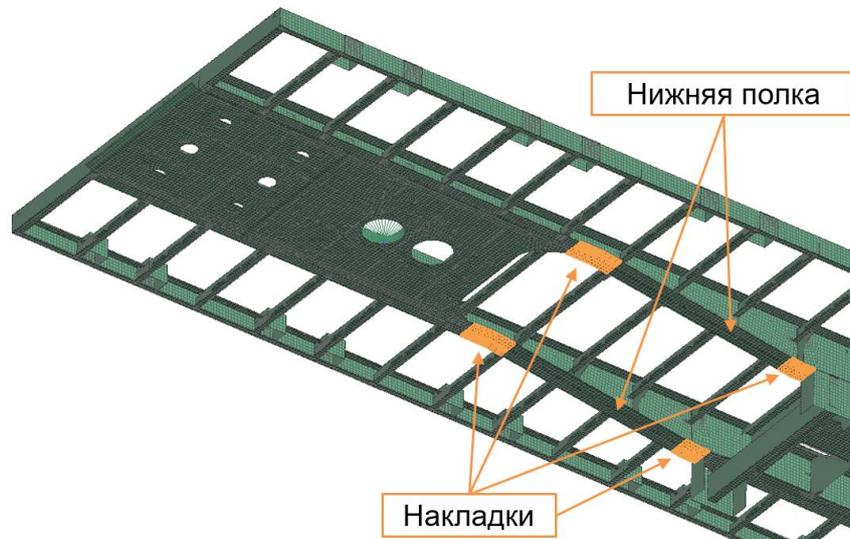


Рис. 6. Места расположения накладок

Fig. 6. Locations of patch

В результате проведенной оптимизации было выявлено, что толщину верхней полки лонжерона и ребра для первого и второго вариантов конструкций можно уменьшить до 3 мм, толщину нижней полки не менять, а толщину накладок увеличить до 6 мм. Результаты сравнения масс исходных и оптимизированных конструкций показаны в табл. 4.

Таблица 4.

Результаты параметрической оптимизации

Table 4.

Results of parametric optimization

Вариант конструкции	Исходная масса несущей системы, кг	Оптимизированная масса несущей системы, кг	Исходная масса лонжерона, кг	Оптимизированная масса лонжерона, кг
1	1132	1050 (уменьшена на 7,2 %)	200	164
2	1033	960 (уменьшена на 7 %)	190	150

Для первого и второго вариантов оптимизированной конструкции наблюдается более равномерное распределение напряжений. В первом варианте конструкции изменение НДС в наиболее опасных местах не превышает 20 МПа, перемещений не более 2,5 мм. Во втором варианте конструкции увеличение эквивалентных напряжений в самых нагруженных элементах не превосходит 60 МПа, а перемещений – 13 мм. На рис. 7 и 8 показано сравнение результатов расчета до и после оптимизации для наиболее тяжелых режимов нагружения.

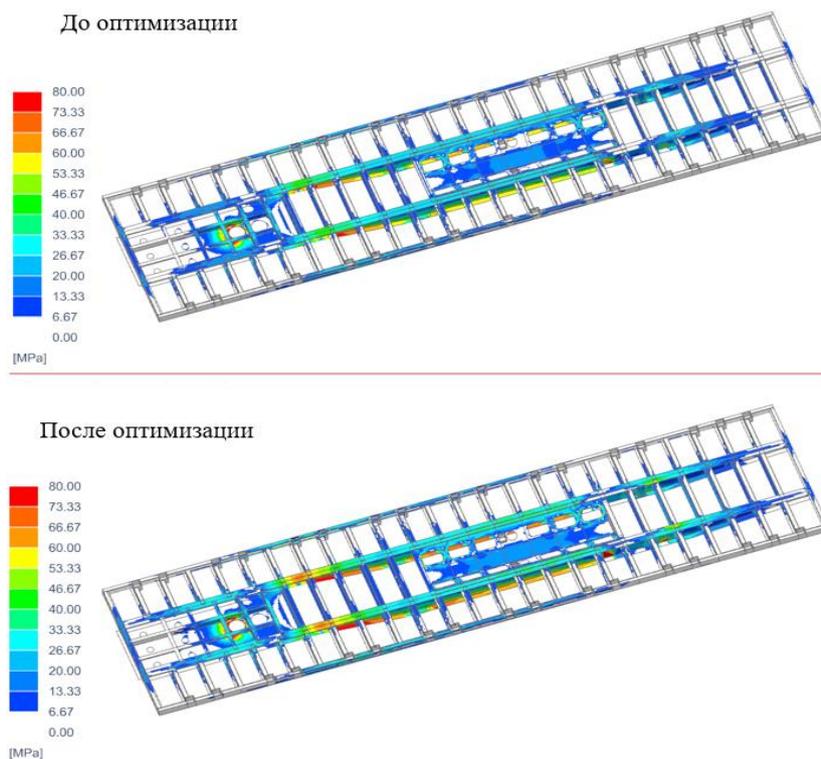


Рис. 7. Сравнение результатов расчета до и после оптимизации для первого варианта конструкции

Fig. 7. Comparison of calculation results before and after optimization for the first design

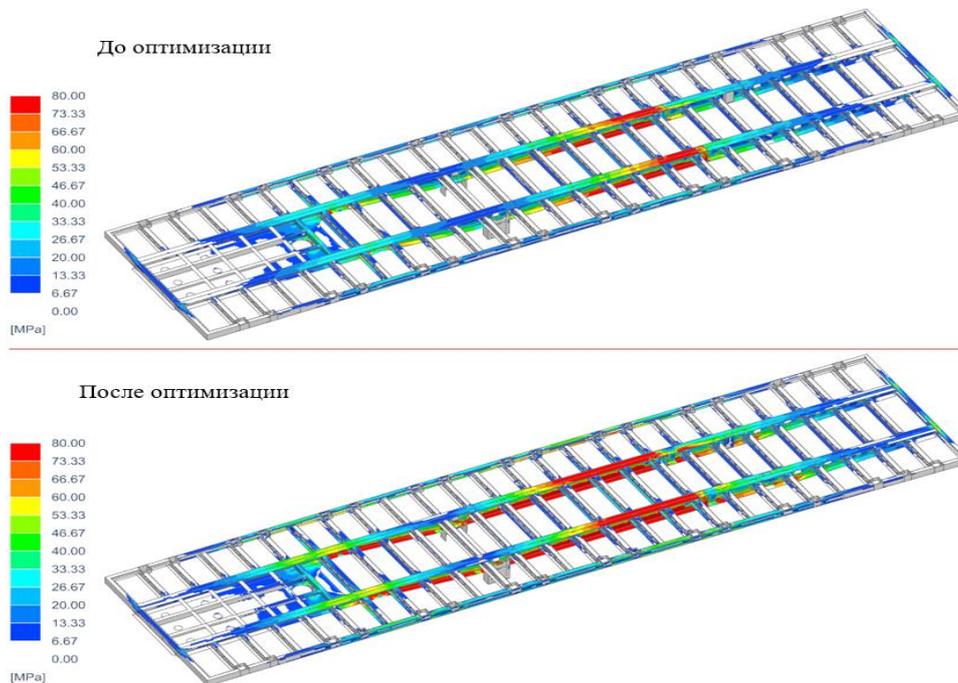


Рис. 8. Сравнение результатов расчета до и после оптимизации для второго варианта конструкции

Fig. 8. Comparison of calculation results before and after optimization for the second design

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Самый тяжелый нагрузочный режим для первого варианта конструкции – тяговый с сосредоточенной нагрузкой (рулон листового металла), для второго варианта – тяговый и движение задним ходом.

2. В обоих вариантах конструкции необходимо усилить накладками места переменного сечения лонжеронов.

3. Результаты параметрической оптимизации для первого и второго вариантов конструкций показывают, что толщины элементов можно уменьшить, тем самым снизить массу несущей системы полуприцепа на 7,2 и 7 % соответственно.

4. Изменение НДС в оптимизированных конструкциях незначительно по сравнению с базовыми вариантами. Максимальные эквивалентные напряжения не превышают 250 МПа.

Несущая система полуприцепа, полученная с использованием оптимизационных алгоритмов, соответствует установленным требованиям по прочности и жесткости. Для максимального уменьшения массы необходимо отказаться от углубления под перевозку рулонов листового металла, что позволит снизить массу несущей системы полуприцепа, в сравнении с первым вариантом конструкции, при сохранении требуемых показателей прочности и жесткости. Снижение массы спроектированной несущей системы полуприцепа позволяет уменьшить материалозатраты на изготовление, что повышает грузоподъемность, экономическую эффективность, а также улучшает эксплуатационные свойства автомобиля-тягача.

Библиографический список

1. **Крыжевич, Г.Б.** Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций / Г.Б. Крыжевич, А.Р. Филатов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 1(391). С. 95-108.
2. **Дьяконова, В.А.** Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании / В.А. Дьяконова, Н.В. Осипова, А.С. Токарев // Наука ГТИ НИЯУ МИФИ-2023: Сборник научных трудов. – Трехгорный: Трехгорный технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2023. – С. 23-30.
3. **Вдовин, Д.С.** Метод топологической оптимизации в задачах проектирования безопасных кабин сельскохозяйственной и строительной техники // Известия МГТУ МАМИ. 2018. № 4(38). С. 21-29.
4. **Гончаров, Р.Б.** Топологическая оптимизация конструкции бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Известия МГТУ МАМИ. 2018. № 2(36). С. 2-9.
5. **Гончаров, Р.Б.** Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности / Р. Б. Гончаров, В. Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2018. № 3(122). С. 130-136.
6. **Goncharov, R.** The study of parametric optimization algorithms on example of vehicle bumper crash-worthiness / R. Goncharov, V. Zuzov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow. Vol. 820. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. 012030.
7. **Василькин А.А., Зубков Г.В.** Параметрическая оптимизация конструкции навеса численными методами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 34-49.
8. **Слободюк, А.П.** Обоснование конструктивных параметров полуприцепа // Цифровые и инженерные технологии в АПК: Материалы Национальной научно-практической конференции 25 ноября 2021 года. – Майский: Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, 2022. – С. 106-111.
9. **Шермухамедов, А.А.** Методика расчет напряженно-деформированного состояния рамных конструкций автотракторных прицепов категории ОЗ при различных внешних воздействиях / А.А. Шермухамедов, А.А. Тогаев // МНИЖ. 2015. № 3-1 (34).

10. **Дащенко, А.Ф.** Анализ напряженно-деформированного состояния рамы автомобильного полуприцепа в программе ANSYS / А.Ф. Дащенко, Н.Г. Сурьянинов, Д.В. Лазарева // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2005. № 29. С. 160-161.
11. **Слободюк, А.П.** Обоснование конструктивных параметров полуприцепа // Цифровые и инженерные технологии в АПК: Материалы Национальной научно-практической конференции 25 ноября 2021 года. – Майский: Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, 2022. С. 106-111.
12. Проектирование полноприводных колесных машин. Том 3 / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Л.Ф. Жеглов [и др.]. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 432 с.
13. **Вихров, А.В.** Несущие системы транспортных средств специального назначения: учебное пособие / А.В. Вихров. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2015. – 112 с.
14. **Гончаров, Р.Б.** Методика расчета нагрузок, действующих в направляющих элементах подвески автомобиля при преодолении препятствий / Р. Б. Гончаров, Д. М. Рябов // Известия МГТУ МАМИ. 2015. Т. 1. № 3(25). С. 129-135.

*Дата поступления
в редакцию: 10.04.2024*

*Дата принятия
к публикации: 07.07.2024*