



DOI 10.5862/JEST.231.20

УДК 629.365

*А.Е. Бажуков, С.И. Худорожков***РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ***A.E. Bazhukov, S.I. Hoodorozhkov***CALCULATING THE UNDERCARRIAGE PARAMETERS  
OF A TRACKED VEHICLES**

В статье предложена методика по расчету сил натяжения в свободной и рабочей ветвях обвода с учетом деформации шарниров гусеницы и подвески. Приведены расчетные схемы для определения параметров ходовой части. Определена зависимость геометрии гусеничного обвода от данных сил, учитывающая изменения положения корпуса машины по высоте и углу наклона, а также поджатие опорных катков.

ГУСЕНИЧНАЯ МАШИНА; ХОДОВАЯ ЧАСТЬ; ПЕРИМЕТР ГУСЕНИЧНОГО ОБВОДА; ДЕФОРМАЦИЯ; НАТЯЖЕНИЕ ГУСЕНИЦ.

This article proposes a method for calculation the forces in free and driving contour branches taking into account the deformation of tracks' joints and suspensions. The calculated schemes shows for determining parameters of the track assembly. The dependence of the geometry of the caterpillar contour on these forces determined a feature of which is an account of the change of position of the machine body in terms of height and angle, as well as the compression of the road wheel. A reference calculation was made out with the example of a tracked vehicle heavy category with rear drive wheel, the results of which presents in plot form.

TRACKED VEHICLE; TRACK ASSEMBLY; PERIMETER OF THE CATERPILLAR CONTOUR; DEFORMATION; TRACK TENSION.

**Введение**

Транспортные гусеничные машины (ТГМ) представляют существенный сектор в системе наземных безрельсовых транспортных средств. К ТГМ относятся гусеничные транспортеры, снегоходы, болотоходы, а также машины специального назначения – танки, боевые машины пехоты, многоцелевые платформы на гусеничном ходу.

Ходовая часть ТГМ, куда входят гусеничный движитель и система подрессоривания, обладает рядом преимуществ по сравнению с ходовой частью колесной машины. Это более высокие проходимость и тягово-сцепные качества, производительность, а также более высокая скорость движения в тяжелых дорожных условиях.

Развитие и модернизация ходовой части реализуются благодаря обширным теоретическим и экспериментальным исследованиям по уточнению взаимодействия движителя с опорной поверхностью, выбору оптимальных режимов работы ходовой части, усовершенствованию методов расчета и конструирования, применению новых технологических и конструктивных приемов [1–5].

Механизм натяжения гусениц с направляющим колесом входит в состав гусеничного движителя и предназначен для регулирования предварительного натяжения гусеницы, которое обуславливает ее устойчивость в обводе, условия работы зацепления гусеницы с ведущим колесом и нагруженность элементов ходовой части [6, 7].

Один из способов совершенствования гусеничного движителя — использование механизма автоматического натяжения гусениц. Данный механизм позволит автоматически регулировать натяжение гусеницы в зависимости от режима и условий эксплуатации. В настоящее время при движении машины натяжение либо не регулируется, либо регулируется дистанционно механиком-водителем, причем, как правило, на малой скорости.

При движении ТГМ гусеница испытывает сложное силовое воздействие. Изменение тяговой нагрузки и скорости движения приводит к перераспределению натяжения в ветвях обвода, а также к изменению длин этих ветвей [3, 8].

Для компенсации провисания ветвей, а также изменения натяжения необходимо дополнительно подтянуть гусеницу с помощью механизма автоматического натяжения.

Цель данной работы — предложить расчетную методику по определению зависимости между параметрами ходовой части и режимами движения ТГМ.

#### Определение натяжения гусениц

Силы, действующие на гусеницу в обводе, можно разделить на постоянные по величине на данном режиме движения, при данной скорости, направлении и сопротивлении движению (постоянные составляющие натяжения) и переменные во времени на любом установившемся режиме (динамические составляющие) [3].

К постоянным составляющим натяжения обычно относят: предварительное натяжение  $T_{пр}$ ;

тяговое усилие  $P_{вк}$ ; натяжение от центробежных сил  $T_{ц}$ . Эти силы достигают больших значений по абсолютной величине и в значительной степени определяют нагруженность обвода.

В свою очередь, гусеничный обвод делится на несколько участков: опорную ветвь  $l_{оп}$  (через нее вес ТГМ передается на опорную поверхность), рабочую ветвь  $l_p$  (которая передает силу тяги и расположена от опорной ветви до ведущего колеса) и свободную ветвь  $l_{св}$  (которая не нагружена силой тяги и расположена от ведущего колеса до опорной ветви). Причем длины свободной и рабочей ветвей зависят от расположения ведущего и направляющего колес. На рис. 1 показана схема обвода с задним расположением ведущего колеса.

Постоянная составляющая сил натяжения в свободной ветви обвода [4]:

$$T_{св} = T_{пр} + T_{ц}$$

Силы натяжения в рабочей ветви [4]:

$$T_p = T_{св} + P_{вк}$$

В статическом положении, когда обвод растянут силой предварительного натяжения, длина (периметр)  $S_{обв}$  обвода равна длине гусеницы (с учетом деформации шарниров):

$$S_{гус} = z t_{гус} + \frac{T_{св}}{c_{гус} l_{св}} + \frac{T_p}{c_{гус} l_p},$$

где  $z$  — число траков в гусенице;  $t_{гус}$  — шаг трака;  $c_{гус}$  — удельная продольная жесткость гусеницы.

Как уже сказано, при движении происходит перераспределение сил натяжения в гусенице, которое приводит к изменениям положения корпуса ТГМ и геометрии обвода. В результате воз-

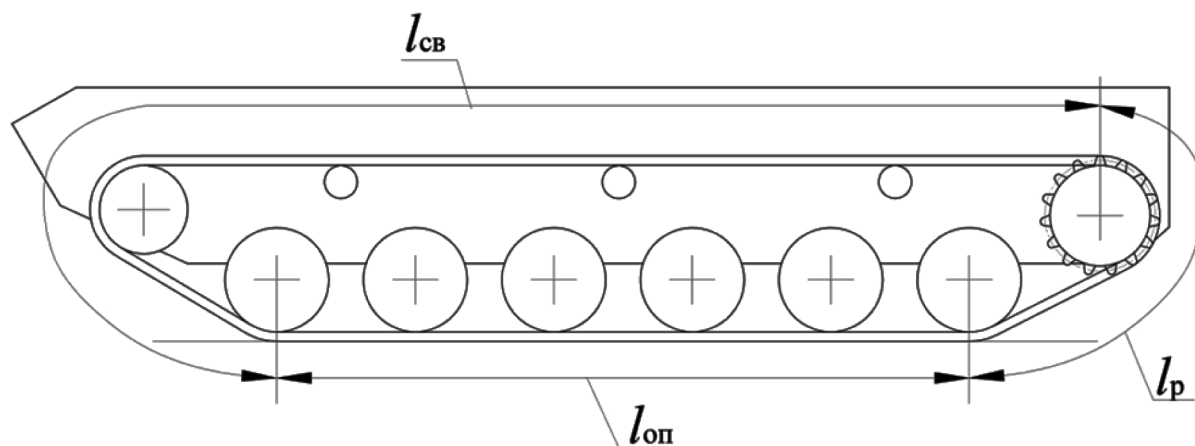


Рис. 1. Участки гусеничного обвода:  $l_{св}$  — свободная ветвь;  $l_p$  — рабочая ветвь;  $l_{оп}$  — опорная ветвь

никающей разницы между периметром обвода и длиной гусеницы ( $\Delta l = S_{обв} - S_{гус}$ ) появляется дополнительная сила натяжения  $\Delta T = c_{обв} \Delta l$ , где  $c_{обв}$  – жесткость гусеничного обвода.

Тогда действительное натяжение в свободной ветви становится равным

$$T_{св} = T_{пр} + T_{ц} - \Delta T.$$

### Определение периметра обвода

Периметр обвода, представленный на рис. 2, можно определить по формуле

$$S_{обв} = S_1 + S_{1н} + S_{1ок} + S_{оп} + S_{2ок} + S_{2н} + S_2 + S_{2в} + S_{1в},$$

где  $S_1$  – длина охвата направляющего (ведущего) колеса;  $S_{1н}$  – длина передней наклонной ветви обвода;  $S_{1ок}$  – длина охвата переднего опорного катка;  $S_{оп}$  – длина опорной ветви;  $S_{2ок}$  – длина охвата заднего опорного катка;  $S_{2н}$  – длина задней наклонной ветви обвода;  $S_2$  – длина охвата ведущего (направляющего) колеса;  $S_{2в}$  – длина постоянной части верхней ветви обвода;  $S_{1в}$  – длина переменной части верхней ветви обвода.

На рис. 3.  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы расположенного впереди (индекс 1) и сзади (индекс 2) ведущего, или направляющего, колеса;  $R_{ок}$  – радиус опорного катка,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – углы наклона передней и задней ветвей гусеничного обвода;  $L_{ок(i)}$  – расстояние от центра подрессоренной массы до оси  $i$ -го катка по горизонтали;  $L_1$  и  $L_2$  – расстояния по длине от оси расположенного впереди (индекс 1) и сзади (индекс 2) ведущего, или направляющего, колеса до оси переднего и заднего катка;  $H_{k1}$  и  $H_{k2}$  – расстояния по высоте от оси расположенного впереди (индекс 1) и сзади (индекс 2) ведущего, или направляющего, колеса до оси переднего и заднего катка.

В процессе увеличения натяжения гусениц происходят изменения положения корпуса по высоте и углу наклона, а также параметров ходовой части: углов наклона ветвей гусениц, расстояний между осями опорных катков, базы и т.д [5, 9].

Используя схемы, представленные на рис. 2, 3, получили следующие зависимости для определения длин отдельных участков гусеничного обвода:

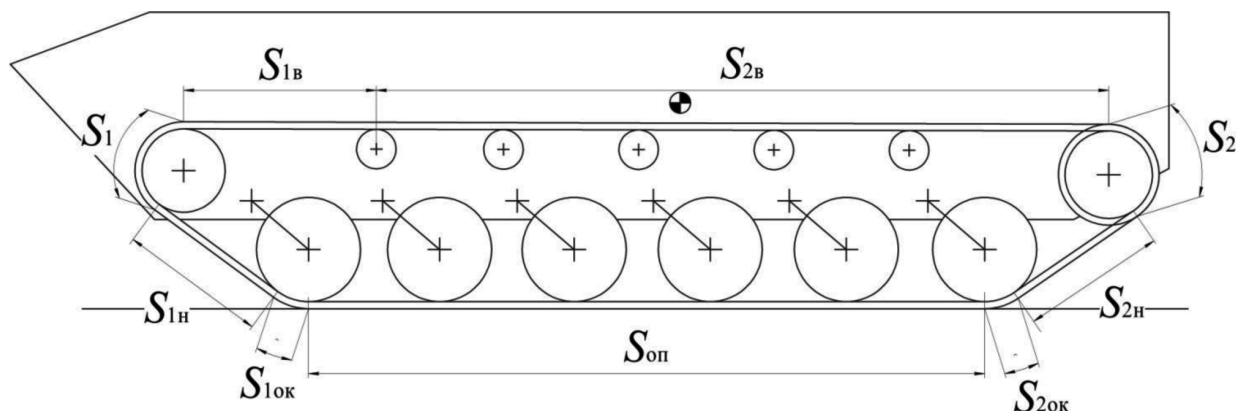


Рис. 2. Расчетная схема для определения длины гусеничного обвода

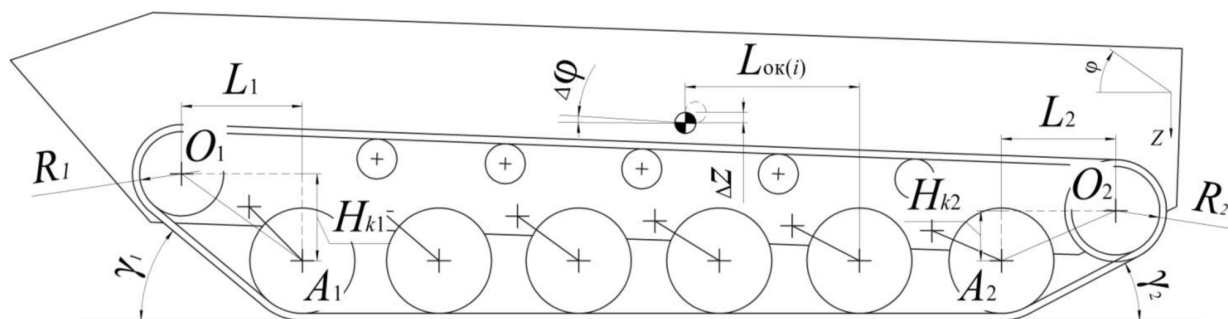


Рис. 3. Расчетная схема для определения параметров гусеничного обвода

1)  $S_1 = (\pi - \gamma_1(f_1))R_1$ , где  $f_1$  – ход 1-го опорного катка;

$$2) S_{1н} = \sqrt{O_1A_1(f_1)^2 - (R_{ок} - R_1)^2},$$

где  $O_1A_1 = \sqrt{L_1(f_1)^2 - H_{k1}(f_1)^2}$ ;

$$3) S_{1ок} = \gamma_1(f_1)R_{ок};$$

4)  $S_{оп} = L_{ок(1)}(f_1) - L_{ок(n)}(f_n)$ , где  $L_{ок(1)}$ ,  $L_{ок(n)}$  – расстояния от центра подрессоренной массы до осей 1-го и  $n$ -го опорных катков,  $f_n$  – ход  $n$ -го катка;

$$5) S_{2н} = \sqrt{O_2A_2(f_n)^2 - (R_{ок} - R_2)^2}, \text{ где } O_2A_2 = \sqrt{L_2(f_n)^2 - H_{k2}(f_n)^2};$$

$$6) S_2 = (\pi - \gamma_2(f_n))R_2;$$

7)  $S_{2в}$  – величина, зависящая от геометрических размеров гусеничного движителя;

8)  $S_{1в}$  – величина, зависящая от положения направляющего колеса.

Большинство величин зависят от ходов опорных катков, которые определяются следующим образом [10]:

$$f_i = \Delta z + \Delta \phi L_{ок(i)},$$

где  $\Delta z$  – вертикальное перемещение центра подрессоренных масс ТГМ;  $\Delta \phi$  – угол поворота продольной оси корпуса, проходящей через центр подрессоренной массы.

### Определение положения корпуса

Расчетная схема для определения положения корпуса с учетом сил натяжения гусениц (для

ходовой части с задним расположением ведущего колеса) приведена на рис. 4.

Корпус машины находится в равновесии, если удовлетворяется условие

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i - T_1 \sin \gamma_1 - T_2 \sin \gamma_2 - 0,5M_n g - M_n \ddot{z} = 0; \\ \sum_{i=1}^n P_i L_{ок(i)} - T_1 S_{п1} + T_2 S_{п2} - J_n \ddot{\phi} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Иначе, корпус стремится занять равновесное положение с ускорениями

$$\ddot{z} = \frac{\Delta P}{M_n} \text{ и } \ddot{\phi} = \frac{\Delta M}{J_n}.$$

Если значения суммы сил  $\Delta P$  и суммы моментов  $\Delta M$  не равны нулю, тогда полученное рассогласование устраняем за счет перемещения корпуса по высоте  $z$  и углу наклона  $\phi$ , в результате чего находим приращение ходов подвесок  $i$ -ых катков, новые значения ходов  $f_i$ , новые значения упругих сил  $P_i$  и т.д.

Необходимое дополнительное перемещение корпуса по углу наклона [5] найдется по формуле

$$d\phi = \frac{\Delta M \sum_{i=1}^n c_i - \Delta P \sum_{i=1}^n [c_i L_{ок(i)}]}{\sum_{i=1}^n [c_i L_{ок(i)}]^2 \sum_{i=1}^n c_i - \left\{ \sum_{i=1}^n [c_i L_{ок(i)}]^2 \right\}},$$

а по высоте [5] – по формуле

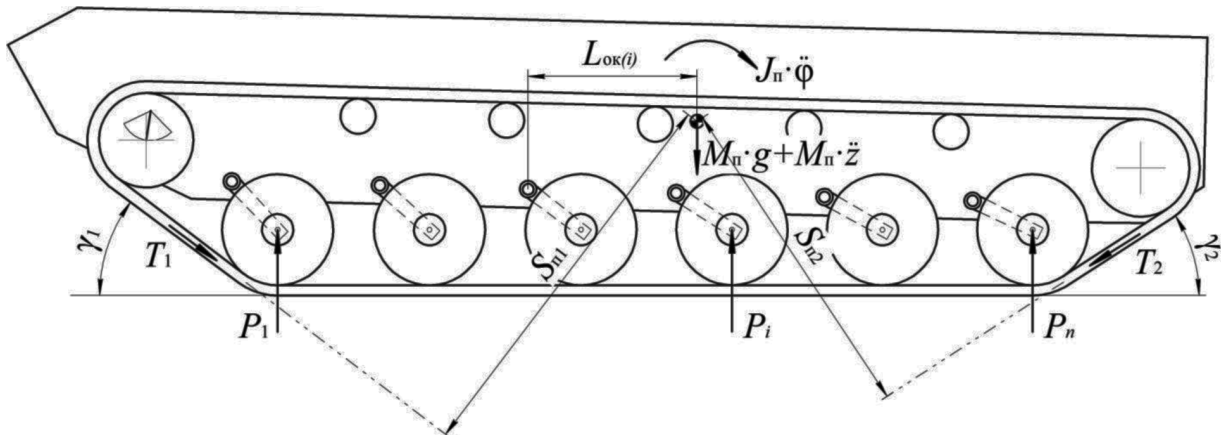


Рис. 4. Расчетная схема сил, действующих на ходовую часть:  $M_n$  – подрессоренная масса машины;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P_i$  – упругая сила подвески, приведенная к  $i$ -му опорному катку;  $T_1$  – сила, действующая в передней ветви обвода;  $T_2$  – сила, действующая в задней ветви обвода,  $S_{п1}$  и  $S_{п2}$  – плечи моментов сил натяжения гусениц относительно центра подрессоренной массы;  $n$  – число опорных катков на борт;  $J_n$  – момент инерции подрессоренной массы

$$dz = \frac{\Delta P - d\varphi \sum_{i=1}^n [c_i L_{ок(i)}]}{\sum_{i=1}^n c_i}.$$

Приращение статического хода для  $i$ -го катка:

$$\Delta f_i = dz + L_{ок(i)} d\varphi.$$

Новое значение хода для  $i$ -го опорного катка:

$$f_i = f_i + \Delta f_i.$$

В зависимости от хода  $i$ -го катка уточняем значения длин участков обвода, углов наклона гусеницы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  и определяем новые значения суммы сил  $\Delta P$  и суммы моментов  $\Delta M$ .

При достижении заданной точности  $\ddot{z}$  и  $\ddot{\varphi}$  расчет можно завершать.

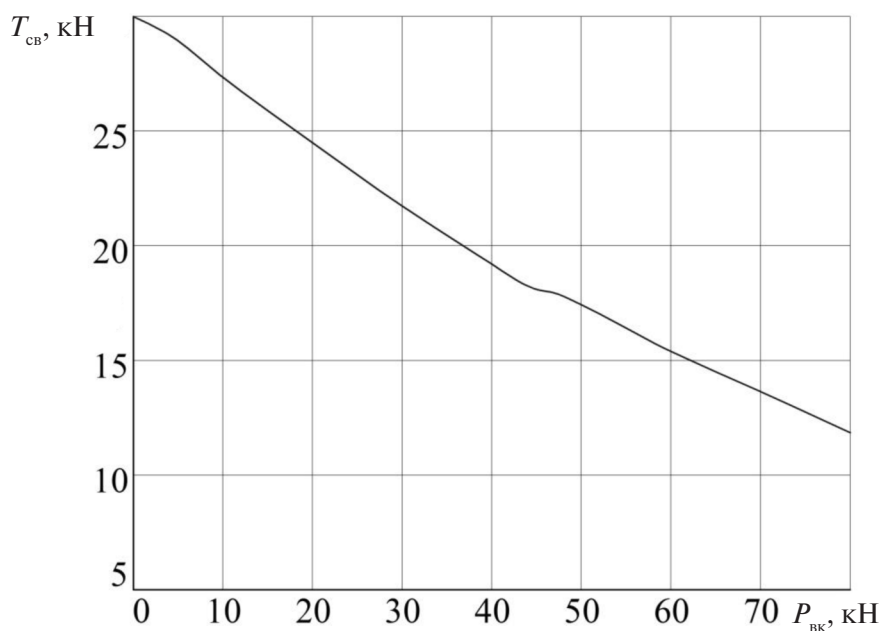


Рис. 5. Зависимость натяжения в свободной ветви обвода от силы тяги

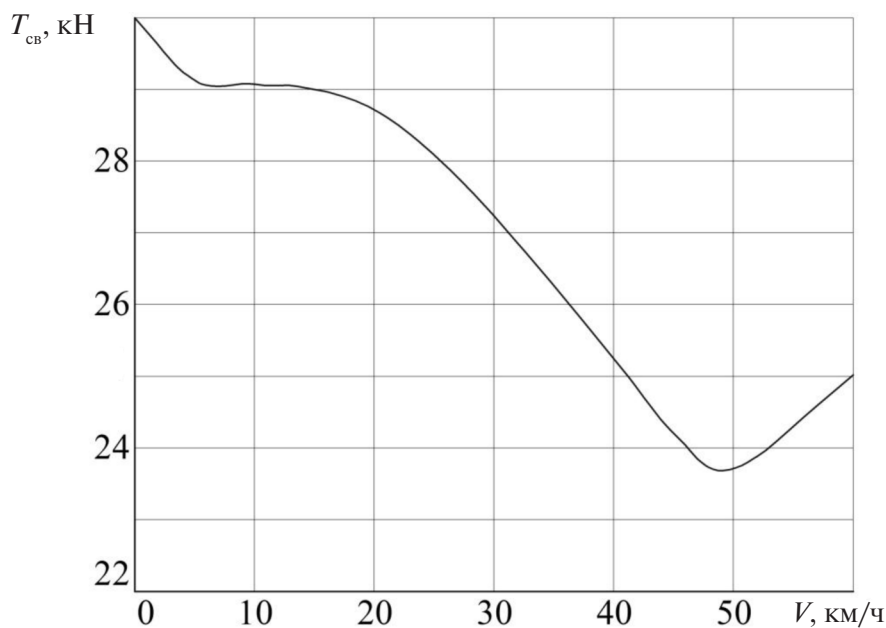


Рис. 6. Зависимость натяжения в свободной ветви обвода от скорости движения

Данный метод позволил практически после трех-четырёх приближений получить необходимые значения параметров ходовой части.

### Результаты расчета контрольного примера

В качестве примера проведен расчет параметров ходовой части гусеничной машины, описание и технические характеристики которой приведены в публикации [11].

Рассмотрено прямолинейное движение машины при различных режимах движения. Результаты расчета, а именно натяжение в свободной ветви обвода от сил тяги и скорости движения, представлены в виде графиков на рис. 5, 6.

Как видно из графиков, движение в тяжелых дорожных условиях или с высокой скоростью существенно снижает натяжение свободной ветви обвода. Причем влияние силы тяги более существенно.

**Основные выводы и рекомендации** можно изложить следующим образом:

Фактический периметр обвода отличается от длины гусеницы. Предложенная методика позволяет отразить связь между силами, действующими в обводе, и значением периметра обвода с учетом деформации шарниров и подвески.

Отличием предложенной методики является учет высоты положения корпуса машины и угла его наклона в зависимости от сил, действующих в обводе.

Применение методики расчета позволяет для конкретной машины в заданных условиях движения оценить значение потребного предварительного натяжения гусеницы. Такая оценка дает возможность перейти к проектированию механизма автоматического натяжения гусениц и разработке алгоритма управления натяжением.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добрецов Р.Ю. Математическая модель гусеничного движителя с недеформируемым основанием при высоких скоростях прямолинейного движения: Автореферат дис. ... канд. тех. наук. СПб.: СПбГТУ, 2000. 16 с.
2. Ogorkiewicz R. M. Technology of Tanks. / Sentinel House 163 Brighton Road Coulsdon Surrey: Jane's Information Group, 1991. 424 p.
3. Платонов В.Ф. Динамика и надежность гусеничного движителя. М.: Машиностроение, 1973. 232 с.
4. Волков Ю.П., Ролле В.Е., Самойлов А.Д. Транспортные гусеничные машины. Ходовая часть: Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 267 с.
5. Бажуков А.Е., Ролле В.Е. Влияние силы предварительного натяжения гусениц на статическое положение корпуса гусеничной машины // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. №4(207). С. 233–238.
6. Носов Н.А. Расчет и конструирование гусеничных машин. Л.: Машиностроение, 1972. 560 с.
7. Буров С.С. Конструкция и расчет танков. М.: Изд-во ВАБТВ, 1973. 602 с.
8. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1975. 448 с.
9. Исаков П.П., Абрамов Б.А., Брагин Ю.И., Вавилов Е.В. [и др.]. Теория и конструкция танка: в 10 тт. Т.6. Вопросы проектирования ходовой части военных гусеничных машин / Под ред. д-ра тех. наук П.П. Исакова. М.: Машиностроение, 1985. 244 с.
10. Аврамов В.П., Калейчев Н.Б. Динамика гусеничной транспортной машины при установившемся движении по неровностям. Харьков: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1989. 112 с.
11. Объект 172М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1975. 584 с.

### REFERENCES

1. Dobretsov R.Yu. Matematicheskaya model gusenichnogo dvizhitelya s nedeformiruyemym osnovaniyem pri vysokikh skorostyakh pryamolineynogo dvizheniya: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk [Mathematical model of the caterpillar with not deformable base at high speeds of an in-line motion: autoreferat dissertation]. St. Petersburg: SPbGPU Publ, 2000. 16 p. (rus)
2. Ogorkiewicz R. M. Technology of Tanks / Sentinel House 163 Brighton Road Coulsdon Surrey: Jane's Information Group, 1991. 424 p.
3. Platonov V.F. Dinamika i nadezhnost gusenichnogo dvizhitelya [Dynamics and durability of the caterpillar]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973. 232 p. (rus)
4. Volkov Yu.P. Transportnyye gusenichnyye mashiny. Khodovaya chast: Uchebnoye posobiye [Transport tracked vehicles. Track assembly: Study guide] St. Petersburg: SPbGPU Publ, 2009. 267 p. (rus)
5. Bazhukov A.E., Rolle V.E. Vliyaniye sily predvaritelnogo natyazheniya gusenits na staticheskoye polozheniye korpusa gusenichnoy mashiny [The effect of



pretension force on the static position of the tracked vehicle hull]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2014. № 4(207). P. 233–238. (rus)

6. **Nosov N.A.** Raschet i konstruirovaniye gusenichnykh mashin [Calculation and design engineering of tracked vehicles]. Leningrad: Mashinostroeniye, 1972. 560 p. (rus)

7. **Burov S.S.** Konstruktsiya i raschet tankov [Design and calculation of tanks]. Moscow: Izd-vo VABTV, 1973. 602 p. (rus)

8. **Zabavnikov N.A.** Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin [Fundamentals of the theory of transport tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroeniye, 1975. 448 p. (rus)

9. **Isakov P.P., Abramov B.A., Bragin Yu.I., Vavilov Ye.V. [i dr.]**. Teoriya i konstruktsiya tanka: v 10 tt. T.6.

Voprosy proyektirovaniya khodovoy chasti voyennykh gusenichnykh mashin [Theory and design of the tank: in 10 vol. V.6. Problems of design engineering of a track assembly of military tracked vehicles] / Pod red. d-ra tekhn. nauk P.P. Isakova. Moscow: Mashinostroeniye, 1985. 244 p. (rus)

10. **Avramov V.P., Kaleychev N.B.** Dinamika gusenichnoy transportnoy mashiny pri ustanovivshemsya dvizhenii po nerovnostyam [Dynamics of the transport tracked vehicle at the established driving on roughnesses]. Kharkiv: Vyshcha shk. Publ. at the Kharkov university, 1989. 112 p. (rus)

11. Obyekt 172M. Tekhnicheskoye opisaniye i instruktsiya po ekspluatatsii [Object 172M. Technical description and maintenance instruction]. Moscow: Military Publ. of the Ministry of Defense of the USSR, 1975. 584 p. (rus)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**БАЖУКОВ Артем Евгеньевич** – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: artem\_bashukov@mail.ru

**BAZHUKOV Artem E.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: artem\_bashukov@mail.ru

**ХУДОРОЖКОВ Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: xcu-55s@mail.ru

**HOODOROZHKOV Sergey I.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: xcu-55s@mail.ru