

УДК 621.3.027.542.3

**Ю. А. Ким<sup>1</sup>, М. Т. Насковец<sup>2</sup>, Б. В. Войтеховский<sup>2</sup>, Д. Д. Сивицкая<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет**О ПОВЫШЕНИИ ПРОХОДИМОСТИ ВНЕДОРОЖНОГО КОЛЕСНОГО  
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Проблема повышения проходимости внедорожных транспортных средств и сельскохозяйственных машин не теряет своей актуальности в настоящее время. Более того увеличение производительности и энергонасыщенности лесных и сельскохозяйственных машин приводит к увеличению их массы, а следовательно, обостряет проблему. Причем вопрос повышения проходимости лесных машин решается как за счет упрочнения дорожного покрытия (увеличение числа слоев дорожного покрытия, внедрение подстилающих материалов и др.), так и путем совершенствования движителей.

В статье рассмотрены наиболее приемлемые, эффективные и относительно легкодоступные пути повышения проходимости транспортных средств, оснащенных крупногабаритными шинами. К числу наиболее часто используемых решений проблемы повышения проходимости и энергосберегающих качеств колесных транспортных средств является сдваивание колес, что приводит к ухудшению оборачиваемости машины, либо использование крупногабаритных арочных шин и пневмокатов, что удорожает конструкцию. Наиболее эффективным способом повышения проходимости является регулирование давления воздуха в шинах в зависимости от условий эксплуатации.

Приводятся результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния почво-грунтового массива при различных значениях нагрузки на колесо, свойств опорной поверхности и величин давления воздуха в шине. Разработаны конкретные рекомендации относительно оптимальных значений давления воздуха в шинах колес в зависимости от условий эксплуатации, что в общем случае позволяет уменьшить глубину колеи в среднем на 15–20% в зависимости от механических свойств грунта.

**Ключевые слова:** проходимость, накачка шин, давление воздуха, уплотнение соединений, герметичность, затраты энергии.

**Для цитирования:** Ким Ю. А., Насковец М. Т., Войтеховский Б. В., Сивицкая Д. Д. О повышении проходимости внедорожного колесного транспортного средства // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 98–103. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-10.

**Yu. A. Kim<sup>1</sup>, M. T. Naskovets<sup>2</sup>, B. V. Voitekhovsky<sup>2</sup>, D. D. Sivitskaya<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Belarusian National Technical University<sup>2</sup>Belarusian State Technological University**ABOUT INCREASING THE PERFORMANCE OF OFF-ROAD WHEELS VEHICLE**

The problem of cross-country ability of off-road vehicles and agricultural machines does not require its relevance at the present time. Moreover, an increase in the productivity and energy saturation of forestry and agricultural production machines leads to an increase in their mass, and, consequently, exacerbates the problem. Thus, the issue of taking into account the passability of forest machine materials is solved both by strengthening the road surface (increasing the number of layers of the road surface, the need for underlying ones, etc.), and by improving the movers.

The article discusses the most acceptable, effective and relatively easily accessible ways to increase the cross-country ability of vehicles equipped with oversized tires. Among the most commonly used solutions to the problem of increasing the cross-country ability and energy-saving qualities of wheeled vehicles is doubling the wheels, which leads to a deterioration in the turnover of the vehicle. Or the use of large-sized arched tires and pneumatic rollers, which increases the cost of the structure. The most effective way to increase flotation is to adjust the air pressure in the tires depending on the operating conditions.

The results of experimental studies of the stress-strain state of the soil massif are given for various values of the load on the wheel, the properties of the supporting surface and the values of air pressure in the tire. Specific recommendations have been developed regarding the optimal values of air pressure in

the tires of the wheels, depending on the operating conditions, which in the general case allows to reduce the concentration of the track by an average of 15–20%, depending on the mechanical properties of the soil.

**Keywords:** patency, tire inflation, air pressure, joint sealing, tightness, energy costs.

**For citation:** Kim Yu. A., Naskovets M. T., Voitekhovsky B. V., Sivitskaya D. D. About increasing the performance of off-road wheels vehicle. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 98–103. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-10 (In Russian).

**Введение.** Одним из основных параметров колесного движителя является величина и характер распределения напряжений [1–4]. Этот параметр влияет на глубину погружения колеса, степень уплотнения почвы, сопротивление качению и другие показатели. Однотипность грунтовых условий позволяет произвести качественную и количественную оценку величин напряжений под движителями в зависимости от давления воздуха в шине и вертикальной нагрузки на колесо.

Целью данного исследования является определение предпочтительных величин давления воздуха в крупногабаритных шинах, используемых на внедорожных транспортных средствах.

**Основная часть.** Исследования проводились с использованием крупногабаритной шины низкого давления Ф-82. Наиболее наглядное представление о характере и величинах распределения напряжений по глубине почвенного массива дают изолинии напряжений [5] в продольной и поперечной плоскостях симметрии колеса (рис. 1). Величина напряжения  $z$  указана на каждой из линий равного напряжения (рис. 1, а и б). Изолинии построены на основании эпюр контактных напряжений  $P_{zz}$  (рис. 1, в и г), полученных на различной глубине почвенного массива по показаниям месдоз, внедренных в почву на пашне ( $W = 15–20\%$ ).

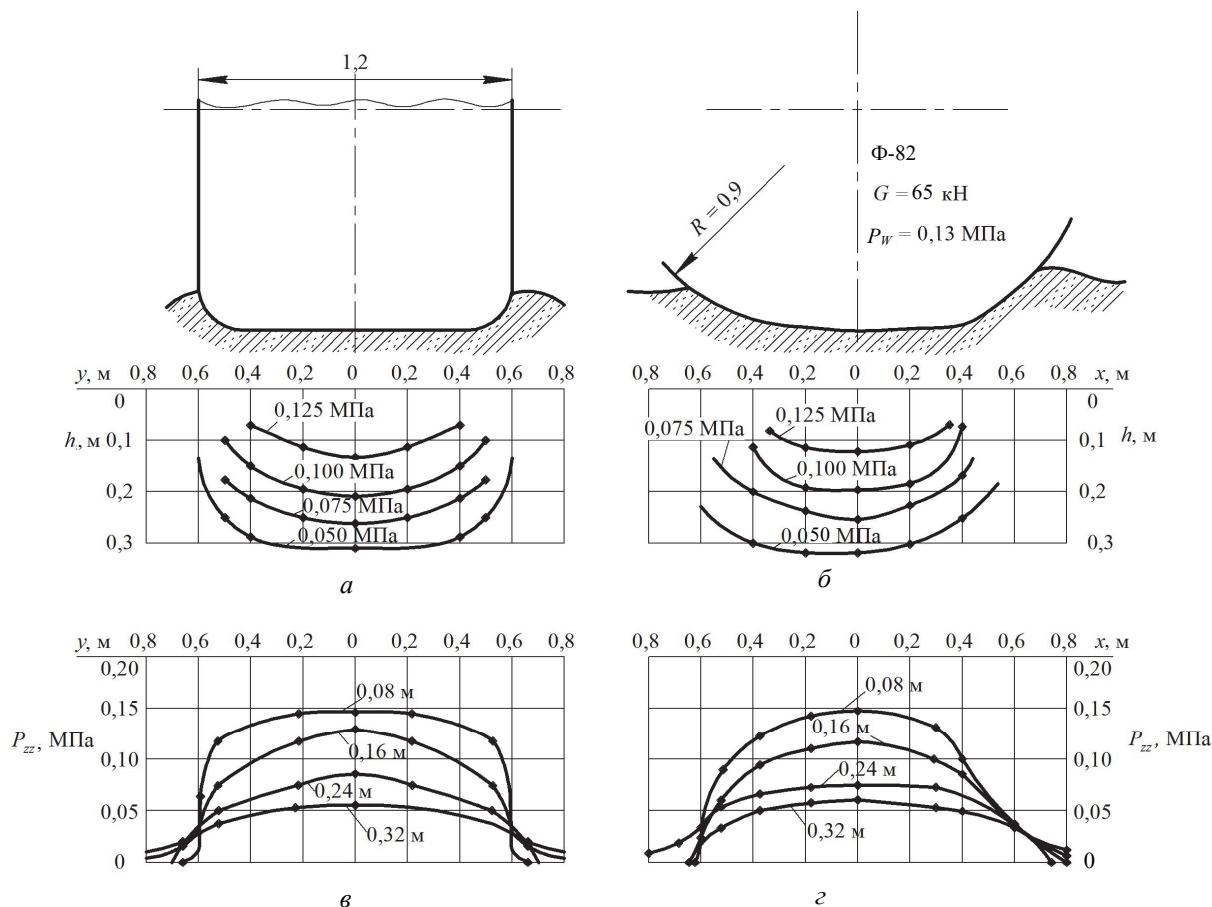


Рис. 1. Распределение напряжений под задним колесом с шиной Ф-82 ( $G = 65$  кН,  $P_w = 0,13$  МПа): а – линии равного напряжения величины  $z$  в поперечной плоскости симметрии; б – линии равного напряжения величины  $z$  в продольной плоскости симметрии, в – изолинии контактных напряжений  $P_{zz}$  в поперечной плоскости симметрии; г – изолинии контактных напряжений  $P_{zz}$  в продольной плоскости симметрии

Характер распределения напряжений следует считать благоприятным. Изолинии в продольной и поперечной плоскостях колеса имеют участок (0,6–0,8 м), близкий к горизонтальному, без высоких концентраций напряжений, очертание эпюр плавное. Изменение напряжений по глубине почвенного массива неодинаково в различных поясах шины. Под осью колеса, в середине беговой дорожки шины, напряжения плавно уменьшаются с возрастанием глубины (по мере удаления от оси колеса), а также ближе к краю беговой дорожки шины. Напряжения в верхних слоях уменьшаются интенсивнее, чем в нижних. Это объясняется конусообразным распространением напряжений в почве и особенно ярко выражено в поперечной плоскости, где действуют только вертикальные внешние усилия. В продольной же плоскости возникают касательные усилия, делающие картину не симметричной. Эпюры и изолинии напряжений представлены в поперечной плоскости, симметричной относительно оси  $O_z$ .

В продольной плоскости симметрии колеса форма эпюр  $P_{zz}$  несимметрична относительно оси  $O_z$ . Напряжения на нагрузочном участке, деформирующем почву, возрастают плавно и имеют максимум при внутришинном давлении  $P_W = 0,13$  МПа под осью колеса. На более коротком разгрузочном участке напряжения резко падают. Площадь эпюры нагрузочного участка больше разгрузочного. Центр тяжести всей эпюры смещен вперед на некоторую величину. Таким образом, произведение суммы вертикальных составляющих напряжений в точке контакта на величину смещения будет давать момент сопротивления качению колеса за счет деформации почвы. Эпора сжимающего напряжения имеет описанный характер не только в верхних слоях, но и на глубине до 0,25 м. И лишь на глубине 0,30 м эпюра до некоторой степени выравнивается. Благодаря тому, что движители оказывают низкое давление на опорную поверхность, при форме пятна контакта, близкой к прямоугольной со скругленными углами, напряжения в почве имеют невысокие значения. Плотность почвы в следе в зависимости от нагрузки  $G$  и давления воздуха в шинах  $P_W$  составляет  $\rho = 1,15 \cdot 10^3 - 1,37 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, при начальной  $\rho = 1,03 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент податливости оболочки шины модели Ф-82 имеет значение, равное 10 см<sup>3</sup>/кг. Введение коэффициента  $C$  позволяет оценить влияние соседних участков шины на деформативные свойства данного участка. Определение радиальной жесткости шины на стенде по ее прогибу в зависимости от

нагрузки дает лишь общую картину или конечный результат. Что касается величин контактных напряжений  $P_{zz}$ , то во всем диапазоне нагрузок на колесо изменение давления воздуха в шинах  $P_W$  приводит к изменению величин и характера контактного напряжения. Снижение  $P_W$  приводит к уменьшению контактного напряжения и одновременно изменяет характер его распределения. В поперечной плоскости величина контактного напряжения уменьшается к середине беговой дорожки и относительно возрастает по краям. Однако чрезмерное снижение  $P_W$  нежелательно, так как деформация шины может превысить допустимую величину. Так, например, при  $P_W = 0,07$  МПа и  $G = 65$  кН на боковинах шины образуются складки, что вызывает повышенный износ и резко увеличивает гистерезисные потери энергии при качении. На величину контактного напряжения оказывают влияние состояния опорной поверхности. На рыхлом торфянике ( $W = 65-70\%$ ) увеличение  $P_W$  свыше 0,11; 0,12; 0,15 МПа при нагрузке, соответственно равной 35, 50, 65 кН, не вызывает увеличения контактного напряжения, так как форма и размеры пневматической шины практически не изменяются. Т. е. пневматическое колесо ведет себя как жесткое. На пашне ( $W = 15-20\%$ ) аналогичная картина представляется при увеличении  $P_W$  свыше 0,12; 0,135; 0,16 МПа при тех же значениях нагрузки на колесо. На многолетних травах на торфянике ( $W = 50-53\%$ ) – соответственно 0,13; 0,15; 0,18 МПа. Однако если в первых двух случаях величины контактных напряжений равны в одних и тех же поясах шины под почвозацепами и между ними, то здесь наблюдается существенное отличие.

Почвозацепы высотой 0,05 м, которыми снабжена шина Ф-82, концентрируют напряжения в контакте. Так, при движении по многолетним травам на торфянике при погружении колеса на глубину 0,08 м величина давления под почвозацепами на 20% выше, чем вне их. Уменьшение высоты почвозацепов позволит выровнять эпюру давлений, однако могут снизиться тяговые качества. Существует мнение, что высота зацепов и другие параметры рисунка протектора практически не влияют на реализацию движителем тягового усилия. Это обосновывается тем, что протектор забивается и колесо работает, как гладкое. Полностью с этим согласиться нельзя, поскольку меры, принимаемые для самоочищаемости протектора, позволяют включить почвозацепы в работу. В. Ф. Бабков, В. С. Гапоненко, Н. Ф. Бочаров

[6–8], В. А. Соколова [9] указывают, что высокие и редко расположенные зацепы протектора твердого подстилающего основания, пронзая верхние слабые слои, обеспечивают достаточное сцепление. Однако при чрезмерном увеличении высоты зацепов появляется вероятность их неполного заглубления в почву, при этом будет отсутствовать давление под опорными поверхностями впадин, что повлечет за собой уменьшение силы тяги. Кроме того, при этом повышается радиальная жесткость шины [10–12]. Таким образом, комплекс требований, предъявляемых к шинам высокой проходимости, обширен и порой противоречив. Так, например, требование снижения уплотняющего воздействия почвы часто противоречит требованию повышения сцепных качеств. Поэтому при выборе высоты почвозацепов необходимо компромиссное решение. На основании экспериментально-теоретических исследований качеств шин высокой проходимости [13–15] рекомендуют высоту зацепов не более 0,03 м.

Как показывают результаты проведенных исследований, величина контактного напряжения в меньшей степени зависит от нагрузки на колесо  $G$ , а в большей – от внутреннего давления в шине  $P_W$  и свойств опорной поверхности. Глубина оставляемой колесом колеи изменяется в зависимости от  $P_W$  и  $G$  на всех исследуемых опорных поверхностях. На рис. 2–4 представлены зависимости глубины колеи  $h$  от  $P_W$  на различных типах опорных поверхностей. При движении машины по рыхлому торфянику ( $W = 65–70\%$ ,  $G = 65$  кН и  $P_W = 0,1$  МПа) образуется колея глубиной 0,15–0,17 м, в то время как увеличение  $P_W$  до 0,13 МПа вызывает потерю проходимости при проезде по следу.

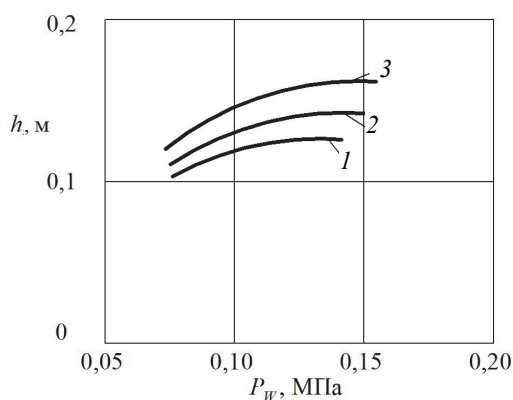


Рис. 2. Зависимость глубины колеи  $h$  от внутреннего давления в шине  $P_W$  на рыхлом торфянике ( $W = 65–70\%$ ):

1, 2, 3 –  $G = 34, 50, 65$  кН соответственно

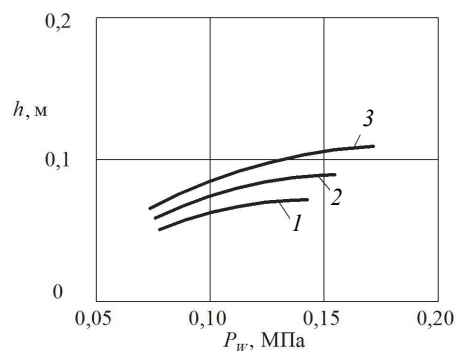


Рис. 3. Зависимость глубины колеи  $h$  от внутреннего давления в шине  $P_W$  на пахоте ( $W = 15–20\%$ ):

1, 2, 3 –  $G = 34, 50, 65$  кН соответственно

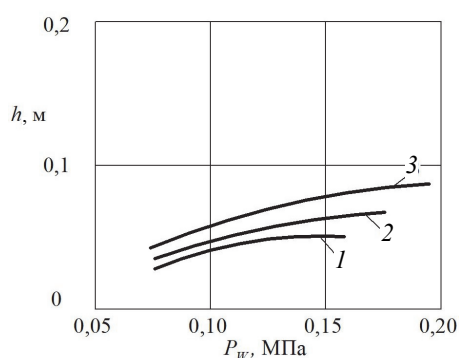


Рис. 4. Зависимость глубины колеи  $h$  от внутреннего давления в шине  $P_W$  на многолетних травах на торфянике ( $W = 50–53\%$ ):

1, 2, 3 –  $G = 34, 50, 65$  кН соответственно

**Закключение.** Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что одним из наиболее эффективных и одновременно доступных путей повышения проходимости внедорожных транспортных средств является регулирование давления воздуха в шинах колесных движителей. Так, например ограничение величины нагрузки на колесо может привести к резкому снижению производительности машины, а внесение изменений в конструкцию шины – к значительным затратам. Регулирование величины давления воздуха в шинах должно осуществляться в указанных заводом-изготовителем пределах с применением специальных средств, позволяющих производить регулировку на ходу, в зависимости от условий эксплуатации. Подбор оптимальных значений давления воздуха в шинах колес транспортного средства позволяет уменьшить глубину колеи и снизить энергозатраты на передвижение.

Оснащение транспортных средств специальными системами центральной подкачки шин на ходу позволит существенно и с минимальными затратами повысить их эксплуатационные качества.

## Список литературы

1. Бабков В. Ф. Напряжения в грунтовых основаниях дорожных одежд // Труды ДорНИИ. 1941. Вып. 3. С. 99–196.
2. Скотников В. А., Смилский В. В., Галкин Е. М. Моделирование сопротивления качению колеса пневматической шиной по деформирующейся почве // Взаимодействие ходовых систем с почвогрунтами. Минск: БИМСХ, 1983. С. 6–8.
3. Орда А. Н. Исследование механики колееобразования и уплотнения почвы колесными движителями и обоснование требований к многоосным ходовым системам: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1978. 16 с.
4. Скойбеда А. Т. Автоматизация ходовых систем колесных машин. Минск: Наука и техника, 1979. 277 с.
5. Костюк Н. П. Исследование напряженно-деформированного состояния осушенной торфяной залежи при воздействии ходовых устройств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Калинин, 1971. 25 с.
6. Соколова В. А., Петров И. П. Исследование взаимодействия арочного колеса с опорной поверхностью // Труды НАМИ. 1962. Вып. 54. С. 64–72.
7. Гапоненко В. С. О путях снижения уплотняющего воздействия машинно-тракторных агрегатов на почву // Влияние сельскохозяйственной техники на почву: тр. Почвенного института имени В. В. Докучаева. М., 1981. С. 56–61.
8. Бочаров Н. Ф. Транспортные средства на эластичных движителях. М.: Машиностроение, 1974. 208 с.
9. Бобков В. Ф., Бируля А. К., Сиденко В. М. Проходимость колесных машин по грунту. М.: Автотрансиздат, 1959. 181 с.
10. Ким Ю. А., Опейко С. Ф. Теоретическое определение напряжений в области контакта жесткого колеса с деформируемым грунтом // Автотракторостроение. Вып. 17. Теория и конструирование мобильных машин. Минск, 1982. С. 68–70.
11. Колобов Г. К., Полетаев А. Ф. К вопросу взаимодействия тракторной шины с почвой // Тракторы и сельхозмашины. 1960. № 2. С. 9–11.
12. Влияние высоты грунтозацепов протектора на жесткостные характеристики шин ведущих колес тракторов класса 1,4 / Ю. П. Завьялов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 1984. № 13. С. 18–19.
13. Бражник Б. М. Исследование влияния рисунка протектора шин с регулируемым давлением на сцепление с грунтом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 20 с.
14. Хархута Н. Я., Васильев Ю. М. Деформация грунтов дорожных насыпей. М.: Автотрансиздат, 1957. 71 с.
15. Антипов Л. А., Соломатин В. И., Шереметьев Б. М. О шинах и пневмооборудовании дорожных катков // Строительные и дорожные машины. 1983. № 4. С. 10–12.

## References

1. Babkov V. F. Stresses in soil foundations of pavements. *Trudy DorNII* [Proceedings of Road Research Institute], 1941, issue 3, pp. 99–196 (In Russian).
2. Skotnikov V. A., Smilskiy V. V., Galkin E. M. *Modelirovaniye soprotivleniya kacheniyu koleasa pnevmaticheskoy shinoi po deformiruyushcheysoya pochve* [Modeling the rolling resistance of wheels with a pneumatic tire on deforming soil]. Minsk, BIMSKh Publ., 1983, pp. 6–8 (In Russian).
3. Orda A. N. *Issledovaniye mekhaniki koleyeobrazovaniya i uplotneniya pochvy kolesnymi dvizhitelyami i obosnovaniye trebovaniy k mnogoosnym khodovym sistemam. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the mechanics of rutting and soil compaction by wheel movers and justification of safety for multi-axle running systems. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Minsk, 1978. 16 p. (In Russian).
4. Skoybeda A. T. *Avtomatizatsiya khodovykh sistem kolesnykh mashin* [Automation of running systems of wheeled vehicles]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1979. 277 p. (In Russian).
5. Kostyuk N. P. *Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osushennoy torfyanoy zalezhi pri vozdeystviy khodovykh ustroystv. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Investigation of the stress-strain state of a drained peat deposit under the influence of running devices. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Kalinin, 1971. 25 p. (In Russian).
6. Sokolova V. A., Petrov I. P. Investigation of the interaction of an arched wheel with a support surface. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI], 1962, issue 54, pp. 64–72 (In Russian).
7. Gaponenko V. S. On ways to reduce the compacting effect of machine-tractor units on the soil. *Vliyaniye sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na pochvu: trudy Pochvennogo instituta iment V. V. Dokucha-*

yeva [The impact of agricultural machinery on the soil: Proceedings of the V. V. Dokuchaev Soil Institute], Moscow, 1981, pp. 56–61 (In Russian).

8. Bocharov N. F. *Transportnyye sredstva na elastichnykh dvizhitelyakh* [Vehicles on elastic propulsion]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974. 208 p. (In Russian).

9. Bobkov V. F., Birulya A. K., Sidenko V. M. *Prokhozimost' kolesnykh mashin po gruntu* [Passability of wheeled vehicles on the ground]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1959. 181 p. (In Russian).

10. Kim Yu. A., Opeyko S. F. Theoretical determination of stresses in the area of contact of a rigid wheel with deformable soil. *Avtotraktorostroyeniye* [Autotractor building], issue 17, Theory and design of mobile machines, Minsk, 1982, pp. 68–70 (In Russian).

11. Kolobov G. K., Poletaev A. F. On the issue of interaction between a tractor tire and soil. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machines], 1960, no. 2, pp. 9–11 (In Russian).

12. Zavyalov Yu. P., Grachev Yu. S., Zavgorodniy V. I., Brazhnik B. M. Influence of the height of the tread lugs on the rigidity characteristics of tires for driving wheels of class 1.4 tractors. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machines], 1984, no. 13, pp. 18–19 (In Russian).

13. Brazhnik B. M. *Issledovaniye vliyaniya risunka protektora shin s reguliruyemym davleniyem na stsepleniye s gruntom. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the influence of the tread pattern of tires with adjustable pressure on grip with the ground. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Moscow, 1974. 20 p. (In Russian).

14. Kharkhuta N. Ya., Vasiliev Yu. M. *Deformatsiya gruntov dorozhnykh nasypey* [Deformation of road embankment soils]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1957. 71 p. (In Russian).

15. Antipov L. A., Solomatin V. I., Sheremetiev B. M. About tires and pneumatic equipment of road rollers. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road machines], 1983, no. 4, pp. 10–12 (In Russian).

### Информация об авторах

**Ким Юрий Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной графики машиностроительного профиля. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12, Республика Беларусь). E-mail: igmp\_atf@bntu.by

**Насковец Михаил Трофимович** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: naskovets@belstu.by

**Войтеховский Борис Викторович** – старший преподаватель кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: voitechovskiy@belstu.by

**Сивицкая Диана Дмитриевна** – магистрант кафедры инженерной графики машиностроительного профиля. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12, Республика Беларусь). E-mail: igmp\_atf@bntu.by

### Information about the authors

**Kim Yuriy Alekseevich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Engineering Graphics for Machine-Building. Belarusian National Technical University (12, Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igmp\_atf@bntu.by

**Naskovets Mikhail Trofimovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: naskovets@belstu.by

**Voitechovsky Boris Viktorovich** – Senior Lecturer, the Department of Engineering Graphics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voitechovskiy@belstu.by

**Sivitskaya Diana Dmitrievna** – Master's degree student, the Department of Engineering Graphics for Machine-Building. Belarusian National Technical University (12, Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igmp\_atf@bntu.by

Поступила 15.10.2022