Проходимость гусеничной машины по пересеченной местности

Леонов В. А.¹, Хазин М. Л.^{2*}

¹ Екатеринбургский завод специализированных машин «Континент», г. Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: khasin@ursmu.ru

Реферат

Цель работы. Определение условий и параметров преодоления гусеничной машиной каменных россыпей и отдельных глыб (валунов).

Методология проведения исследований. При определении условий и параметров использовались методы теоретической механики и математического анализа.

Результаты. Особенностью современного периода является постепенное усложнение горно-геологических условий месторождений и смещение горных работ в удаленные северные районы. Дорожные, климатические и природные условия арктических и северных территорий значительно отличаются от других регионов. Преобладающим рельефом является холмисто-грядовая озерно-болотистая местность. Каменные россыпи, болота, вечная мерзлота, заболоченные лощины, глубокие овраги затрудняют движение транспорта. Все это делает арктические и северные территории достаточно труднодоступными для ведения геологоразведочных работ. К геологоразведочной технике предъявляются особые технические требования: обеспечение высокой проходимости по слабонесущим грунтам (снего-, болотоходность); возможность преодоления каменных россыпей, высокие тягово-сцепные свойства с учетом максимально возможного соблюдения экологических норм и т. д. Условия подъема и опрокидывания выводятся из геометрических соотношений, а условие скольжения – из статики.

Выводы. Создана математическая модель, позволяющая описать перемещение гусеничной машины по пересеченной местности и, при известных конструктивных параметрах машины, определить предельно возможную высоту преодолеваемого препятствия.

Ключевые слова: горные работы; геологоразведочная техника; гусеницы; препятствие; валуны; угол наклона.

Введение. В последние десятилетия область действия горнодобывающей промышленности расширилась во всем мире. Особенностью современного периода является постепенное усложнение горно-геологических условий месторождений и смещение горных работ в удаленные северные районы [1, 2]. К районам Крайнего Севера и приравненным к ним местностям полностью отнесены 16 и часть территорий 11 субъектов Российской Федерации, которые занимают почти две трети территории России, т. е. 11 млн квадратных километров.

Дорожные, климатические и природные условия арктических и северных территорий значительно отличаются от других регионов России суровым климатом и низкой плотностью дорожной сети. Преобладающим рельефом материковой части является холмисто-грядовая озерно-болотистая местность. Каменные россыпи, вечная мерзлота, заболоченные лощины, болота, глубокие овраги затрудняют движение транспорта [3]. Все это делает арктические и северные территории достаточно труднодоступными для ведения геологоразведочных работ.

Воздействие изменения климата также играет свою роль в создании новых возможностей для горнодобывающих отраслей. Обширные новые районы суши становятся более доступными в течение более длительных периодов времени в течение года, тем самым продлевается сезон работы и разведки на несколько недель. Северные территории, которые ранее были недоступны или где эксплуатационные расходы были слишком высоки, чтобы оправдать развитие, теперь становятся экономически выгодными [4].

К геологоразведочной технике предъявляются особые технические требования: обеспечение высокой проходимости по слабонесущим грунтам (снего-, болотоходность); возможность преодоления каменных россыпей. Поэтому для освоения северных территорий России необходимы специальные транспортные машины повышенной проходимости.

Анализ функциональных задач геологоразведочных партий в арктических и северных территориях показал, что наиболее целесообразной техникой является гусеничный снегоболотоход на едином базовом шасси [5]. Этот класс транспортных средств обеспечивает большую устойчивость благодаря лучшему распределению нагрузки на неровной и пересеченной местности, а также имеет большую площадь контакта с землей, что позволяет более равномерно распределять свой вес по почве. Это особенно полезно при выполнении задач геологоразведочных партий в условиях бездорожья по грунтам с низкой несущей способностью и местности с неровным рельефом.

Сегодня вездеход – основное транспортное средство в труднодоступных и сложных по рельефу районах. Отечественные и зарубежные фирмы производят широкий типоразмерный ряд специализированных транспортных средств повышенной проходимости различной конструкции, параметров и назначения. Это, например, Nasu (Тролль) (производитель: Sisu Auto, Финляндия–Россия), Hägglunds (Лось) (производитель: Hägglund & Söner AB, Швеция), Shredder (производитель: BPG Werks, США), ДТ «ВИТЯЗЬ» (производитель: Машиностроительная компания «Витязь», ОАО), ЗЗГТ (ГАЗ) «Алеут», «Бобр», «Ирбис» (производитель: Заволжский завод гусеничных тягачей, ОАО), ГТТ (производитель: Семипалатинский машиностроительный завод, ОАО (Семмаш)), ЗВМ «Узола», «Ухтыш», «Унжа» (производитель: Завод вездеходных машин, ЗАО, Россия, Нижний Новгород) и многие др.

Каждая из многочисленных моделей имеет свои конструктивные особенности, функциональные возможности, эксплуатационные характеристики, соотношение цена–качество. Многие из этих машин предназначены для выполнения транспортных задач, некоторые плохо приспособлены для выполнения технологических задач в экстремальных условиях. Наиболее полно сложным условиям эксплуатации отвечает продукция ООО «Екатеринбургский завод специализированных машин «Континент» (ООО «ЕЗСМ «Континент»), которая полностью соответствует требованиям ТУ 4727-008-81765049-2011 «Транспортер снегоболотоходный четырехгусеничный многоцелевого назначения и его модификации».

Эти машины чрезвычайно востребованы в нефтегазовой отрасли и выгодно отличаются от аналогов большой надежностью, неприхотливостью в обслуживании, универсальностью и ценой. Вездеход имеет эффективную грузоподъемность в 10 т при собственной массе 14 150 кг и лучшую в классе весовую отдачу – 71 %. Транспортёры снегоболотоходные четырехгусеничные многоцелевого назначения ТС и ТСК предназначены для перевозки грузов и/или людей в сложных дорожно-климатических условиях снежного бездорожья, переувлажненной или заболоченной местности. Данные машины рассчитаны на эксплуатацию при температурах окружающего воздуха в диапазоне от –45 °С до +50 °С и грузоподъ-

емность 10 т, при этом на несущую раму можно установить практически любое оборудование (рис. 1) [6, 7]. В связи с этим одним из основных эксплуатационных свойств данных машин является устойчивость, которая характеризует способность машины работать в условиях бездорожья на продольных и поперечных уклонах без опрокидывания. Это эксплуатационное свойство обеспечивает эффективность использования машины, безопасность движения и связанную с ней безопасность машиниста, пассажиров и груза.

Однако из-за недостаточной проходимости транспортное средство может попасть в ловушку при перемещении по пересеченной местности [8, 9]. Это может привести к провалу экспедиции, а в худшем случае – к потере транспортного средства. Чтобы повысить вероятность успеха геологоразведки, очень важно оценить проходимость гусеничной машины по пересеченной местности на основе объективных показателей.

Рис. 1. ТС-1 с КМУ бурения УРБ-2А
Fig. 1. Flow chart 1 with URB-2A drilling rig

При движении машины передним ходом на подъем опрокидывание наступает, когда передние опорные катки полностью разгружаются. Данная ситуация определяется координатами центра тяжести машины и расстоянием между осями гусениц. При нарушении продольной устойчивости машина может опрокинуться относительно оси передних или задних колес (катков), а также скользить в продольном направлении.

Цель работы. Определение условий и параметров преодоления гусеничной машиной пересеченной местности, каменных россыпей и отдельных глыб (валунов).

Методика проведения исследований. При определении условий и параметров использовались методы теоретической механики и математического анализа.

Результаты. В летний период покрытие земли арктических и северных территорий России представляет собой гальку с часто встречающимися скоплениями отдельных каменных глыб и валунов, что значительно затрудняет передвижение транспорта вне дорог. При преодолении каменных россыпей наиболее сложным из препятствий является отдельная глыба или валун, которые можно рассмотреть как вертикальное препятствие. Преодоление препятствий колесным транспортом

рассмотрено в работах [10, 11]. Для гусеничного транспорта подобная задача при преодолении различных лесных препятствий (упавшие стволы деревьев, пни, ветки) была рассмотрена в работах [12, 13] при условии, что радиус катка гусеницы равен нулю.

Рассмотрим препятствие, которое может преодолеть гусеничная машина при условии, что отсутствует прогиб гусеницы внутрь ее контура (рис. 2).

Рис. 2. Схема преодоления препятствия гусеничной машиной:

G – вес машины; x, y – координаты центра тяжести гусеничной машины; C – центр тяжести гусеничной машины; N_1, N_2 – силы реакции опоры; μ – коэффициент трения; h – высота препятствия; α – угол между трассой и горизонтальной поверхностью

Fig. 2. Scheme of obstacle crossing by a tracked vehicle:
 G – vehicle weight; x, y – the coordinates of the tracked vehicle's center of gravity; C – tracked vehicle's center of gravity; N_1, N_2 – support reaction force; μ – drag coefficient; h – obstacle height; α – the angle between the track and the level

Учитывая баланс сил в горизонтальном и вертикальном направлениях, можно записать:

$$\sum X: \mu N_1 + \mu N_2 \cos \alpha = N_2 \sin \alpha; \quad (1)$$

$$\sum Y: N_1 + N_2 \cos \alpha + \mu N_2 \sin \alpha = G. \quad (2)$$

Гусеничная машина преодолет препятствие, если сумма моментов сил, направленных по часовой стрелке относительно точки A , будет больше суммы моментов сил, направленных против часовой стрелки, т. е.

$$N_1 OM \geq \mu N_1 h.$$

Заменяя величину отрезка OM известными параметрами, получим:

$$N_1 (x \cos \alpha - y \sin \alpha) \mu N_1 h.$$

Отсюда можно найти высоту преодолеваемого препятствия

$$h = \frac{1}{\mu} (x \cos \alpha - y \sin \alpha). \quad (3)$$

С другой стороны, высоту преодолеваемого препятствия можно вывести из геометрических условий. Преодоление препятствия возможно, когда нормаль веса машины пройдет через край препятствия (рис. 2), что удовлетворяет условию

$$KA + AB \leq x. \quad (4)$$

Перепишем уравнение (4), заменив величины отрезков координатами центра тяжести машины и высотой препятствия:

$$\frac{h}{\sin \alpha} - \frac{R(1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha} + (y + R)\operatorname{tg} \alpha = x,$$

где R – радиус катка гусеницы.

Тогда высота препятствия:

$$h = x \sin \alpha + R(1 - \cos \alpha) - (y + R) \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

В процессе преодоления препятствия угол наклона машины α будет увеличиваться. Величина предельного угла наклона гусеничной машины ограничивается наступлением момента ее опрокидывания и определяет допустимую высоту преодолеваемого препятствия. Для определения допустимой высоты преодолеваемого препятствия продифференцируем уравнение (5) по α , а производную приравняем нулю:

$$\frac{dh}{d\alpha} = x \cos \alpha + R \sin \alpha - (y + R) \sin \alpha \left(1 + \frac{1}{\cos^2 \alpha} \right) = 0. \quad (6)$$

Умножив обе части уравнения (6) на $1/\cos \alpha$ и выразив квадрат косинуса угла через тангенс, получим

$$x + R \operatorname{tg} \alpha - (y + R) \operatorname{tg} \alpha (2 + \operatorname{tg}^2 \alpha) = 0.$$

После приведения подобных уравнение принимает вид:

$$(R + y) \operatorname{tg}^3 \alpha + (2y + R) \operatorname{tg} \alpha - x = 0. \quad (7)$$

Полагая в простейшем случае радиус ведущей звездочки равным нулю ($R = 0$) и умножив обе части уравнения (7) на $1/y$, получим

$$\operatorname{tg}^3 \alpha + 2 \operatorname{tg} \alpha - k = 0,$$

где $k = x/y$ – приведенная координата центра тяжести машины.

Данное кубическое уравнение имеет следующее решение:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt[3]{0,5k + Q} + \sqrt[3]{0,5k - Q}, \quad (8)$$

где $Q = \sqrt{0,25k^2 + 0,3}$.

Из уравнения (8) можно, в простейшем случае, определить предельный угол наклона гусеничной машины при преодолении препятствия:

$$\alpha = \arctg \alpha = \arctg \left(\sqrt[3]{0,5k + Q} + \sqrt[3]{0,5k - Q} \right). \quad (9)$$

Подставив в уравнение (9) значения конструктивных параметров для ТС-1 с КМУ бурения УРБ-2А, выпускаемой ООО «Екатеринбургский завод специализированных машин «Континент» ($k = 1,36$), получаем величину угла $\alpha = 30^\circ 10'$. Таким образом, величина предельного угла для ТС-1 с КМУ бурения УРБ-2А составляет 30° .

Наибольшая высота препятствия, которое может преодолеть транспортное средство – это максимальное значение h , полученное из уравнения (5) при условии $0 < \alpha < 90^\circ$, что удовлетворяет уравнениям (1), (2) и (3). Подставив значения предельного угла наклона гусеничной машины в уравнение (5), найдем допустимую высоту препятствия, которое гусеничная машина сможет преодолеть.

Выводы. Создана математическая модель, позволяющая описать перемещение гусеничной машины по пересеченной местности и, при известных конструктивных параметрах машины, определить предельно возможную высоту преодолеваемого препятствия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Heikkinen H. I., Lépy É., Sarkki S., Komu T. Challenges in acquiring a social licence to mine in the globalising Arctic // *Polar Record*. 2016. Vol. 52. No. 4. P. 399–411. doi.org/10.1017/S0032247413000843
2. Кузнецов Д. В., Одаев Д. Г., Линьков Я. Е. Особенности выбора технологического автотранспорта для разработки глубоких карьеров Севера // ГИАБ. 2017. № 5. С. 54–65.
3. Андреева Л. Н. Ледниковый генезис валунных суглинков на севере большеземельской тундры // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 1. С. 3–11. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-1-3-11
4. Tiainen H., Sairinen R., Sidorenko O. Governance of sustainable mining in Arctic countries: Finland, Sweden, Greenland & Russia // *Arctic Yearbook* 2015. 2015. P. 132–158.
5. Тарасов П. И., Зырянов И. В., Хазин М. Л. Новые специализированные виды транспортных средств для Арктики // ГИАБ. 2018. № 3. С. 136–147.
6. Кушляев В. Ф., Гомонай М. В., Аграновский А. А., Леонов В. А. Гусеничные пожарные, аварийно-спасательные и транспортно-технологические машины для Крайнего Севера // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2017. № 3(13). С. 7–21.
7. Кушляев В. Ф., Аграновский А. А., Леонов В. А. Разработка гусеничной аварийно-спасательной машины повышенной проходимости для условий Арктики // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 4-1(15-1). С. 71–76. DOI: 10.12737/13891
8. Sojka M., Čorňák Š. Mathematical model of suspension of tracked vehicles // 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). IEEE, 2017. P. 111–114. DOI: 10.1109 / MILTECHS.2017.7988741
9. Yajima R., Nagatani K. Investigation of the tip-over condition and motion strategy for a tracked vehicle with sub-tracks climbing over an obstacle on a slope // 2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). IEEE, 2018. P. 1–6.
10. Berkemeier M. D., Poulson E., Groethe T. Elementary mechanical analysis of obstacle crossing for wheeled vehicles // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2008. P. 2319–2324. DOI 10.1109/ROBOT.2008.4543560
11. Hao W., Xu X., Xu H., Zhou F. Enhancing the obstacle-crossing performance of all-terrain vehicle based on variable-wheelbase chassis // 2019 IEEE / ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2019. P. 1329–1334.
12. Холопов В. Н., Лабзин В. А. Параметры взаимодействия гусеничной машины с препятствием // Вестник КрасГАУ. 2015. № 3. С. 44–49.
13. Балакин П. Д., Кузнецов Э. А., Прозоров П. А. Моделирование ударного взаимодействия опорного катка движителя многоцелевой гусеничной машины с единичным дорожным препятствием // Омский научный вестник. 2009. № 3(83). С. 68–72.

Поступила в редакцию 17 сентября 2020 года

Сведения об авторах:

Леонов Василий Александрович – инженер Екатеринбургского завода специализированных машин «Континент». E-mail: vl@ezsm66.ru

Хазин Марк Леонтьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры эксплуатации горного оборудования Уральского государственного горного университета. E-mail: khasin@ursmu.ru

Cross-country ability of tracked vehicles

Vasilii A. Leonov¹, Mark L. Khazin²

¹ Special Use Vehicles Plant EZSM Continent, Ekaterinburg, Russia.

² Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aims to determine conditions and parameters under which the tracked vehicle overcomes stone fields and separate blocks (boulders).

Research methodology included the methods of analytical mechanics and mathematical analysis.

Results. Mining and geological conditions of deposits gradually get more complicated, while mining moves to remote northern regions, which is a characteristic feature of the Holocene epoch. Road, weather, and natural conditions in arctic and northern territories differ markedly from other regions. Ridges, mounds, lake plains, and marshland are the predominant landscape. Stone fields, marshes, permafrost, marshy hollows, and deep ravines impede the traffic. Due to these factors it is particularly difficult to access and explore in arctic and northern territories. There are particular technical specifications for the exploration equipment, namely, increased cross-country ability for weak soil (snow and swamp), ability to overcome stone fields, increased haulage and towing capacity with the account of maximum possible environmental regulatory compliance, etc. The conditions of ascent and overturning are derived from geometry, while the sliding condition is derived from statics.

Summary. A mathematical model has been created, which makes it possible to describe the tracked vehicle's travel across the uneven ground and, under known design values of the vehicle, determine the limitary obstacle clearance.

Key words: mining; exploration equipment; track; obstacle; boulders; angle of inclination.

REFERENCES

1. Heikkinen H. I., Lépy É., Sarkki S., Komu T. Challenges in acquiring a social licence to mine in the globalising Arctic. *Polar Record*. 2016; 52 (4): 399–411. Available from: doi.org/10.1017/S0032247413000843.
2. Kuznetsov D. V., Odaev D. G., Linkov Ia. E. Peculiarities of technological motor transport selection used for deep north open pits operation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 5: 54–65. (In Russ.)
3. Andreicheva L. N. Glacial genesis of boulder loam in the north of the bolshezemelskaya tundra. *Vestnik IG Komi NTs UrO RAN = Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*. 2018; 1: 3–11. Available from: DOI: 10.19110/2221-1381-2018-1-3-11. (In Russ.)
4. Tiainen H., Sairinen R., Sidorenko O. Governance of sustainable mining in Arctic countries: Finland, Sweden, Greenland & Russia. *Arctic Yearbook 2015*. 2015. P. 132–158.
5. Tarasov P. I., Zyrianov I. V., Khazin M. L. New special-purpose transport for the Arctic. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 3: 136–147. (In Russ.)
6. Kushliaev V. F., Gomoni M. V., Agranovskii A. A., Leonov V. A. Tracked firefighters, rescue and transport technological machines for the far north. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura = Automobile. Road. Infrastructure*. 2017; 3(13): 7–21. (In Russ.)
7. Kushliaev V. F., Agranovskii A. A., Leonov V. A. Development of crawler wrecking machine terrain to arctic conditions. In: *Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice*. 2015; 3 (4-1(15-1)): 71–76. Available from: DOI: 10.12737/13891. (In Russ.)
8. Sojka M., Corňák Š. Mathematical model of suspension of tracked vehicles. In: *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. IEEE; 2017. P. 111–114. Available from: DOI: 10.1109/MILTECHS.2017.7988741.
9. Yajima R., Nagatani K. Investigation of the tip-over condition and motion strategy for a tracked vehicle with sub-tracks climbing over an obstacle on a slope. In: *2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. IEEE; 2018. P. 1–6.
10. Berkemeier M. D., Poulson E., Groethe T. Elementary mechanical analysis of obstacle crossing for wheeled vehicles. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE; 2008. P. 2319–2324. Available from: DOI 10.1109/ROBOT.2008.4543560.
11. Hao W., Xu X., Xu H., Zhou F. Enhancing the obstacle-crossing performance of all-terrain vehicle based on variable-wheelbase chassis. In: *2019 IEEE / ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. IEEE, 2019. P. 1329–1334.
12. Kholopov V. N., Labzin V. A. Interaction parameters of the caterpillar vehicle with the obstacle. *Vestnik KrasGAU = Bulletin of KSAU*. 2015; 3: 44–49. (In Russ.)
13. Balakin P. D., Kuznetsov E. A., Prozorov P. A. Modeling of percussion interaction of a track roller of multitask caterpillar vehicle with a single road obstacle. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2009; 3(83): 68–72. (In Russ.)

Information about authors:

Vasilii A. Leonov – engineer, Special Use Vehicles Plant EZSM Continent. E-mail: vl@ezsm66.ru

Mark L. Khazin – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining Machinery Operation, Ural State Mining University. E-mail: khasin@ursmu.ru

Для цитирования: Леонов В. А., Хазин М. Л. Проходимость гусеничной машины по пересеченной местности // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 107–114. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-107-114

For citation: Leonov V. A., Khazin M. L. Cross-country ability of tracked vehicles. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 107–114 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-107-114