

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_114

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ СНЕГОХОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

Я.Ю. ЛевенковORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: lique87@mail.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***И.В. Чичекин**ORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: hiv2@mail.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Д.Р. Лебедев**ORCID: 0000-0002-7558-611X e-mail: denis26788@mail.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Представлена методика создания несущей системы с использованием твердотельной динамической модели снегохода и с учетом условий эксплуатации, а также существующие технологии ее изготовления. Объектом исследования является снегоходная мототехника, предметом выступают методы оптимального проектирования силовых конструкций транспортных средств и их использование с учетом условий эксплуатации и технологии изготовления на предприятии. На примере утилитарного снегохода представлены основные этапы разработки силовой схемы и выбора параметров конструкции его несущей системы. Определены основные исходные данные, необходимые для разработки ее концепции, описан подход по выбору типа сечения труб. Для подтверждения предложенного подхода проведены проверочные расчеты. Методика позволяет разработать концепцию несущей системы снегохода на ранних стадиях проектирования, удовлетворяющую требованиям производства на предприятии.

Ключевые слова: расчет на прочность, оптимизация, снегоход, нагрузочные режимы, метод конечных элементов, нагрузки, несущая система, динамика твердых тел, виртуальный прототип, топологическая оптимизация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Левенков, Я.Ю. Методика разработки несущей системы снегохода с использованием методов оптимизации конструкции / Я.Ю. Левенков, И.В. Чичекин, Д.Р. Лебедев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. №1. 114-124. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_114

METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF A SNOWMOBILE UNDERCARRIAGE SYSTEM USING DESIGN OPTIMIZATION METHODS

Y.Y. LevenkovORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: lique87@mail.ruBauman Moscow State Technical University
*Moscow, Russia***I.V. Chichekin**ORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: hiv2@mail.ruBauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

D.R. Lebedev

ORCID: 0000-0002-7558-611X e-mail: denis26788@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. Methodology of creating an undercarriage (load-bearing) system using a solid-state dynamic model of a snowmobile, taking into account the operation conditions and existing technologies for manufacture thereof, is presented. The object of study are snowmobile motor vehicles, the subject are the methods of optimal design of power structures of vehicles and their use, taking into account the operation conditions and manufacturing technology at the enterprise. Using the example of utilitarian snowmobile, main stages of power circuit development and the choice of structure parameters of its undercarriage, are presented. Basic initial data necessary for development of its concept are determined, an approach to choosing the type of pipe section is described. Verification calculations were carried out to confirm the proposed approach. Methodology makes it possible to develop a concept of a snowmobile undercarriage system at early stages of design that meets the requirements of production at the enterprise.

Key words: strength calculation, optimization, snowmobile, load conditions, finite element method, loads, undercarriage, dynamics of solids, virtual prototype, topological optimization.

FOR CITATION: Y.Y. Levenkov, I.V. Chichekin, D.R. Lebedev. Methodology for the development of a snowmobile undercarriage system using design optimization methods. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. Pp. 114-124. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_114

Введение

Снегоходная мототехника является основным транспортным средством в заснеженных регионах: на северо-западе России, в Сибири, странах Северной Европы, Канаде и т. д. Она разработана для эксплуатации на снегу и льду и не требует специально подготовленных дорог. Для некоторых регионов снегоход является основным транспортным средством для перевозки людей и грузов. Известно, что уменьшение массы деталей снегохода значительно улучшает такие эксплуатационные характеристики, как плавность хода, средняя скорость движения, топливная экономичность, грузоподъемность и т.д. Высокий уровень конкуренции среди производителей снегоходной мототехники требует широкого использования современных методов проектирования, в том числе, при разработке силовых элементов конструкции. Среди них можно особо выделить несущие системы, поскольку устранение их неисправностей, возникших при эксплуатации, сопряжены с высокими материальными и временными затратами. Применение методов оптимизации конструкций позволяет создавать прочные, жесткие и легкие несущие системы транспортных средств. Но часто результаты, например, топологической оптимизации сложно интерпретировать в условиях конкретного производства. В итоге это может привести к изменению технологического процесса, что повысит стоимость конечного продукта и снизит его конкурентоспособности на рынке. Также в нашей стране необходимо иметь высокую ремонтпригодность конструкции. Максимальное использование стандартных изделий из классических материалов позволяет существенно снизить стоимость изделия. При применении метода топологической оптимизации конструкции необходимо четко представлять условия ее эксплуатации, т.к. величина и направление действия усилий в узлах модели существенно влияют на ее силовую схему [1-5]. Поэтому создание методики разработки концепции несущей системы с учетом условий эксплуатации и технологических возможностей предприятия является актуальной задачей.

В статье рассмотрено создание концепции передней части несущей системы на примере снегохода Тайга Патруль 551 с использованием стандартных профилей. Разработка конструкции тоннельной части не рассматривается в данной статье и взята с серийной модели. Для нее проведена параметрическая оптимизация для определения потребных толщин в различных зонах тоннеля. Предложенный метод позволяет проводить разработку концепции несущей системы в целом.

Краткое описание методики

Разработанная методика включает в себя следующие основные этапы.

1. *Этап 1.* Формирование портрета эксплуатационных условий снегоходной мототехники. На этом этапе выполняется сбор данных об условиях эксплуатации, анализ этих данных, выделение типовых режимов и формирование списка нагрузочных режимов.

2. *Этап 2.* Разработка массовой сводки снегоходной мототехники с указанием массо-инерционных свойств, координат центра масс, габаритных размеров основных узлов и агрегатов. Для разрабатываемых элементов на ранних стадиях проектирования допускается использование этих параметров с прототипа. Далее необходимо определить основные точки передачи нагрузок. Также в качестве исходных данных может быть использована разработанная cad модель, которая экспортируется в программу расчета динамики твердых тел.

3. *Этап 3.* Разработка твердотельной динамической модели снегохода для определения нагрузок, действующих в узлах несущей системы. Разрабатываются модели основных системы снегохода, задаются характеристики двигателя и трансмиссии, рулевого управления, систем подрессоривания, определяются основные параметры контакта лыж и траков с опорной поверхностью. Параллельно идет разработка пространства проектирования для несущей системы и создание КЭМ для проведения топологической оптимизации. Формируются основные допущения, принимаемые при создании моделей.

4. *Этап 4.* Проведение расчетов и получение нагрузок, действующих в узлах несущей системы для выбранных расчетных режимов.

5. *Этап 5.* На этом этапе проводится обработка нагрузок, загрузка их в КЭМ пространства проектирования, проверка их адекватности [6, 7]. Например, наиболее общим критерием адекватности нагрузок для установившегося режима движения служит условие равенства нулю сумм сил и моментов относительно центра масс рассматриваемого тела. Также полученные нагрузки в каком-либо шарнире должны соответствовать его степеням свободы. Например, если в сферическом шарнире есть моменты, модель обрабатывает с ошибкой. Если полученные нагрузки не отвечают критериям адекватности, необходимо пересмотреть динамическую модель снегохода и проводить расчеты заново. В данной статье выбор критериев для оценки адекватности нагрузок подробно не рассматривается.

6. *Этап 6.* Проведение топологической оптимизации несущей системы транспортного средства и проведение первичной интерпретации результатов с учетом технологии производства несущей системы.

7. *Этап 7.* Проведение параметрической оптимизации.

8. *Этап 8.* Проверочный расчет несущей системы, проведение корректировок параметров элементов несущей системы при необходимости.

Этапы 6 и 7 могут быть выполнены несколько раз для уточнения параметров элементов несущей системы.

Формирование портрета эксплуатационных условий снегохода

Список нагрузочных режимов для определения максимальных нагрузок, действующих на несущую систему снегоходной мототехники, сформирован, исходя из результатов совместной работы сотрудников кафедры «Колесные машины» и АО «Русская механика». По результатам исследования условий эксплуатации и экспериментальных данных было выделено более 50 расчетных режимов, из которых для проведения расчетов выбрано 12 типовых событий, возможных для представления в виде квазистатического нагружения (табл. 1). Данные расчетные режимы являются критическими для снегохода, за исключением случая «Статика: стоянка на месте с гравитацией $1g$ ». Описание методики выбора расчетных режимов и определения основных режимов выходит за рамки данной статьи. Полные списки нагрузочных режимов для проектируемого снегохода являются интеллектуальной собственностью авторов и АО «Русская механика».

Таблица 1.

Список нагрузочных режимов для определения максимальных нагрузок, действующих на несущую систему снегоходной мототехники

Table 1.

List of load conditions for determining the maximum loads acting on the undercarriage of snowmobile motor vehicles

№	Режимы для статического расчета
1	Статика: стоянка на месте с гравитацией $1g$
2	Движение с максимальной тягой на гусенице
3	Торможение с максимальным замедлением 9 м/с^2
4	Движение на подъем в горку с углом подъема 45°
5	Движение на спуск с горы с углом спуска 45°
6	Буксировка с усилием на заднем крюке $F_{кр} = 5000\text{Н}$ вдоль продольной оси снегохода
7	Движение по косоугору с критическим углом крена по перевороту
8	Движение в повороте с минимальным радиусом $R = 20 \text{ м}$ и максимальной скоростью по условию отсутствия опрокидывания
9	Упор передних лыж в препятствие с одновременной максимальной тягой на гусеницах
10	Равномерная вертикальная перегрузка $3g$
11	Буксировка с усилием на переднем креплении $F_{кр} = 5000\text{Н}$ вдоль продольной оси снегохода
12	Буксировка с усилием на переднем креплении $F_{кр} = 5000\text{Н}$ под углом к продольной оси снегохода

Краткое описание модели снегохода

Для определения нагрузок, действующих на несущую систему снегохода разработана его математическая модель в программе расчета динамики твердых тел [8-11]. Объектом исследования является снегоход Тайга Патруль 551.

При построении модели снегохода сделаны следующие допущения:

- все звенья механизма являются абсолютно жесткими, недеформируемыми телами;
- трение в шарнирах отсутствует;
- опорная поверхность является абсолютно твердой;
- контактное взаимодействие лыж, гусеничного движителя смоделировано с использованием контакта поверхность-поверхность;
- модель водителя и пассажира абсолютно жесткие, при моделировании не меняют своего положения;
- все жидкости в емкостях не меняют своего положения (эффект плескания жидкостей не учтен);
- груз задан графическим примитивом, имеющими массово инерционные характеристики как реального объекта.

В модели учтены двигатель и бесступенчатая трансмиссия с помощью подключаемого DLL файла. Более подробное описание модели снегохода приведено в статье [12]. Общий вид модели расчета динамики твердых тел с ее основными элементами показан на рис. 1.

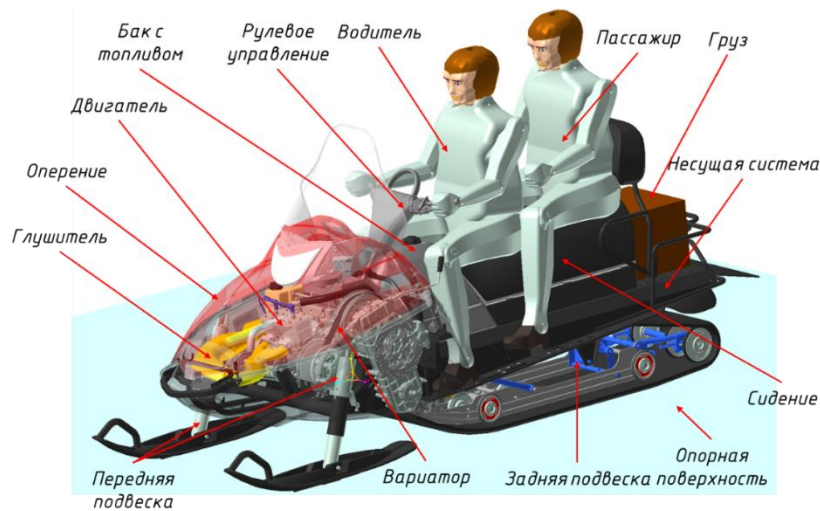


Рис. 1. Общий вид твердотельной динамической модели снегохода

Fig. 1. General view of a snowmobile solid-state dynamic model

Формирование пространства проектирования

Условно несущая система снегохода разделена на две части: переднюю (до тоннеля) и заднюю (рис. 2). В задней части расположен гусеничный движитель, поэтому, исходя из обзора конструкций несущих систем, она выполнена в виде короба, защищающего водителя, пассажира и груз от грязи и снега, летящих из-за работы гусеницы. Поэтому принято оставлять топологию тоннеля без изменения, проведя лишь параметрическую оптимизацию для определения требуемой толщины в различных его местах.

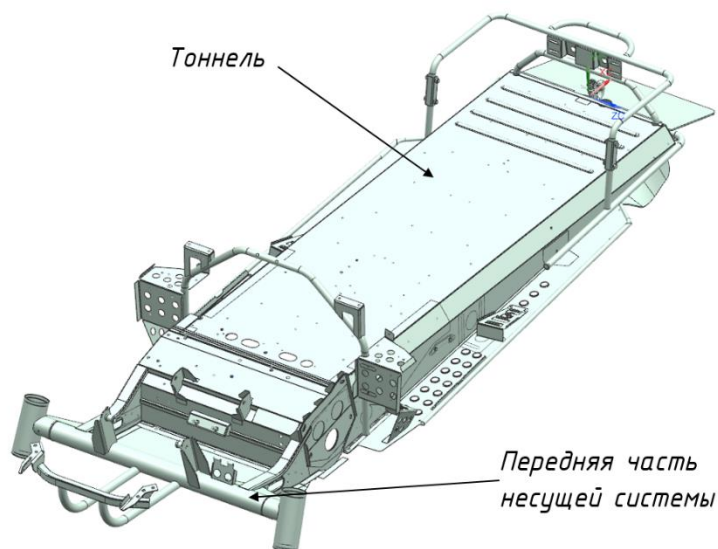


Рис. 2. Несущая система снегохода Тайга Патруль 551

Fig. 2. Undercarriage of Taiga Patrol 551 snowmobile

Для проведения топологической оптимизации конструкции передней части снегохода разработано пространство проектирования с учетом оперения, компоновки основных узлов и агрегатов. Также учтены зоны обметания движущихся частей элементов передней подвески и рулевого управления. Модель пространства проектирования показана на рис. 3.

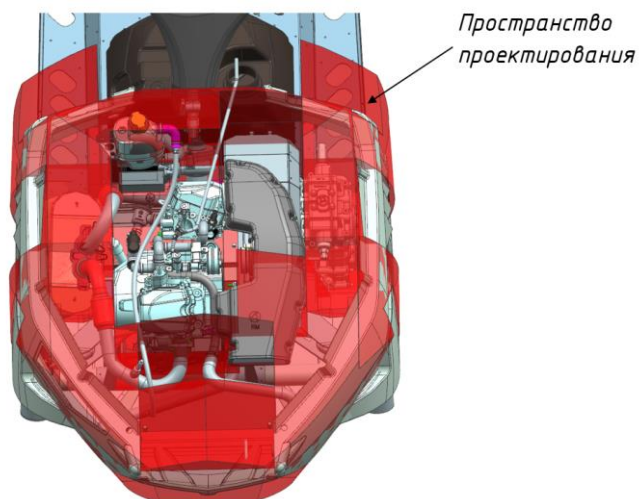


Рис. 3. Модель пространства проектирования

Fig. 3. Projective space model

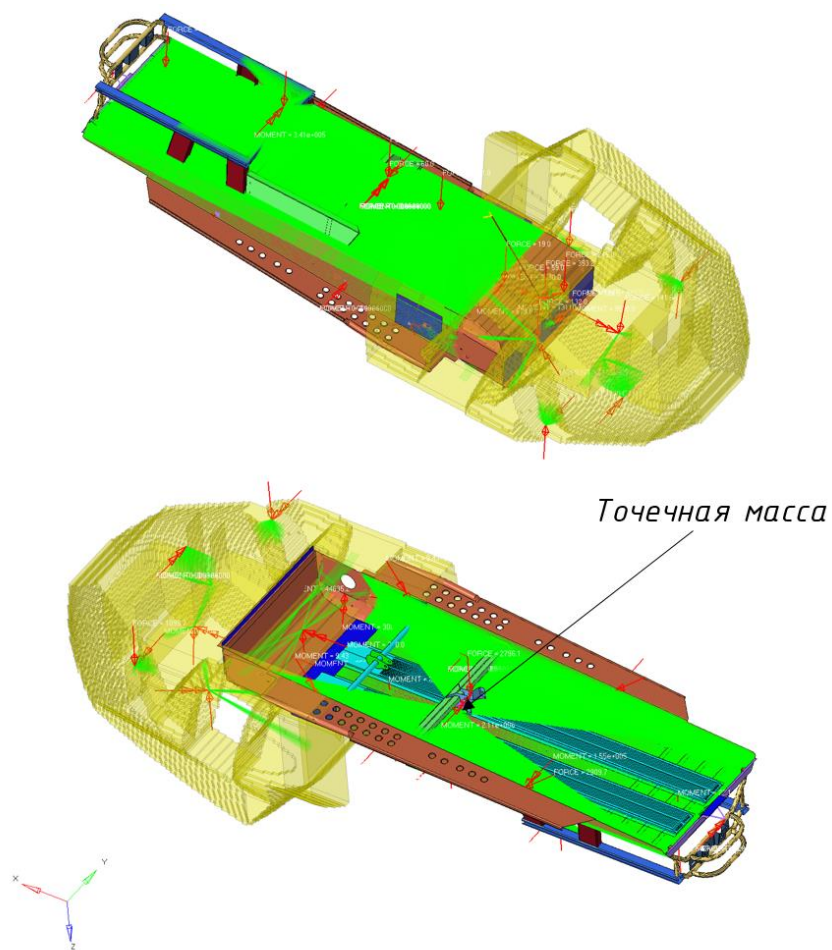


Рис. 4. КЭМ несущей системы снегохода для проведения оптимизации

Fig. 4. FEM of the snowmobile undercarriage system for conducting of optimization

Конечно-элементная модель пространства проектирования выполнена объемными восьмиузловыми конечными элементами. КЭМ тоннеля и его элементов выполнена с использованием оболочечных четырехузловых конечных элементов. Пространство проектирования передней части с КЭМ тоннеля соединено с помощью склеенного контакта. Нагрузки приложены к КЭМ пространства проектирования несущей системы снегохода через элементы типа RBE2 и RBE3. На рис. 4 показана КЭМ с нагрузками для расчетного случая «Статика: стоянка на месте с гравитацией $1g$ ». Уравновешивание модели осуществляется с использованием метода *inertia relief*. Чтобы изменение массы модели в процессе оптимизации не влияло на ее уравновешивание в процессе расчета, плотность материалов пространства проектирования вместе с элементами тоннеля заданы равными нулю, а массово-инерционные характеристики несущей системы взяты со снегохода «Тайга Патруль 551», и смоделированы в виде точечной массы, приложенной в центре масс снегохода. Инерционная нагрузка от рамы распределена при помощи элемента RBE3 на узловые точки агрегатов, водителя, пассажира и груза.

Топологическая оптимизация несущей системы и интерпретация результатов

В данном исследовании выполнена топологическая оптимизация передней части. Целевой функцией является минимум потенциальной энергии упругой деформации. В качестве ограничений выбраны: ограничение максимального относительного объема материала 0,15. Также задано условие симметрии для пространства проектирования. Хотя разработанное пространство проектирования не является симметричным, данное условие позволило исключить из рассмотрения несимметричные расчетные случаи. Под несимметричными расчетными случаями подразумеваются те, когда в «зеркальных» шарнирах левого и правого бортов действуют нагрузки различные по направлению и величине. Например, достаточно получить только нагрузки для поворота налево, а поворот направо будет учтен благодаря симметрии конструкции. Такой подход позволяет существенно сократить время на моделирование режимов в программе расчета динамики твердых тел и проведение оптимизационных расчетов.

В результате получена силовая схема, которая представлена в виде изоповерхностей равной плотности на рис. 5.

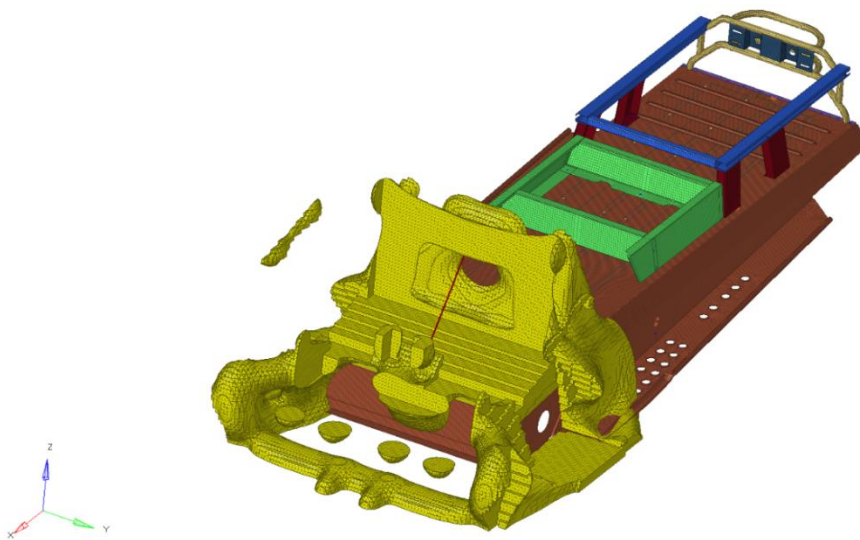


Рис. 5. Изоповерхности равной плотности

Fig. 5. Isosurfaces of equal density

Далее проведена первичная интерпретация результатов, где передняя часть снегохода смоделирована в виде балочных элементов круглого сечения (рис. 6). Было выбрано сечение 25x2 ГОСТ 18482-2018.

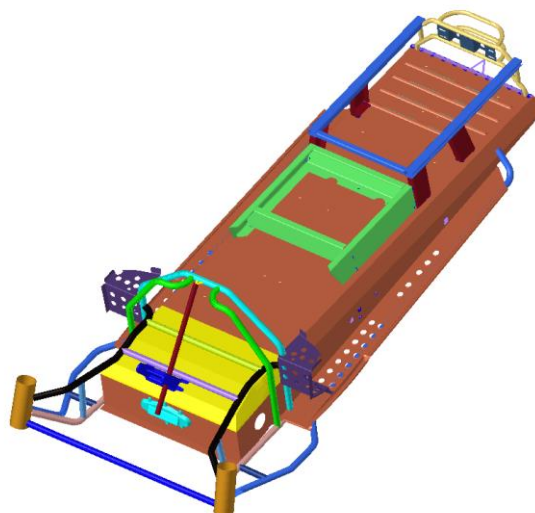


Рис. 6. Интерпретация результатов топологической оптимизации

Fig. 6. Interpretation of topological optimization results

Параметрическая оптимизация несущей системы и интерпретация результатов

Параметрическая оптимизация выполнена совместно для передней части и тоннеля снегохода. Для передней части в качестве параметров варьирования выступили геометрические характеристики сечения, а для тоннеля – толщина стенок. В качестве целевой функции выбрана минимальный объем материала, в качестве ограничений – максимальные напряжения в конструкции. Для несущей системы снегохода был выбран материал АМг6. Свойства материала представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Механические свойства материала АМг6

Table 2.

Mechanical properties of the AMg6 material

Марка сплава	Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести σ_{02} , МПа	Относительное удлинение δ , %
АМг6	315	145	15

В качестве максимальных допускаемых выбраны напряжения предела текучести σ_{02} . Из оптимизации исключены элементы в зонах переходов, стыковок балочных элементов и соединения оболочечных элементов балочными узел в узел, так как там наблюдаются локальные скачки напряжений. С учетом технологии и возможного снижения себестоимости производства несущей системы выбраны стандартные размеры профилей. Параметрическая оптимизация проведена для двух видов сечений: круглого и прямоугольного. Результаты оптимизации передней части представлены в табл. 3, 4 и 5. Схема расположения труб показана на рис. 7.

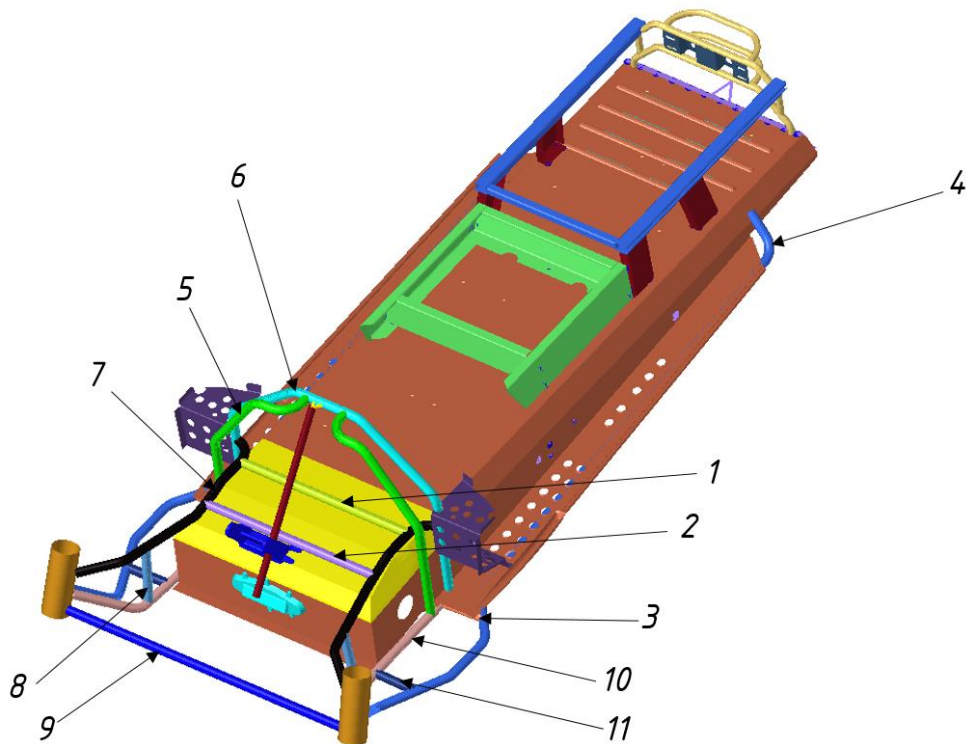


Рис. 7. Схема расположения труб

Fig. 7. Pipes layout

Параметры для труб круглого сечения

Parameters for round section pipes

Таблица 3.

Table 3.

Труба №	Диаметр D, мм	Толщина t, мм	Масса m, кг
1	23	1,5	0,14
2	22	1,5	0,14
3	24	1,5	0,07
4	26	1,5	1,37
5	23	1,5	0,41
6	25	1,5	0,44
7	45	15	5,1
8	38	10	1,0
9	35	10	1,89
10	48	15	7,32
11	29	5	0,27

Таблица 4.

Параметры для труб прямоугольного сечения

Table 4.

Parameters for rectangular section pipes

Труба №	Сторона a, мм	Сторона b, мм	Толщина t, мм	Масса m, кг
1	18	18	1	0,10
2	16	12	1	0,08
3	22	22	1,5	0,09
4	60	60	1,5	4,15
5	50	20	1,5	0,81
6	12	25	2	0,53
7	60	40	5	3,27
8	20	50	4	0,56
9	60	30	2,5	1,02
10	60	60	5	5,5
11	36	20	1,5	0,11

Таблица 5.

Сравнение каркасов труб

Table 5.

Comparison of pipe frames

Оценочные показатели	Исходное	Интерпретация
Масса трубчатого каркаса из круглой трубы, кг	5,23	18,15
Средние напряжения в силовом каркасе из круглой трубы, МПа	210	65
Максимальные напряжения в силовом каркасе из круглой трубы, МПа	458	100
Масса трубчатого каркаса из профильной трубы, кг	6,62	15,92
Средние напряжения в силовом каркасе из профильной трубы, МПа	190	70
Максимальные напряжения в силовом каркасе из профильной трубы, МПа	458	103
Масса несущей системы с трубчатым каркасом из круглой трубы, кг	35,00	47,92
Масса несущей системы с трубчатым каркасом из профильной трубы, кг	36,49	45,69

Выводы

1. Предложена методика создания несущей системы снегоходной мототехники с учетом условий эксплуатации на ранних стадиях проектирования.
2. Сформирован и представлен типовой список нагрузочных режимов для расчета максимальных нагрузок действующих на несущую систему снегохода. Список нагрузочных режимов зависит от многих параметров и уточняется для каждого конкретного транспортного средства.
3. По итогам топологической оптимизации предложена силовая схема передней части снегохода.
4. С учетом результатов топологической оптимизации проведена совместная параметрическая оптимизация передней трубчатой части и задней листовой. Рассмотрено два виде се-

чения: круглое и прямоугольное. Наименьшей массой обладает несущая система с каркасом из труб прямоугольного сечения. Выбрав в качестве основного материала несущей системы алюминиевый сплав, удалось снизить массу несущей системы на 29,7 кг, что составляет 40 % от массы несущей системы снегохода-прототипа.

5. Необходимо разработать методику выбора рациональных видов сечений для несущей системы, позволяющей снизить массу и в то же время обеспечивающей требования прочности, жесткости и долговечности.

Библиографический список

1. **Gebisa1, A.W.** A case study on topology optimized design for additive manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / A W Gebisa1 and H G Lemu1 // Volume 276, First Conference of Computational Methods in Offshore Technology (COTech2017) 30 November to 1 December 2017, Stavanger, Norway Citation A W Gebisa and H G Lemu 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 276 012026.
2. **Changizi, Navid** Topology optimization of steel frame structures with constraints on overall and individual member instabilities / Navid Changizi, Mehdi Jalalpour // Finite Elements in Analysis and Design. Volume 141, 2018, P. 119-134.
3. **Wang, Yong** Topology Optimization in the Conceptual Design: Take the Frame of a Bender as Example / Yong Wang [et al.] // Advanced Materials Research, vol. 267, Trans Tech Publications, Ltd., June 2011, pp. 297–301. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/amr.267.297.
4. Bai, You Dun Optimal Structural Design of Micro-Motion Stage with Stiffness Constraints Using Topology and Sizing Optimization Method / You Dun Bai [et al.] // Key Engineering Materials, vol. 679, Trans Tech Publications, Ltd., Feb. 2016, pp. 55-58.
5. **Song, Meng Meng** Topology Optimization and Analysis of Impact Test Platform Mechanism / Meng Meng Song [et al.] // Applied Mechanics and Materials, vol. 893, Trans Tech Publications, Ltd., July 2019, pp. 78–83. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/amm.893.78.
6. Нагружение конечно-элементных моделей несущих систем колесных машин с применением метода inertia relief и твердотельной динамической модели автомобиля. Вдовин Д.С., Левенков Я.Ю., Чичекин И.В. // Технологии и компоненты интеллектуальных транспортных систем 2018. С. 620-640
7. **Vdovin, D.S.** Light frame design for quad bike using topology optimization / D.S. Vdovin, Y.Y. Levenkov, I.V. Chichekin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019.- Vol. 589, Issue 1.- Art.no 012026
8. **Ryan, R.R.** ADAMS // In Supplement to Vehicle System Dynamics. 1993. V. 22. P. 144-152.
9. **Dempsey, Mike** High fidelity multibody vehicle dynamics models for driver-in-the-loop simulators / Mike Dempsey, Garron Fish, Juan Gabriel Delgado Beltran // Proceedings of the 11th International Modelica Conference September 21-23, 2015, Versailles, France. P 273-280.
10. **Farid, M.L.** Fundamentals of multibody dynamics: theory and applications / M.L. Farid. Birkhauser, 2006.
11. **Bremer, H.** Elastic Multibody Dynamics / H. Bremer. - Springer Science+Business Media, B.V. 2008. 13. Kong Y.S., Abdullah S., Omar M.Z., Haris S.M. Side force analysis of suspension strut under various load cases/ Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). 2016. T. 78. № 6. С. 85-90.
12. **Vdovin, D.S.** A multi-body dynamic model of the snowmobile to define acting loads in the its parts / D.S. Vdovin, Y.Y. Levenkov, I.V. Chichekin, A. Fominykh // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020. Vol. 963, Issue 1. Art.no 012011.

**Дата поступления
в редакцию: 24.11.2021**