

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 629.017:629.018+629.3.027.3

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-42-49

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА ЭЛЕМЕНТЫ КРЕПЛЕНИЯ КОЛЕС ПЕРЕДНЕЙ ОСИ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 220 ТОНН

Любимов Олег Владиславович, Закрасовский Дмитрий Иванович*,
Сафина Диана Александровна, Овсянников Михаил Олегович

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*для корреспонденции: zakrasovskydi@kuzstu.ru



Информация о статье

Поступила:

01 июня 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

25 июля 2024 г.

Принята к публикации:

29 августа 2024 г.

Опубликована:

26 сентября 2024 г.

Ключевые слова:

APM Joint, крепление колеса,
карьерный самосвал,
шпильчатое соединение

Аннотация.

Одними из высоконагруженных узлов машины, в частности и карьерного самосвала, являются элементы крепления колес. К элементам крепления относят резьбовые детали (гайки, шпильки или болты), которые используются для фиксации колес на ступице. Элементы крепления воспринимают все действующие на автомобиль вертикальные нагрузки, горизонтальные силы и моменты, которые возникают при повороте, торможении и движении, поэтому они должны обеспечивать безопасность движения машины. Отмечается, что возможность определения нагрузок на элементы крепления позволяет подобрать оптимальное количество шпилек (болтов), тем самым обеспечив безопасность движения машины. В данной статье для определения нагрузок на элементы крепления колес передней оси применяется модуль APM Joint системы WinMachine. Приведена общая характеристика сил, которая действует на колесо в процессе движения. Принят расчетный случай для прямолинейного движения с боковым углом наклона, определены и рассчитаны действующие силы на переднее колесо карьерного самосвала грузоподъемностью 220 тонн. В модуле APM Joint заданы геометрии и параметры шпильчатых соединений, размещены действующие нагрузки и указана дополнительная информация с необходимыми коэффициентами для выполнения условий по нераскрытию и сдвигу соединения. Результатами расчетов явились отчеты и карты с полученными давлениями и нагрузками. В отчете указаны максимальные нагрузка на шпильку и давление на контактную поверхность, а также требуемый момент затяжки. По карте можно определить распределение нагрузок и давлений по шпилькам и контактным поверхностям

Для цитирования: Любимов О. В., Закрасовский Д. И., Сафина Д.А., Овсянников М.О. Определение нагрузок на элементы крепления колес передней оси карьерного самосвала грузоподъемностью 220 тонн // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 4 (164). С. 42-49. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-42-49, EDN: KТAROO

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни

населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Введение

Разработка новой линейки карьерных самосвалов (КС) сопровождается большим количеством исследований и расчетов систем, узлов и компонентов машины [1-3]. Одними из высоконагруженных узлов являются элементы крепления колес [4-6].

Элементы крепления колеса КС работают в условиях нестационарного динамического режима нагружения, испытывая удары и перегрузки со стороны дороги [7].

К элементам крепления относят резьбовые детали (гайки, шпильки или болты), которые используются для фиксации колес на ступице. Если колесо бездисковое, то дополнительно в состав входят прижимы [7].

Крепление, которое не обеспечивает достаточно точную установку колеса на ступице или допускает их взаимное смещение в процессе движения, приводит к нарушению балансировки, появлению повышенных вибраций, возникновению интенсивного изнашивания и неравномерного износа шин [8 - 10]. Для жесткой фиксации колеса на ступице необходимо определить нагрузки, действующие на элементы крепления колес, и необходимый момент затяжки.

Существует широкий спектр программного обеспечения, позволяющий определять нагрузки на резьбовые соединения, которыми являются элементы крепления колес.

Одно из них – модуль APM Joint системы WinMachine, который предназначен для расчета и проектирования соединений [11].

Действующие нагрузки на колеса

В ходе эксплуатации КС на колесо воздействуют следующие нагрузки (Рис. 1):

- Продольная сила F_x , направленная горизонтально в плоскости вращения колеса. Направление силы определяется режимом работы колеса: ведущее, ведомое или тормозное.

- Боковая сила F_y , направленная горизонтально вдоль оси вращения колеса. Боковая сила является следствием действия центробежной силы, которая возникает при повороте автомобиля, и силы составляющей веса, которая возникает при боковом угле наклона автомобиля (Рис. 2).

- Нормальная сила F_z , направленная вертикально к оси вращения колеса. Нормальная сила представляет собой часть веса автомобиля с грузом, приходящегося на колесо.

- Опрокидывающий момент M_x , возникающий вследствие бокового наклона автомобиля.

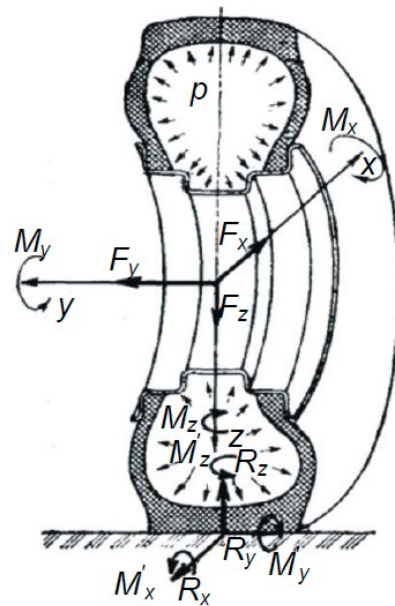


Рис. 1. Схема внешних сил, действующих на колесо
Fig. 1. Diagram of external forces acting on the wheel

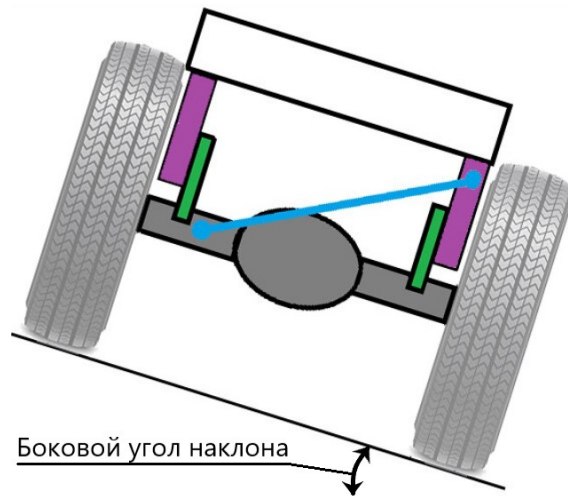


Рис. 2. Боковой наклон автомобиля
Fig. 2. Side tilt of the vehicle

- Крутящий момент M_y , определяющийся крутящим моментом, передаваемым от двигателя автомобиля к ведущему колесу через трансмиссию. В случае КС это крутящий момент, который передается от электродвигателя через редуктор-мотор колеса на колесо.

- Поворачивающий момент M_z , возникающий при повороте автомобиля в результате увода шин.

Между шиной колеса и дорогой от действия внешних сил и моментов возникают реакции дороги, которые распределяются по пятну контакта:

Таблица 1. Исходные данные для расчета
Table 1. Initial data for calculation

Параметр	Значение
Полная масса машины, кг (m)	401500
Статический радиус колеса, м (r_d)	1,577
Вылет колеса, м (L)	0,4
Боковой угол наклона, град (γ)	10

- Реакция R_x является проекцией равнодействующей сил в направлении оси X .
- Реакция R_y является проекцией равнодействующей сил в направлении оси Y .
- Реакция R_z является проекцией равнодействующей сил в направлении оси Z [12].

Определение нагрузок на элементы крепления колес передней оси карьерного

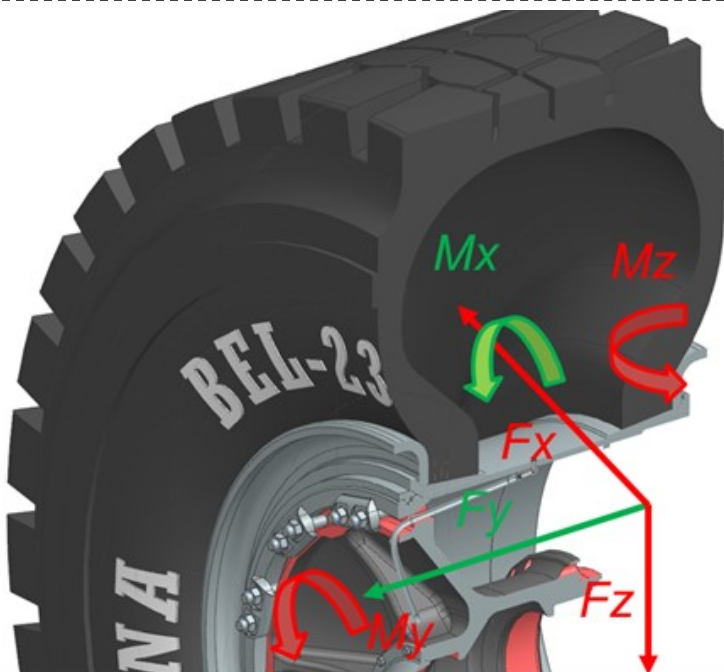


Рис. 3. 3D-модель переднего колеса
Fig. 3. 3D-model of the front wheel

самосвала грузоподъемностью 220 тонн

Согласно исследованиям [7], наиболее нагруженным режимом работы колеса считается поворот машины, где увеличение нагрузки может достигать более 100%.

Помимо нагрузок, возникающих при изменении режима движения по гладкой дороге, существуют и нагрузки, которые возникают в результате взаимодействия колес с неровностями дороги. Неровность дорожной поверхности является наиболее существенным источником динамических нагрузок на колеса машины.

Для предварительного исследования принято решение о проведении расчетного случая для прямолинейного движения КС как наименее трудоемкого с учетом бокового угла наклона в 10 градусов (максимально допустимый угол) [8-10].

На этапе эскизного проектирования при разработке беспилотного карьерного самосвала

грузоподъемностью 220 тонн [13-15] разработана 3D-модель переднего колеса (Рис. 3).

Модель включает в себя 12 прижимов и 24 шпильки.

В модели переднего колеса используется конструкция колеса без диска, поэтому шпильчатые соединения воспринимают от колес на раскрытие только реакцию силы R_y , опрокидывающий M_x и поворачивающий M_z моменты. Реакции сил R_x и R_z не влияют на условия сдвига и раскрытия, потому что данные нагрузки приходятся на поверхность ступицы. Крутящий момент M_y влияет только на условие сдвига, однако переднее колесо КС является ведомым, поэтому он отсутствует. Исходя из этого, нагрузки действуют только на раскрытие стыка деталей (в данном случае обод колеса и прижимы).

В принятом расчетном случае на шпильчатые соединения действуют только опрокидывающий момент M_x и реакция силы R_y .

Исходные данные для расчета представлены в Таблице 1 [16, 17].

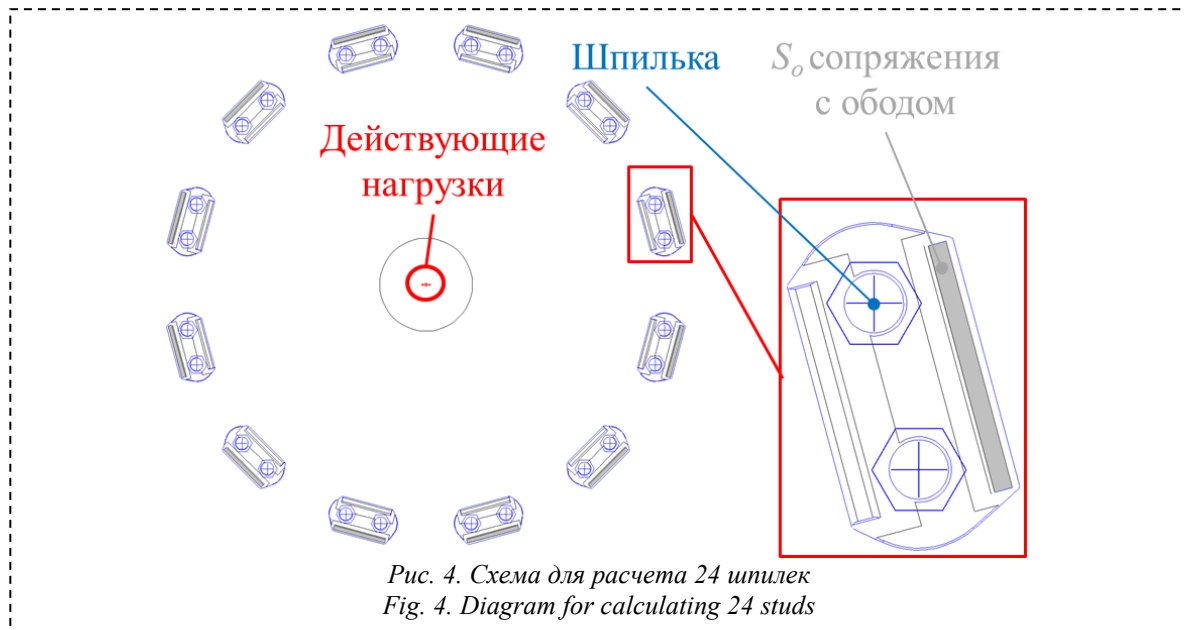
Движение КС при боковом угле наклона приводит к смещению центра тяжести машины, что приводит к неравномерному распределению нагрузок на колеса: одно из колес разгружается, другое дополнительно нагружается. Согласно исследованиям и при пренебрежении параметрами подвески коэффициент перераспределения нагрузок составляет приблизительно 1,26 [18, 19].

Сила, действующая на передние колеса при движении по горизонтальному участку [17]:

$$F_{\text{гор}} = \frac{0,33 \cdot m \cdot g}{2} = \frac{0,33 \cdot 401500 \cdot 9,8}{2} = 649226 \text{ Н.}$$

Сила, которое действует на дополнительно нагруженное колесо [17]:

$$F_{\text{гор}}^{\text{нагр}} = F_{\text{гор}} \cdot 1,26 = 649226 \cdot 1,26 = 818024 \text{ Н.}$$



Смещенная нормальная сила при боковом угле наклона в 10 градусов [17]:

$$F_z^{\text{нагр}} = R_z^{\text{нагр}} = F_{\text{гор}}^{\text{нагр}} \cdot \cos(\gamma) = 818024 \cdot 0,98 = 805597 \text{ Н.}$$

Боковая сила на дополнительно нагруженном колесе [17]:

$$F_y^{\text{нагр}} = R_y^{\text{нагр}} = F_{\text{гор}}^{\text{нагр}} \cdot \sin(\gamma) = 818024 \cdot 0,17 = 142028 \text{ Н.}$$

Опрокидывающий момент, возникающий вследствие бокового наклона автомобиля [17]:

$$M_x^{\text{нагр}} = R_z^{\text{нагр}} \cdot [r_d \cdot \sin(\gamma) + L] = 805597 \cdot [1,577 \cdot 0,17 + 0,4] = 542846 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

В модуле APM Joint была задана схема для расчета 24 шпилек (Рис. 4): размещены шпильки, указаны поверхности S_o сопряжения прижимов с ободом, размещены реакция силы $R_y^{\text{нагр}}$ и опрокидывающий момент $M_x^{\text{нагр}}$. Материал шпильки принят 40Х, резьба М30.

Для проведения расчета были указаны дополнительные данные (Рис. 5). Коэффициент запаса на нераскрытие принят как среднее значение между рекомендуемыми 2,5 и 4 при переменной нагрузке. Коэффициент запаса сдвига принят как среднее значение между рекомендуемыми 1,8 и 2 при переменных нагрузках. Коэффициент основной нагрузки (или коэффициент внешней нагрузки) принят как среднее значение от рекомендуемых 0,2 и 0,3. Коэффициенты трения приняты минимальные от рекомендуемых [20]. Остальные параметры указаны для стали 40Х.

Результатами расчета являются отчет по нагрузке (Рис. 6), а также карта давлений и нагрузок (Рис. 7), где отображены возникающие давления на контактных поверхностях и распределение нагрузок по шпилькам.

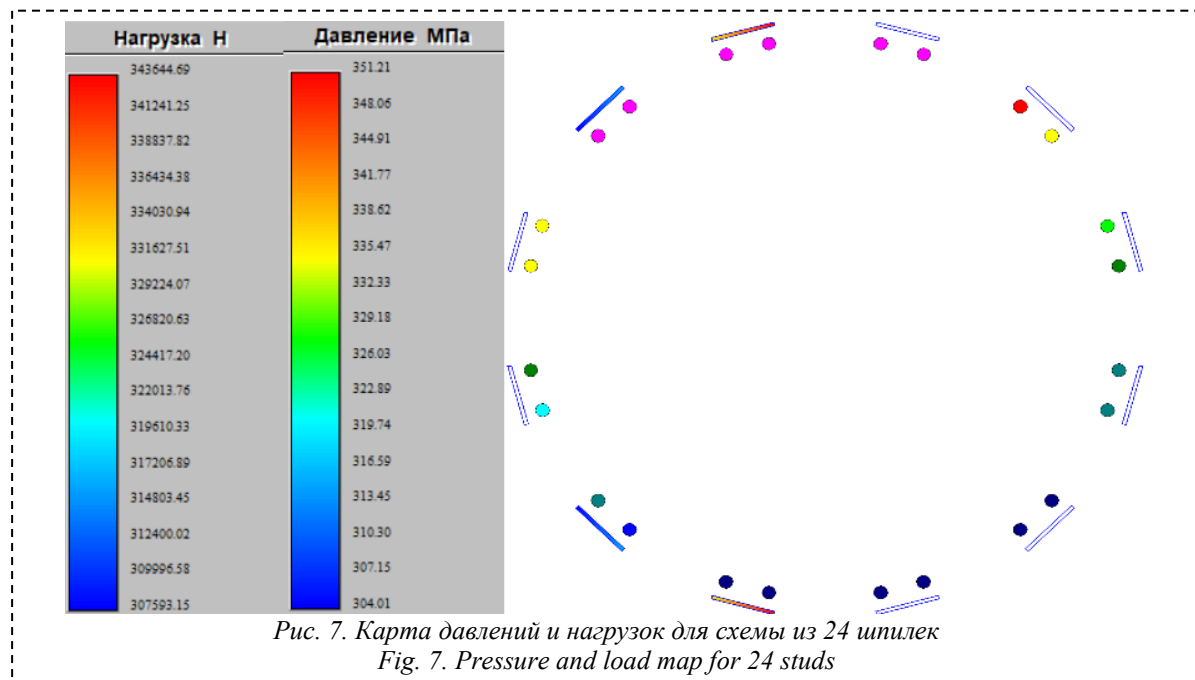
Козфициент запаса на нераскрытие	3.25
Козфициент запаса сдвига	1.9
Козфициент основной нагрузки	0.25
Козфициент запаса текучести деталей крепления	1.5
Предел текучести материала деталей крепления [МПа]	785
Козфициент трения сопряженных	0.15
Козфициент трения в резьбе и на торце	0.15
Предел прочности материала деталей крепления [МПа]	980
Количество поверхностей среза/трения	1

Рис. 5. Дополнительные данные для расчета
Fig. 5. Additional data for calculation

Нагрузка	
Сила затяжки [Н]	249338
Максимальная нагрузка на болт [Н]	343645
Максимальное давление [МПа]	351.206
Диаметр болта [мм]	30
Момент завинчивания [Нм]	1566.18
Момент трения в резьбе [Нм]	791.851
Момент трения на торце гайки [Нм]	774.333
Козфициент запаса выносливости	ndef
Козфициент запаса прочности по пределу текучести	1.28057

Рис. 6. Отчет по нагрузке для схемы из 24 шпилек

Fig. 6. Window with calculation results for 24 studs



Для выполнения условий на нераскрытие и сдвига с 24 шпильками потребуется момент затяжки – 1566 Н·м. Максимальная нагрузка на одну из шпилек составила 343645 Н. Коэффициент запаса прочности шпильки по пределу текучести под максимальной нагрузкой для материала 40Х составил 1,28, условие по прочности выполняется, но шпилька работает на пределе при ненагруженном режиме работы.

Выводы

С помощью описанного метода определены нагрузки, действующие на элементы крепления колес передней оси карьерного самосвала грузоподъемностью 220 тонн.

Для разработанной конструкции переднего колеса КС грузоподъемностью 220 т при принятом расчетном случае из выполнения условий на нераскрытие и сдвига с 24 шпильками потребуется момент затяжки – 1566 Н·м.

Максимальная нагрузка на одну из шпилек составила 343645 Н. Коэффициент запаса прочности шпильки по пределу текучести под максимальной нагрузкой для материала 40Х составил 1,28.

Целью дальнейших исследований является определение:

- влияния количества шпилек на нагрузки, действующие на них и на момент затяжки;
- определение нагрузок на элементы крепления колеса к ступице при других расчетных случаях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинкин Д. М., Аксенов В. В., Пашков Д. А. Тенденции развития беспилотных карьерных самосвалов // Уголь. 2023. № 6(1168). С. 72–79. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-72-79.
2. Воронов Ю. Е., Воронов А. Ю., Дубинкин Д.

М., Максимова О. С. Сравнительная оценка качества функционирования действующих и роботизированных экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов // Уголь. 2023. № 11(1173). С. 65–71. DOI :10.18796/0041-5790-2023-11-65-71.

3. Воронов А. Ю., Хорешок А. А., Воронов Ю. Е., Дубинкин Д. М., Воронов А. Ю. Оптимизация параметров экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов // Горная промышленность. 2022. № 5. С. 92–98. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-92-98.

4. Дубинкин Д. М., Зеляева Е. А., Аксенов В. В. Технические решения несущих систем (рам) карьерных самосвалов как объект интеллектуальной собственности // Уголь. 2024. № 5(1180). С. 47–53. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-47-53.

5. Дубинкин Д. М., Пашков Д. А. Импортонезависимость производства беспилотных карьерных самосвалов // Уголь. 2023. № 4(1166). С. 42–48. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-42-48.

6. Дубинкин Д. М., Ялышев А. В. Влияние процесса погрузки угля в грузовую платформу на коэффициент использования грузоподъемности карьерного самосвала БелАЗ-7530 (220 т) // Уголь. 2023. № S12(1175). С. 11–19. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-11-19.

7. Автотракторные колеса: Справочник / Под общ. Ред. А18 Балабина И. В. М.: Машиностроение, 1985. 272 с.

8. Дубинкин Д. М., Бокарев А. И. Разработка методики определения нагрузок на силовую структуру карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 5(169). С. 31–44. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-31-44.

9. Рахаев С. М., Газизуллин Р. Л., Карташов А. Б., Дубинкин Д. М., Зеляева Е. А. Выбор нагрузочных режимов на начальных этапах проектирования несущих систем (рам) карьерных самосвалов // Техника и технология горного дела. 2023. № 4(23). С. 41–55. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-41-55.

10. Карташов А. Б., Арутюнян Г. А., Киселев П. И., Зайцев Л. А., Попов И. П., Дубинкин Д. М., Тарасюк И. А. Синтез рациональных параметров систем

телескопической подвески и рулевого управления карьерного автосамосвала грузоподъемностью до 240 тонн // Техника и технология горного дела. 2023. № 4(23). С. 56–75. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-56-75.

11. АРМ Winmachine // АРМ URL: <https://apm.ru/> (дата обращения: 29.06.2024).

12. Острецов А. В., Красавин П. А., Воронин В. В. Шины и колеса для автомобилей и тракторов: Учебное пособие по дисциплине «Конструкция автомобиля и трактора» для студентов вузов, обучающихся по специальности 190201 (150100) «Автомобиле- и тракторостроение». М.: МГТУ «МАМИ», 2011. 85 с.

13. Сыркин И. С., Дубинкин Д. М., Садовец В. Ю. Обоснование выбора симулятора для исследования автономного управления беспилотного карьерного самосвала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2023. № 48. С. 72–97. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.04.

14. Воронов Ю. Е., Воронов А. Ю., Дубинкин Д. М., Максимова О. С. Диспетчеризация в карьерных экскаваторно-автомобильных комплексах с беспилотным транспортом // Уголь. 2023. № 9(1171). С. 75–83. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-8.

15. Хорешок А. А., Литвин О. И., Кацубин А. В., Дубинкин Д. М., Марков С. О., Тюленев М. А. К определению рациональной области применения выемочно-погрузочного оборудования // Уголь. 2023. № 3(1165). С. 91–95. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-91-

95.

16. Дубинкин Д. М., Исмаилова Ш. Я. Анализ технических характеристик карьерных самосвалов грузоподъемностью от 218 т до 255 т // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2022: Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, Кемерово, 23–24 ноября 2022 года / Редколлегия: Хорешок А. А. (отв. редактор), Фомин А. И. [и др.]. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. С. 4061–4066.

17. Кузнецов И. В. Оценка ресурса металлоконструкций задних мостов автосамосвалов при эксплуатации на разрезах Кузбасса: специальность 05.05.06 «Горные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузнецов Илья Витальевич, 2015. 138 с.

18. Маркина А. А., Давыдова В. В. Теория движения колесных машин: учебное пособие. М-во науки и высш. образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 216 с.

19. Демьянушко И. В., Логинов Е. М., Миронова В. В. Расчет и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния автомобильных колес на статическую нагрузку: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2014. 48 с.

20. Иванов М. Н., Финогенов В. А. Детали машин: Учебник для машиностроительных специальностей вузов. 12-е изд. испр. М.: Высш. шк., 2008. 408 с.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Любимов Олег Владиславович – кандидат технических наук, доцент, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; e-mail: lubimovov@kuzstu.ru

Закрасовский Дмитрий Иванович – младший научный сотрудник, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; e-mail: zakrasovskydi@kuzstu.ru

Сафина Диана Александровна – младший научный сотрудник, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

Овсянников Михаил Олегович – техник, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

Заявленный вклад авторов:

Любимов Олег Владиславович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Закрасовский Дмитрий Иванович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Сафина Диана Александровна – анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Овсянников Михаил Олегович – анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DETERMINATION OF LOADS ON THE FASTENING ELEMENTS OF THE FRONT AXLE WHEELS OF A QUARRY DUMP TRUCK WITH A LIFTING CAPACITY OF 220 TONS

Oleg V. Lyubimov, Dmitry I. Zakrasovsky

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*for correspondence: zakrasovskydi@kuzstu.ru



Article info

Received:

01 June 2024

Accepted for publication:

25 July 2024

Accepted:

29 August 2024

Published:

26 September 2024

Keywords: APM Joint, wheel mount, dump truck, stud joint.

Abstract.

One of the highly loaded units of the machine, in particular, and the quarry dump truck are the wheel fastening elements. The fastening elements include threaded parts (nuts, studs or bolts), which are used to fix the wheels on the hub. The fastening elements perceive all vertical loads acting on the car, horizontal forces and moments that occur during turning, braking and movement, so they must ensure the safety of the machine. It is noted that the ability to determine the loads on the fastening elements allows you to select the optimal number of studs (bolts), thereby ensuring the safety of the machine. In this article, the APM Joint module of the WinMachine system is used to determine the loads on the fastening elements of the front axle wheels. A general characteristic of the forces that act on the wheel during movement is given. A calculation case for rectilinear movement with a lateral angle of inclination is adopted, the forces acting on the front wheel of a quarry dump truck with a lifting capacity of 220 tons are determined and calculated. In the APM Joint module, the geometry and parameters of stud connections are specified, the acting loads are placed, and additional information with the necessary coefficients for meeting the conditions for non-opening and shear of the connection is indicated. The calculation results are reports and maps with the obtained pressures and loads. The report indicates the maximum load on the stud and the pressure on the contact surface, as well as the required tightening torque. The map can be used to determine the distribution of loads and pressures on the studs and contact surface

For citation: Lyubimov O. V., Zakrasovsky D.I., Safina D.A., Ovsyannikov M.O. Determination of loads on the fastening elements of the front axle wheels of a quarry dump truck with a lifting capacity of 220 tons. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 4(164):42-49. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-42-49, EDN: KTAROO

Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement № 075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle «Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life» (the «Clean Coal – Green Kuzbass» Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project «Development and creation of an unmanned shuttle-type mining dump truck with a payload of 220 tons» in terms of research, development and experimental-design work.

REFERENCES

1. Dubinkin D.M., Aksenov V.V., Pashkov D.A. Development trends of unmanned quarry dump trucks. *Coal*. 2023; 6(1168):72–79. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-72-79.
2. Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M., Maksimova O.S. Comparative assessment of the performance quality of existing and robotic excavator-automobile complexes of open pit mines. *Coal*. 2023; 11(1173):65–71. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-65-71.
3. Voronov A.Yu., Khoreshok A.A., Voronov Yu.E., Dubinkin D.M., Voronov A.Yu. Optimization of parameters of excavator-truck complexes of open pit mines. *Mining industry*. 2022; 5:92–98. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-92-98.
4. Dubinkin D.M., Zelyaeva E.A., Aksenov V.V. Technical solutions for load-bearing systems (frames) of quarry dump trucks as an object of intellectual property. *Coal*. 2024; 5(1180):47–53. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-47-53.
5. Dubinkin D.M., Pashkov D.A. Import independence of production of unmanned mining trucks. *Coal*. 2023; 4(1166):42–48. DOI: 10.18796 / 0041-5790-2023-4-42-48.

6. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. Influence of the process of loading coal into a cargo platform on the coefficient of utilization of the carrying capacity of the BelAZ-7530 mining dump truck (220 tons). *Coal*. 2023; S12(1175):11–19. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-11-19.

7. Automotive and tractor wheels: Handbook / Under the general editorship of A18 Balabina I.V. M.: Mashinostroenie; 1985. 272 p.

8. Dubinkin D.M., Bokarev A.I. Development of a methodology for determining the loads on the power structure of quarry dump trucks. *Mining equipment and electromechanics*. 2023; 5(169):31–44. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-31-44.

9. Rakhaev S.M., Gazizullin R.L., Kartashov A.B., Dubinkin D.M., Zelyaeva E.A. Selection of load modes at the initial stages of designing load-bearing systems (frames) of quarry dump trucks. *Mining equipment and technology*. 2023; 4(23):41–55. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-41-55.

10. Kartashov A.B., Arutyunyan G.A., Kiselev P.I., Zaitsev L.A., Popov I.P., Dubinkin D.M., Tarasyuk I.A. Synthesis of rational parameters of telescopic suspension and steering systems for a mining dump truck with a lifting capacity of up to 240 tons. *Engineering and technology of mining*. 2023; 4(23):56–75. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-56-75.

11. APM Winmachine. APM URL: <https://apm.ru/> (date accessed: 29.06.2024).

12. Ostretsov A.V., Krasavin P.A., Voronin V.V. Tires and wheels for cars and tractors: A tutorial on the subject "Car and tractor design" for university students studying in the specialty 190201 (150100) "Car and tractor engineering". M.: MSTU "MAMI": 2011. 85 p.

13. Syrkin I.S., Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu. Justification for the choice of a simulator for studying the autonomous control of an unmanned quarry dump truck. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2023; 48:72–97. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.04.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Oleg V. Lyubimov – C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Kemerovo, Russian Federation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; e-mail: lyubimovov@kuzstu.ru

Dmitry I. Zakrasovsky – Junior Researcher, Kemerovo, Russian Federation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; e-mail: zakrasovskydi@kuzstu.ru.

Diana A. Safina – Junior Researcher, Kemerovo, Russian Federation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University;

Mikhail O. Ovsyannikov – Techniques, Kemerovo, Russian Federation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University;

Contribution of the authors:

Oleg V. Lyubimov – statement of research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarizing, writing, review of current literature, data collection.

Dmitry I. Zakrasovsky – statement of research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarizing, writing, review of current literature, data collection.

Diana A. Safina – data analysis, summarizing, writing, review of current literature, data collection.

Mikhail O. Ovsyannikov – data analysis, summarizing, writing, review of current literature, data collection.

14. Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M., Maksimova O.S. Dispatching in quarry excavator-truck complexes with unmanned transport. *Coal*. 2023; 9(1171):75–83. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-8.

15. Khoreshok A.A., Litvin O.I., Katsubin A.V., Dubinkin D.M., Markov S.O., Tyulenev M.A. On the definition of a rational area of application of mining and loading equipment. *Coal*. 2023; 3(1165):91–95. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-91-95.

16. Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ya. Analysis of technical characteristics of quarry dump trucks with a carrying capacity from 218 tons to 255 tons. *Natural and intellectual resources of Siberia. Sibresurs 2022: Collection of materials from the XIX International scientific and practical conference*. Kemerovo, November 23-24, 2022 / Editorial board: Khoreshok A.A. (editor-in-chief), A. I. Fomin [et al.]. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbacheva; 2022. P. 4061–4066.

17. Kuznetsov I.V. Evaluation of the resource of metal structures of the rear axles of dump trucks during operation in open pits of Kuzbass: specialty 05.05.06 "Mining machines": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Kuznetsov Ilya Vitalievich, 2015. 138 p.

18. Markina A.A., Davydova V.V. Theory of motion of wheeled vehicles: a textbook. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Yekaterinburg: Publishing house of the Ural. University; 2021. 216 p.

19. Calculation and experimental study of the stress-strain state of automobile wheels under static load: textbook / Demyanushko I.V., Loginov E.M., Mironova V.V. M.: MADI; 2014. 48 p.

20. Ivanov M.N., Finogenov V.A. Machine parts: Textbook for mechanical engineering specialties of universities. 12th ed. corrected. M.: Higher. School; 2008. 408 p.



All authors have read and approved the final manuscript.