

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОВОРОТУ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ НА ПЛОТНОМ ОПОРНОМ ОСНОВАНИИ

К.Т.Н. Падалкин Б.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

padalkin@bmstu.ru

Целью исследования, выполненного в статье, является повышение степени полноты и достоверности подходов к определению составляющих сопротивления повороту гусеничной машины, а также создание пригодной для практических расчетов методики их оценки.

В статье анализируются две составляющие момента сопротивления повороту гусеничной машины, которые можно выделить, если рассматривать взаимодействие гусеницы с опорным основанием через отдельные пятна контакта (активные участки гусениц, находящиеся под опорными катками). Первая составляющая возникает из-за линейного перемещения активных участков гусениц. Вторая вызвана вращательным движением пятна контакта относительно вертикальной оси.

В работе приведена математическая модель взаимодействия движителя и плотного опорного основания, позволяющая изучить зависимость составляющих момента сопротивления повороту от геометрических параметров ходовой части гусеничной машины. Сила горизонтальной реакции в данном случае представлена в виде зависимости от коэффициента буксования. Также обеспечена возможность реализации различных сцепных качеств движителя в продольном и поперечном направлении скольжения. Модель предполагает предварительное разбиение пятна контакта на конечное число элементарных площадок. Так как количество элементарных площадок оказывает влияние на результат, то в статье проведено исследование по определению минимального количества площадок для обеспечения приемлемой точности.

Был проведен анализ имеющихся в литературе выражений для определения указанной составляющей сопротивления повороту. Также предложены новые эмпирические зависимости, лучше согласующиеся с математической моделью. Исследование нескольких существующих гусеничных машин, отличающихся массой и размером опорной поверхности трака позволило сделать вывод о целесообразности учета момента сопротивления повороту пятна контакта для различных типов гусеничных машин.

Ключевые слова: гусеничные машины, поворот, сопротивления повороту, активный участок гусеницы.

Для цитирования: Падалкин Б.В. Исследование составляющих сопротивления повороту гусеничной машины на плотном опорном основании // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 2 (48). С. 51–62. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-51-62.

Введение

Характерной особенностью движения гусеничных машин (ГМ) является высокий момент сопротивления повороту. Для отражения этой особенности в математических моделях применяют различные подходы. Распространенным решением является представление о том, что взаимодействие ходовой части ГМ и опорного основания в большей степени происходит под активными участками гусениц, которые непосредственно испытывают давление опорных катков [1, 2, 3]. Таким образом возможно определить составляющую момента сопротивления поворота ГМ, зависящую от линей-

ного перемещения пятна контакта (активного участка гусеницы). Вторая составляющая момента сопротивления повороту возникает из-за вращательного движения пятна контакта (активного участка гусеницы) относительно вертикальной оси. Для ее учета необходимо использовать дополнительные зависимости, получению которых посвящена данная работа.

Определение сил и моментов

взаимодействия гусеницы с грунтом

В работе [4] установлено, что распределение нормальных реакций опорного основания типа «плотный грунт» по длине опорных ветвей гу-

сениц во многих случаях разрывно. Основное давление передают активные участки под катками. Часть звеньев гусеницы между катками при этом не участвуют в передаче нормальной нагрузки. Следовательно, по способу реализации взаимодействия с опорной поверхностью (ОП) гусеничный движитель подобен колесному, у которого число колес равно числу опорных катков. Результаты, полученные в работе [4], позволяют перейти от рассмотрения процессов взаимодействия гусеничного обвода с опорным основанием к рассмотрению взаимодействия с ним отдельных активных участков гусеницы под опорными катками.

Сила взаимодействия с грунтом активного участка гусеницы в плоскости опорного основания определяется согласно подходу, изложенному в работах [5, 6]. В соответствии с ним сила взаимодействия движителя с опорной поверхностью направлена противоположно скорости скольжения.

Рассмотрим взаимодействие отдельно активного участка гусеницы под опорным катком с ОП типа «плотный грунт» (рис. 1). Будем считать, что активный участок представляет собой прямоугольник со сторонами l_k и b_k . Для рассмотрения наиболее тяжелого режима нагружения и, соответственно, гарантированной оценки момента сопротивления повороту примем, что нормальная реакция распределена равномерно по площади активного участка, а его размеры составляют: длина l_k соответствует длине двух траков, а ширина b_k – ширине гусеницы.

На рис. 1 обозначены система координат связанная с корпусом машины $x-y$ (с началом в точке С) и система координат, связанная с активным участком гусеницы $x''-y''$. Так как у гусеничной машины отсутствует возможность поворота опорных катков, то эти системы координат неподвижны относительно друг друга.

Вектор скорости скольжения центра рассматриваемого участка $\vec{v}_{ck}$ определяется следующим выражением:

$$\vec{v}_{ck} = \vec{v}_{пер} + \vec{v}_{отн}, \quad (1)$$

где $\vec{v}_{пер}$ – вектор переносной скорости центра рассматриваемого участка; $\vec{v}_{отн}$ – вектор относительной скорости центра рассматриваемого участка.

Проекции вектора переносной скорости центра рассматриваемого участка на оси си-

стемы координат $x''-y''$ определяются следующим образом:

$$v_{перx''} = v_x - \omega_z y_k, \quad v_{перy''} = v_y + \omega_z x_k, \quad (2)$$

где x_k, y_k – координаты проекции центра i -ого катка на плоскость опорного основания относительно центра масс машины (в системе координат $x-y$).

Проекция вектора относительной скорости центра рассматриваемого участка на оси системы координат $x''-y''$:

$$v_{отнx''} = -\omega_{БК} r_{БК}, \quad v_{отны''} = 0, \quad (3)$$

где $r_{БК}$ – радиус ведущего колеса; $\omega_{БК}$ – угловая скорость вращения ведущего колеса соответствующего борта.

Тогда проекции вектора скорости скольжения рассматриваемого участка на оси системы координат $x''-y''$ будут иметь вид:

$$v_{ckx''} = v_x - \omega_z y_k - \omega_{БК} r_{БК}, \quad v_{cky''} = v_y + \omega_z x_k. \quad (4)$$

Величину суммарной реакции R , действующей на рассматриваемый активный участок, определяют по зависимости [7]:

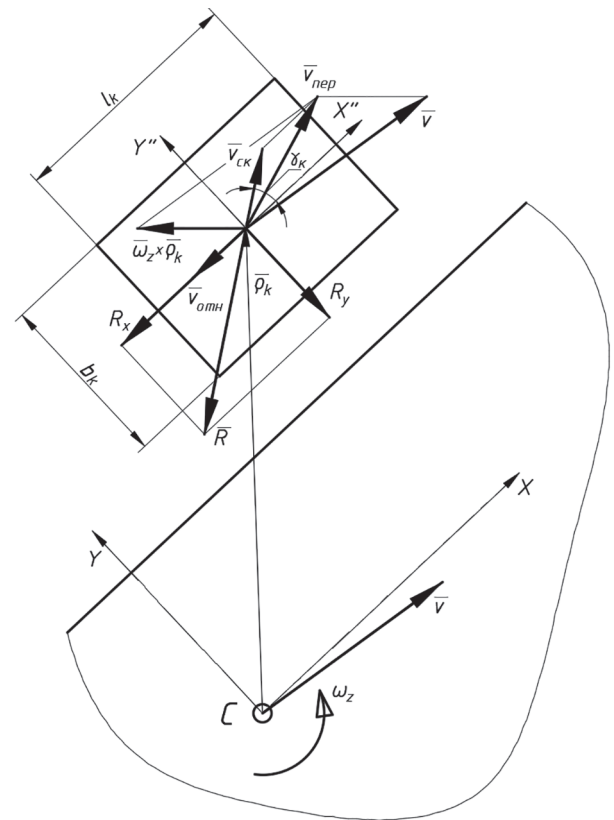


Рис. 1. Схема взаимодействия активного участка гусеницы с опорным основанием

Fig. 1. Scheme of interaction of the active section of the track with the support base

$$R = \mu_s R_z, \quad (5)$$

где μ_s – коэффициент взаимодействия рассматриваемого активного участка гусеницы с опорным основанием; R_z – вертикальная реакция, действующая на активный участок гусеницы под рассматриваемым катком.

Для несвязных опорных оснований характерна следующая зависимость коэффициента взаимодействия от коэффициента скольжения [5, 6, 8]:

$$\mu_s = \mu_{s\max} \left(1 - e^{-\frac{s_k}{s_0}} \right), \quad (6)$$

где $\mu_{s\max}$ – значение коэффициента взаимодействия активного участка при $s_k \rightarrow \infty$ и скольжении с углом γ_k относительно оси x'' ; s_k – коэффициент скольжения рассматриваемого участка гусеницы в зоне контакта; s_0 – константа, характеризующая наклон касательной к кривой $\mu_s(s_k)$ в точке $s_k = 0$.

Основываясь на принципе эллипса трения [6, 9, 10], коэффициент взаимодействия $\mu_{s\max}$ возможно определить как:

$$\mu_{s\max}(\gamma_k) = \frac{\mu_{sx\max} \mu_{sy\max}}{\sqrt{\mu_{sx\max}^2 \sin^2(\gamma_k) + \mu_{sy\max}^2 \cos^2(\gamma_k)}}, \quad (7)$$

где $\mu_{sx\max} > \mu_{sy\max}$ – параметры эллипса трения (рис. 2) (таблица 1) [11].

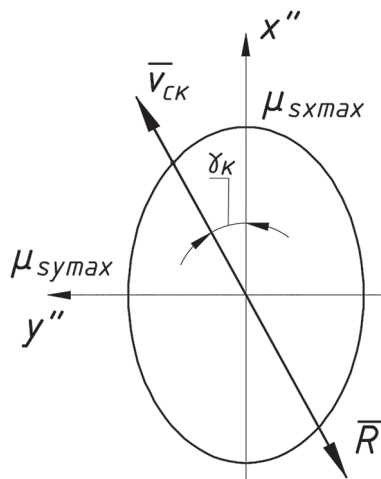


Рис. 2. Эллипс трения

Fig. 2. Friction ellipse

Значения коэффициента $\mu_{s\max}$ для изотропного взаимодействия траков гусеницы с опорным основанием

Table 1. Coefficient $\mu_{s\max}$ values for the isotropic interaction of the caterpillar tracks with the support base

	Сухой асфальт	Сухой грунт	Сухой песок	Рыхлый снег	Луг
$\mu_{s\max}$	0,6–0,65	0,6–0,8	0,4–0,5	0,25–0,45	0,65–0,85

Величины $\mu_{sx\max}$ и $\mu_{sy\max}$ в общем случае могут быть не равны друг другу в следствии наличия грунтозацепов на контактной поверхности трака, позволяющих обеспечить, например, лучшие тяговые качества машины в продольном направлении (актуально для тракторов). Тем не менее для высокоподвижных транспортных машин стремятся обеспечить изотропность взаимодействия траков гусеницы с опорным основанием для реализации как достаточных тяговых свойств машины, так и устойчивости при выполнении маневров поворота на высокой скорости

Коэффициент скольжения рассматриваемого активного участка гусеницы вычисляется по формуле [5]:

$$s_k = \frac{\sqrt{v_{ckx''}^2 + v_{cky''}^2}}{\max(|\vec{v}_{\text{пер}}|, |\vec{v}_{\text{отн}}|)}. \quad (8)$$

При этом $|\vec{v}_{\text{пер}}|$ и $|\vec{v}_{\text{отн}}|$ возможно определить как:

$$|\vec{v}_{\text{пер}}| = \sqrt{v_{\text{пер}x}^2 + v_{\text{пер}y}^2}, \quad |\vec{v}_{\text{отн}}| = |\omega_{\text{вк}} r_{\text{вк}}|. \quad (9)$$

Угол поворота вектора скорости скольжения γ_k относительно оси x'' определяется следующими выражениями:

$$\sin(\gamma_k) = \frac{v_{cky''}}{\sqrt{v_{ckx''}^2 + v_{cky''}^2}}, \quad \cos(\gamma_k) = \frac{v_{ckx''}}{\sqrt{v_{ckx''}^2 + v_{cky''}^2}}. \quad (10)$$

Вектор суммарной реакции R , действующей на активный участок гусеницы, направлен против его скорости скольжения $\vec{v}_{ck}$. В связи с этим, для того чтобы определить продольную и поперечную составляющие реакции, действующие на каждый i -ый активный участок гусеницы, необходимо спроецировать вектор суммарной реакции на оси системы координат $x-y$:

$$R_{xi} = R_{x''i} = -R_i \cos(\gamma_{ki}), \quad (11)$$

$$R_{yi} = R_{y''i} = -R_i \sin(\gamma_{ki}). \quad (12)$$

Таблица 1

Момент сопротивления повороту активного участка гусеницы

Для оценки сопротивлений, вызванных вращательным движением траков, используют разделение поверхности контакта на некоторое количество элементов (так, в работе [12] использовалось разбиение на элементы поверхности каждого трака гусеницы). Таким образом, чтобы определить момент сопротивления повороту, вызванный взаимодействием каждого активного участка гусеницы с ОП при повороте ГМ, разобьем активный участок гусеницы длиной l_k и шириной b_k на n_z элементарных площадок (рис. 3).

С целью анализа характеристик привода ведущих колес ГМ для наиболее тяжелых условий принято допущение, что нормальная реакция, приходящаяся на рассматриваемый активный участок гусеницы, распределена равномерно по его элементарным площадкам. Таким образом, составляющую нормальной реакции, воспринимаемую каждой элементарной площадкой, возможно вычислить как:

$$R_{z^*} = R_z / n_z. \quad (13)$$

Будем считать, что максимальный коэффициент взаимодействия каждой элементарной площадки с опорным основанием описывается эллипсом трения с параметрами $\mu_{sx\max}$ и $\mu_{sy\max}$, то есть такими же, как и для активного участка гусеницы в целом.

Следовательно, в случае движения по несвязному грунту продольную R_{x^*} и поперечную R_{y^*} реакции, реализуемые в контакте каждой элементарной площадки с ОП, возможно вычислить как:

$$R_{x^*} = - \frac{\mu_{sx\max} \mu_{sy\max} v_{ck\dot{x}''}}{\sqrt{\mu_{sx\max}^2 v_{ck\dot{y}''}^2 + \mu_{sy\max}^2 v_{ck\dot{x}''}^2}} \left(1 - e^{-\frac{sk\dot{\theta}}{s0}} \right) R_{z^*}, \quad (14)$$

$$R_{y^*} = - \frac{\mu_{sx\max} \mu_{sy\max} v_{ck\dot{y}''}}{\sqrt{\mu_{sx\max}^2 v_{ck\dot{y}''}^2 + \mu_{sy\max}^2 v_{ck\dot{x}''}^2}} \left(1 - e^{-\frac{sk\dot{\theta}}{s0}} \right) R_{z^*}, \quad (15)$$

где $s_{k\dot{\theta}}$ – коэффициент скольжения рассматриваемой элементарной площадки; $v_{ck\dot{x}''}$ – проекция скорости скольжения рассматриваемой элементарной площадки на ось x'' ; $v_{ck\dot{y}''}$ –

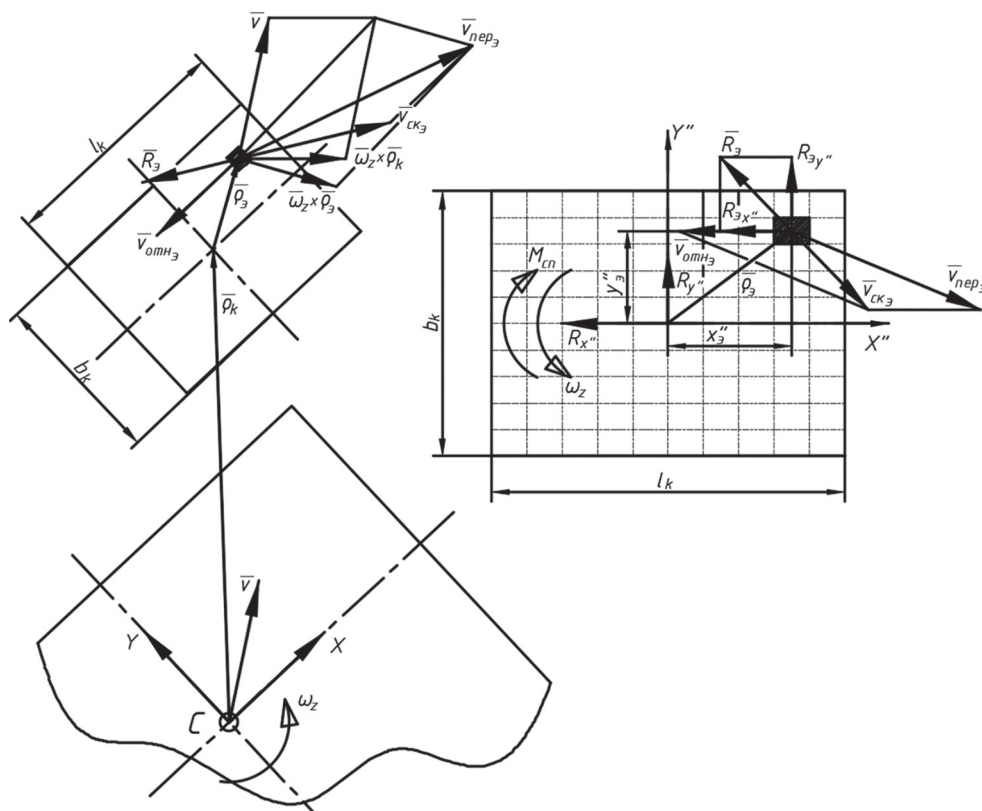


Рис. 3. Схема взаимодействия элементарной площадки активного участка гусеницы с опорным основанием

Fig. 3. The scheme of interaction of the elementary platform of the active section of the caterpillar with the support base

проекция скорости скольжения рассматриваемой элементарной площадки на ось y'' .

Коэффициент скольжения рассматриваемой элементарной площадки определяется аналогично, как и для участка в целом:

$$s_{k\varepsilon} = \frac{\sqrt{v_{ck\varepsilon x''}^2 + v_{ck\varepsilon y''}^2}}{\max(|\vec{v}_{\text{пер}}''|, |\vec{v}_{\text{отн}}''|)}. \quad (16)$$

При этом величина переносной $|\vec{v}_{\text{пер}}''|$ и относительной $|\vec{v}_{\text{отн}}''|$ скорости рассматриваемой элементарной площадки определяется:

$$|\vec{v}_{\text{пер}}''| = \sqrt{v_{\text{пер}\varepsilon x''}^2 + v_{\text{пер}\varepsilon y''}^2}, \quad |\vec{v}_{\text{отн}}''| = |\omega_{\text{вк}} r_{\text{вк}}|, \quad (17)$$

где $v_{\text{пер}\varepsilon x''}, v_{\text{пер}\varepsilon y''}$ – проекции переносной скорости рассматриваемой элементарной площадки на оси x'' и y'' соответственно; $v_{\text{отн}\varepsilon x''}, v_{\text{отн}\varepsilon y''}$ – проекции относительной скорости рассматриваемой элементарной площадки на оси x'' и y'' соответственно.

Проекция переносной и относительной скорости, а также скорости скольжения рассматриваемой элементарной площадки определяются как:

$$v_{ck\varepsilon x''} = v_{\text{пер}\varepsilon x''} + v_{\text{отн}\varepsilon x''}, \quad v_{ck\varepsilon y''} = v_{\text{пер}\varepsilon y''} + v_{\text{отн}\varepsilon y''}, \quad (18)$$

$$v_{\text{пер}\varepsilon x''} = v_x - \omega_z (y_k + y''_j), \quad v_{\text{пер}\varepsilon y''} = v_y + \omega_z (x_k + x''_j), \quad (19)$$

$$v_{\text{отн}\varepsilon x''} = -\omega_{\text{вк}} r_{\text{вк}}, \quad v_{\text{отн}\varepsilon y''} = 0, \quad (20)$$

где x''_j, y''_j – координаты центра рассматриваемой элементарной площадки относительно центра активного участка (в системе координат $x'' - y''$).

Таким образом, суммарную продольную $R_{x''}$ и поперечную $R_{y''}$ реакции, возникающие в контакте активного участка гусеницы с ОП, возможно вычислить как:

$$R_{x''} = \sum_{j=1}^{n_3} R_{\varepsilon x'' j}, \quad R_{y''} = \sum_{j=1}^{n_3} R_{\varepsilon y'' j}. \quad (21)$$

Момент сопротивления повороту $M_{\text{сп}}$ активного участка гусеницы вычисляется как сумма всех моментов, создаваемых продольными $R_{\varepsilon x'' j}$ и поперечными $R_{\varepsilon y'' j}$ реакциями каждой элементарной площадки относительно центра активного участка гусеницы.

$$M_{\text{сп}} = \sum_{j=1}^{n_3} R_{\varepsilon x'' j} y_{\varepsilon j} - \sum_{j=1}^{n_3} R_{\varepsilon y'' j} x_{\varepsilon j}. \quad (22)$$

Результат расчетов по оценке момента сопротивления повороту

На первом этапе с целью определения минимального количества площадок разбиения, необходимых для корректных расчетов, проводится сравнение величины момента сопротивления повороту активного участка гусеницы при различных величинах n_3 . Для анализа был выбран максимальный момент сопротивления повороту, возникающий при вращении активного участка вокруг своего центра. Результаты, полученные для гусениц с геометрическими параметрами БМП-3, ГМ-569 и Т-80, представлены на рис. 4. При расчетах μ_{sxmax} был принят равным 0,85, коэффициент анизотропии $\lambda = \mu_{\text{symax}} / \mu_{\text{sxmax}}$ принят равным 1.

По полученным данным можно сделать вывод, что использовать более 200 площадок разбиения нецелесообразно. При этом даже 70 площадок дают результат, отклоняющийся от предельного значения не более, чем на 10 %.

Вычисление момента сопротивления повороту при помощи разбиения активного участка гусеницы на элементарные площадки требует дополнительных затрат вычислительной мощности, в связи с этим аппроксимируем величину максимального момента сопротивления повороту при помощи следующей зависимости, аналогичной предложенной в работах [13, 14]:

$$M_{\text{спmax}} = \alpha \max(\mu_{\text{sxmax}}, \mu_{\text{symax}}) R_z \sqrt{l_k b_k}, \quad (23)$$

где α – аппроксимирующий коэффициент.

Для определения коэффициента α необходимо провести ряд вычислительных экспериментов. Найдем величину α для различных соотношений между размерами активного участка гусеницы l_k / b_k , а также различных коэффициентов анизотропии $\lambda = \mu_{\text{symax}} / \mu_{\text{sxmax}}$, используя разбиение активного участка гусеницы на элементарные площадки:

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{n_3} R_{\varepsilon x'' j} y_{\varepsilon j} - \sum_{j=1}^{n_3} R_{\varepsilon y'' j} x_{\varepsilon j}}{\max(\mu_{\text{sxmax}}, \mu_{\text{symax}}) R_z \sqrt{l_k b_k}}. \quad (24)$$

Вычисления также проводились для случая вращения активного участка гусеницы вокруг своего центра. Полученные результаты представлены на рис. 5. Установлено, что коэффициент α при принятых допущениях не зависит от общей площади активного участка гусеницы и нормальной реакции R_z .

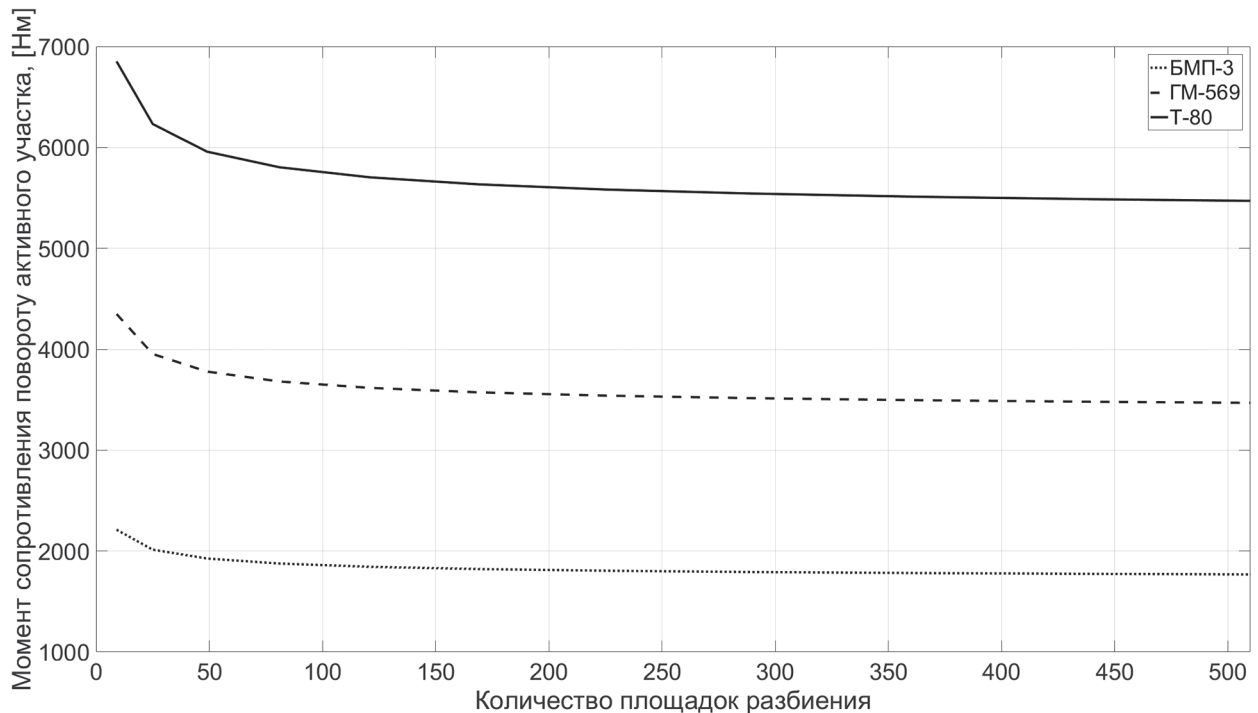


Рис. 4. Зависимость момента сопротивления повороту от количества площадок разбиения активного участка гусеницы

Fig. 4. Dependence of the moment of resistance to turning on the number of pads for splitting the active section of the caterpillar

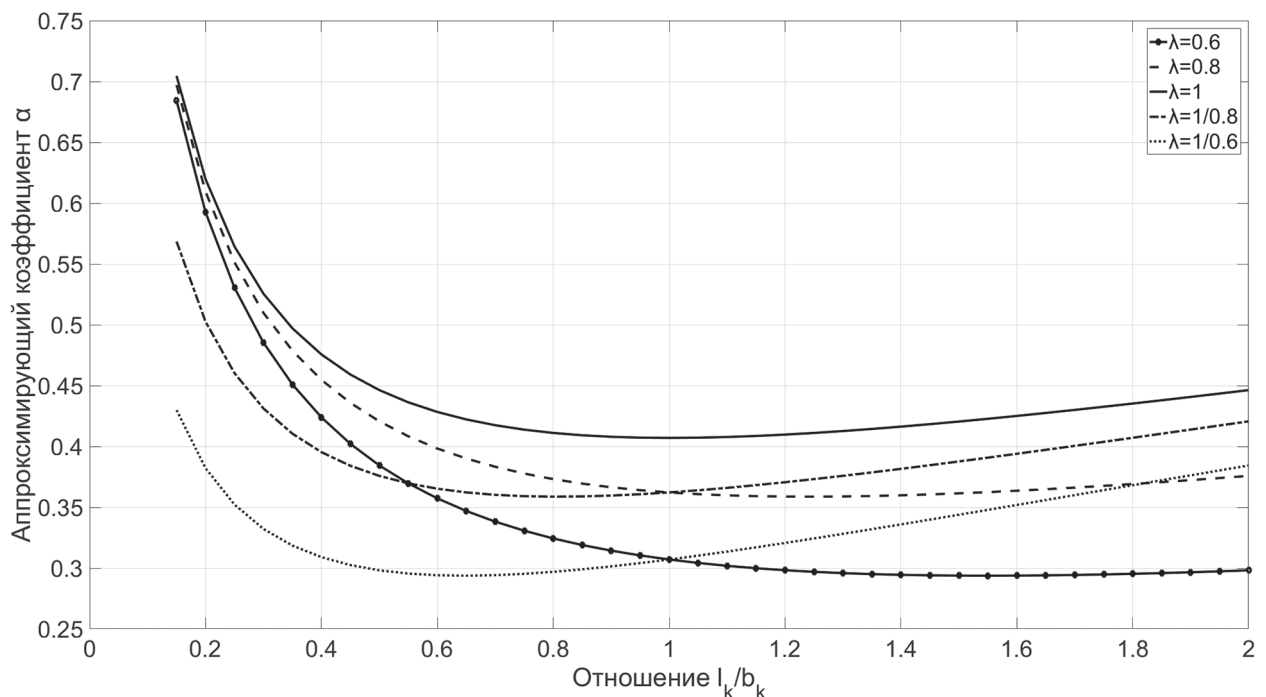


Рис. 5. Зависимость аппроксимирующего коэффициента α от отношения l_k/b_k

Fig. 5. Dependence of the approximating coefficient α on the ratio l_k/b_k

Как видно из рис. 5, коэффициент α существенно возрастает в случае снижения l_k/b_k менее 0,5. Кроме того, коэффициент анизотропии оказывает существенное влияние на величину α при больших отношениях l_k/b_k .

Рассмотрим геометрические размеры траков ряда ГМ:

- БМП-3: длина трака порядка 150 мм, ширина порядка 380 мм;
- ГМ-569: длина трака порядка 125 мм, ширина порядка 500 мм;

– Т-80: длина трака порядка 165 мм, ширина порядка 580 мм.

Считая, что ширина активного участка гусеницы b_k соответствует ширине трака, а длина l_k – длине двух траков, при движении по ОП типа «плотный грунт» активные участки гусениц будут иметь следующие размеры:

БМП-3: $l_k = 300$ мм, $b_k = 380$ мм, $l_k / b_k = 0,79$;

ГМ-569: $l_k = 250$ мм, $b_k = 500$ мм, $l_k / b_k = 0,5$;

Т-80: $l_k = 330$ мм, $b_k = 580$ мм, $l_k / b_k = 0,57$.

Таким образом, можно сделать вывод, что для большинства ГМ при принятых допущениях соотношение l_k / b_k находится в пределах от 0,5 до 1. Кроме того, коэффициент анизотропии для транспортных ГМ желательно выбирать близким к единице.

Таким образом, на рис. 5 можно выделить диапазон, который охватывает большинство транспортных ГМ (отношение l_k / b_k от 0,5 до 1, коэффициент анизотропии от 0,8 до 1). В данном диапазоне коэффициент α изменяется в достаточно узких пределах, что дает возможность выбрать его в среднем на уровне $\alpha = 0,4$.

С целью вычисления момента сопротивления повороту активного участка гусеницы при движении по траектории некоторой кривизны аппроксимируем величину этого момента следующей зависимостью, полученной по аналогии с формулой А.О. Никитина для коэффициента сопротивления повороту [15]:

$$M_{\text{сп}} = \frac{M_{\text{сп max}}}{1 + \frac{\beta}{k_s b_k}}, \quad (25)$$

где β – аппроксимирующий коэффициент; k_s – кривизна траектории движения активного участка гусеницы.

Для определения коэффициента β при различной ширине активного участка гусеницы b_k и кривизне траектории движения k_s также используем подход, основывающийся на разбиении активного участка на элементарные площадки.

$$\beta = \left(\frac{M_{\text{сп max}}}{\sum_{j=1}^{n_3} R_{\text{э}x^*j} y_{\text{э}j} - \sum_{j=1}^{n_3} R_{\text{э}y^*j} x_{\text{э}j}} - 1 \right) k_s b_k. \quad (26)$$

При расчетах коэффициент скольжения центра активного участка был принят равным 0. Для вычисления коэффициента β величина $M_{\text{сп max}}$ определялась при вращении активного участка гусеницы вокруг своего центра. Результаты численных экспериментов приведены на рис. 6.

Как видно из представленного рис. 6, для ширины активного участка гусеницы (b_k) большей чем 0,4 м, а также радиуса поворота более 5 м коэффициент β изменяется в достаточно узких пределах, что дает возможность

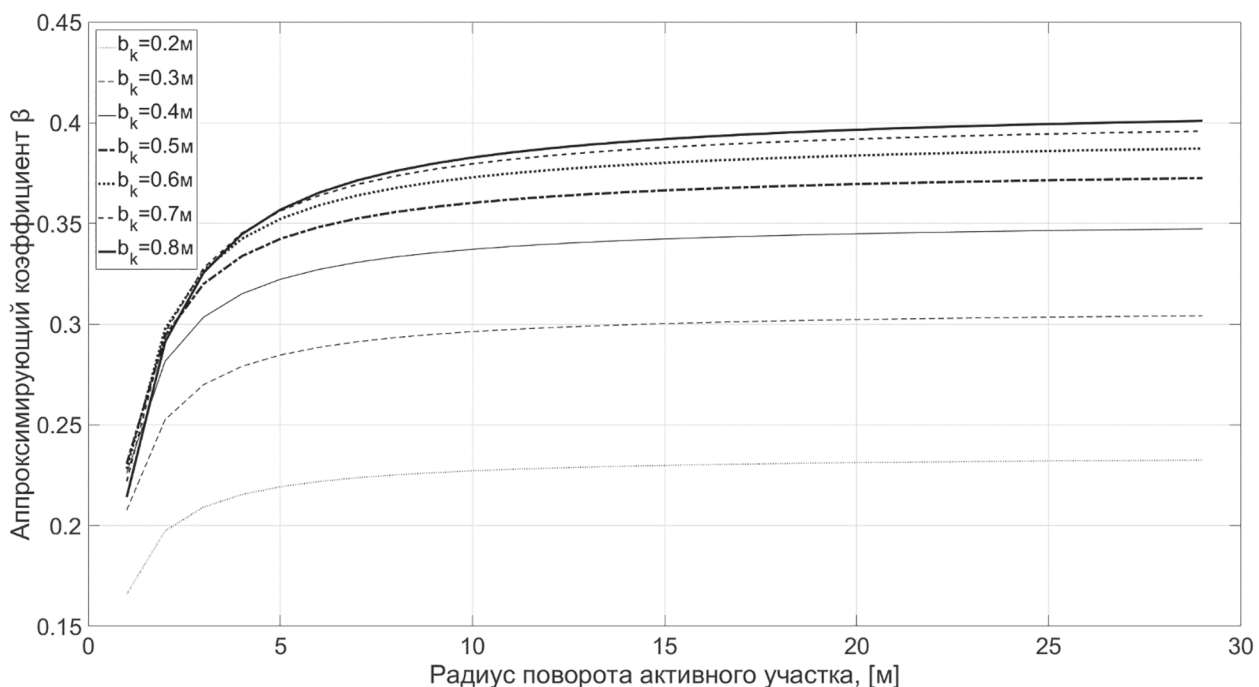


Рис. 6. Зависимость аппроксимирующего коэффициента β от радиуса поворота активного участка гусеницы

Fig. 6. Dependence of the approximating coefficient β from the turning radius of the active track section

выбрать его в среднем на уровне $\beta = 0,37$ для большинства транспортных ГМ.

Таким образом, на основании численных экспериментов была получена следующая зависимость для определения момента сопротивления повороту, обусловленного взаимодействием i -ого активного участка гусеницы с ОП:

$$M_{\text{спmax}i} = 0,4 \max(\mu_{\text{sxmax}}, \mu_{\text{symax}}) R_{zi} \sqrt{l_k b_k}; \quad (27)$$

$$M_{\text{сп}i} = \frac{M_{\text{спmax}i}}{1 + \frac{0,37}{k_{si} b_k}}, \quad (28)$$

где k_{si} – кривизна траектории i -ого активного участка гусеницы ГМ; R_{zi} – нормальная реакция, действующая на активный участок гусеницы под i -ым катком.

При этом кривизну траектории, по которой движется i -ый активный участок гусеницы k_{si} , возможно определить как:

$$k_{si} = \frac{|\omega_z|}{|\vec{v}_{\text{пер}i}|}, \quad (29)$$

где $|\vec{v}_{\text{пер}i}|$ – величина переносной скорости центра i -ого катка.

Иллюстрация сравнения результатов, получаемых при помощи аппроксимирующих формул, с подходом, основанным на разбиении

активного участка гусеницы на элементарные площадки, представлена на рис. 7.

Как видно из рис. 7, полученная аппроксимирующая зависимость и поэлементная модель активного участка гусеницы дают близкие результаты для распространенных типов ГМ. При этом в случае применения широких гусениц ($b_k \rightarrow B/2$) аппроксимирующая зависимость дает заниженный результат. В этом случае коэффициенты α и β рекомендуется выбирать непосредственно из диаграмм на рис. 5 и 6, либо использовать моделирование с разбиением пятна контакта на элементарные участки.

Сравним сумму моментов сопротивления повороту, обусловленных взаимодействием каждого активного участка гусеницы с ОП при повороте ГМ, с общим моментом сопротивления повороту, включающим влияние поперечных реакций R_{yi} , действующих на активные участки гусениц под i -ми катками. Результаты проведенной оценки представлены на рис. 8–11. Расчеты проводились на скорости движения ГМ равной $0,1v_z = 0,1\sqrt{\mu_{\text{symax}} g R_f}$, где R_f – фактический радиус поворота ГМ.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что сумма моментов сопротивления повороту активных участков гусениц для типовых ГМ почти на два порядка ниже, чем общий момент сопротивления повороту,

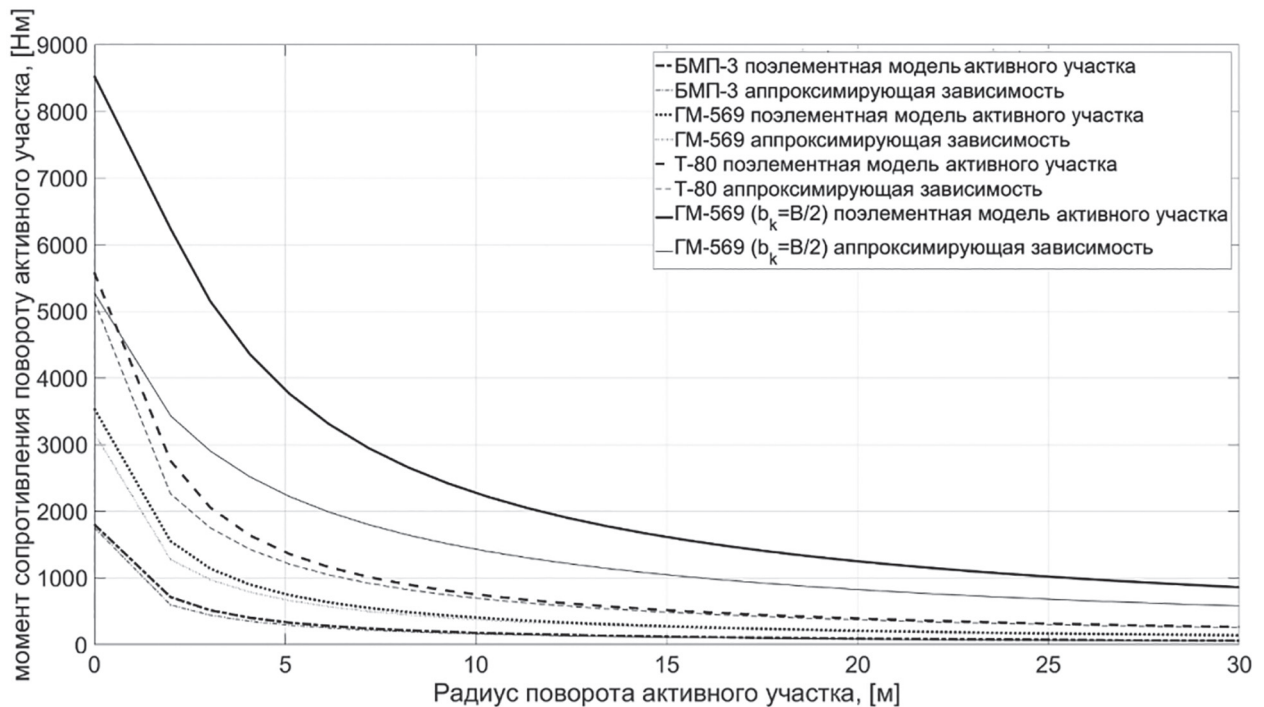


Рис. 7. Результаты численных экспериментов по определению момента сопротивления повороту

Fig. 7. Results of numerical experiments to determine the moment of cornering resistance

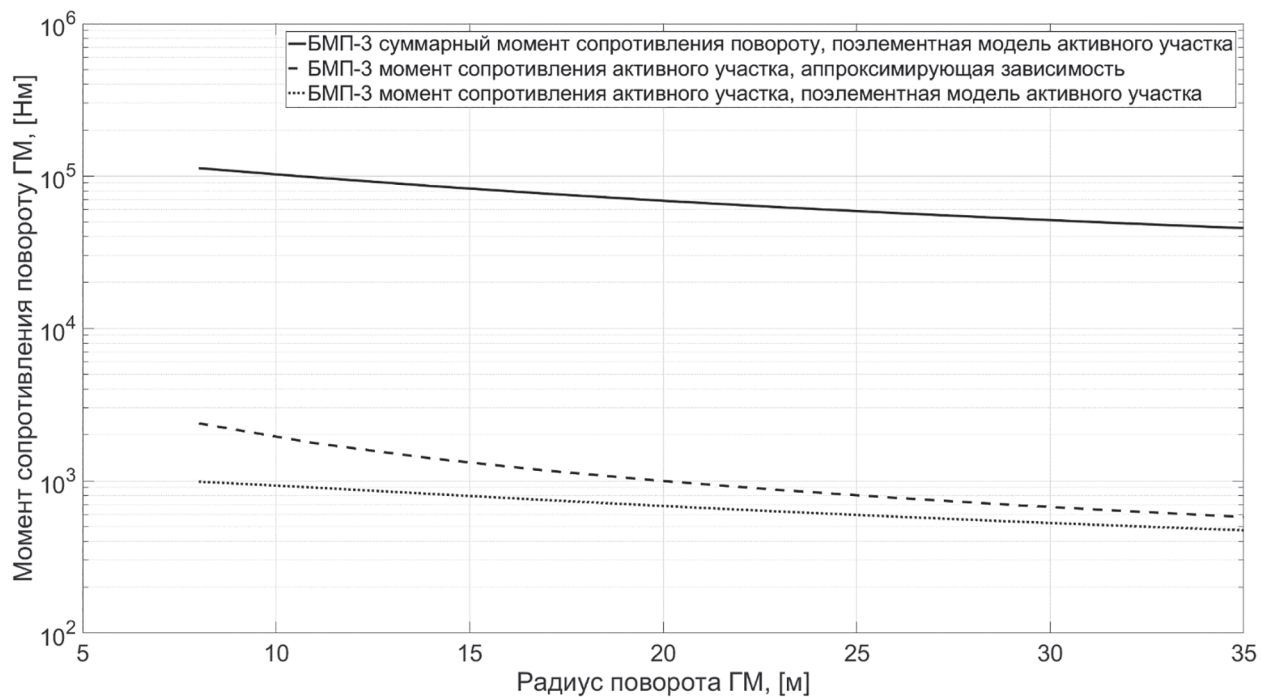


Рис. 8. Результаты численных экспериментов определения момента сопротивления повороту, возникающего в активном участке гусеницы, с суммарным моментом сопротивления повороту для БМП-3

Fig. 8. Results of numerical experiments for determining the moment of resistance to turning, arising in the active section of the caterpillar, with the total moment of cornering resistance for BMP-3

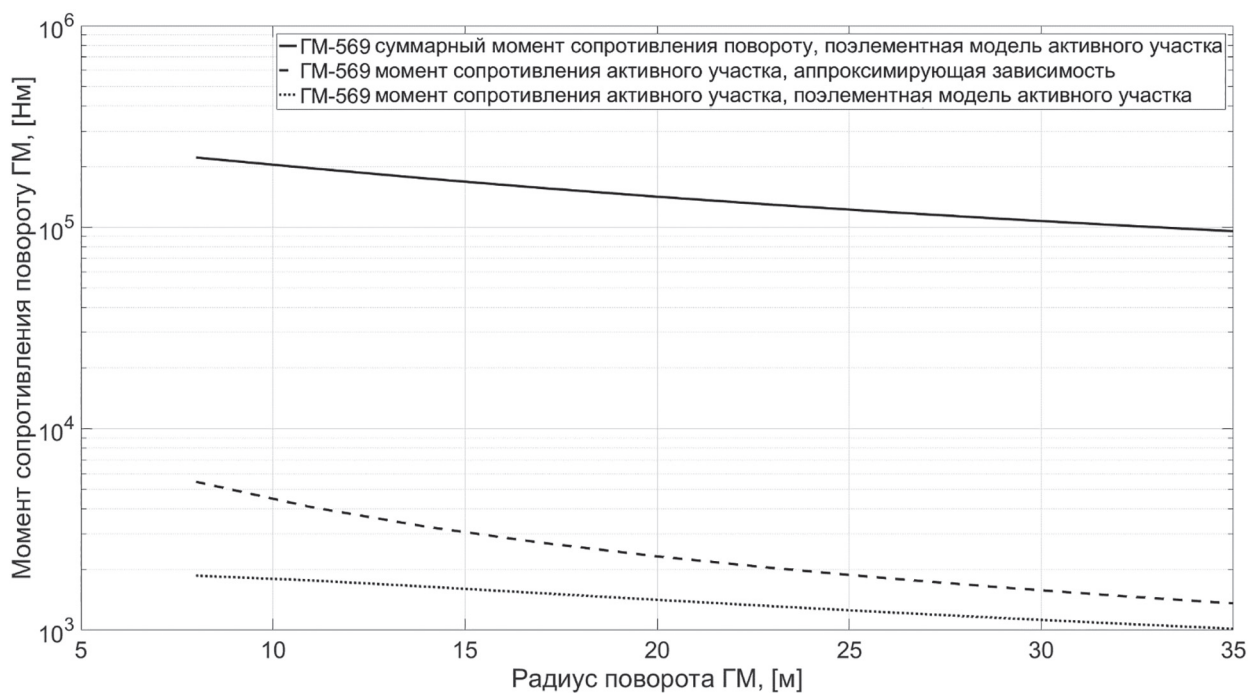


Рис. 9. Результаты численных экспериментов определения момента сопротивления повороту, возникающего в активном участке гусеницы, с суммарным моментом сопротивления повороту для ГМ-569

Fig. 9. Results of numerical experiments for determining the moment of cornering resistance, arising in the active section of the caterpillar, with the total moment of cornering resistance for GM-569

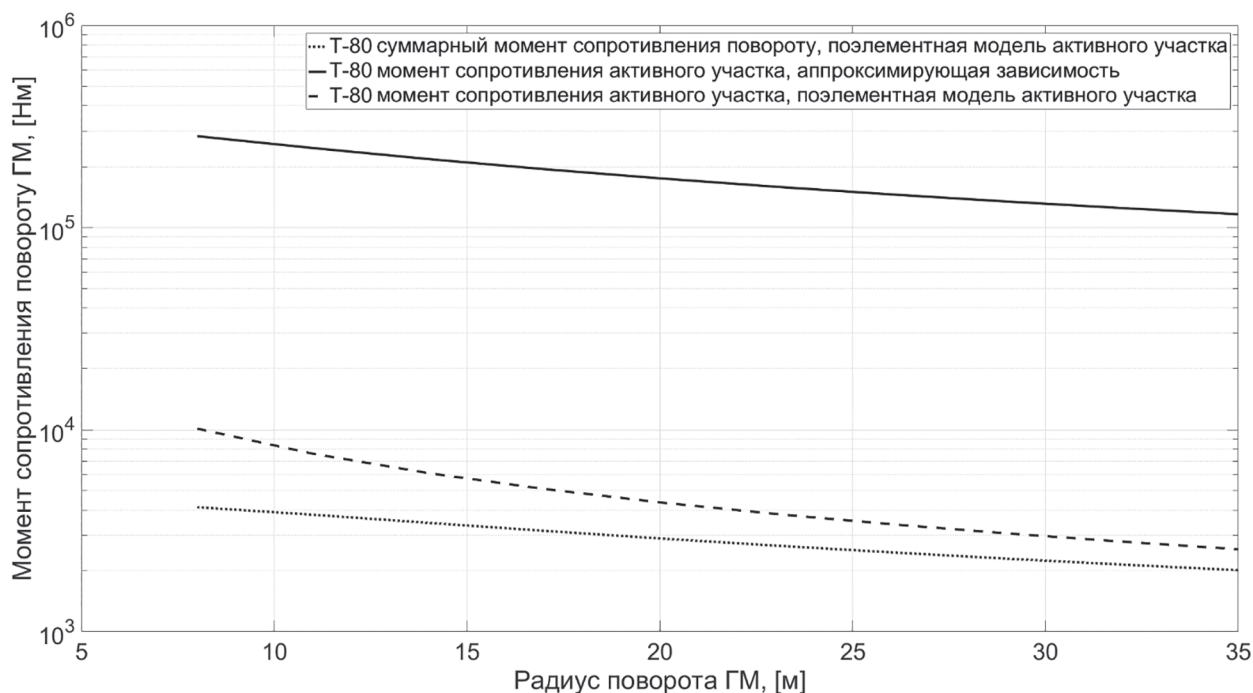


Рис. 10. Результаты численных экспериментов определения момента сопротивления повороту, возникающего в активном участке гусеницы, с суммарным моментом сопротивления повороту Т-80

Fig. 10. Results of numerical experiments for determining the moment of resistance to turning, which occurs in the active section of the track, with the total moment of cornering resistance of T-80

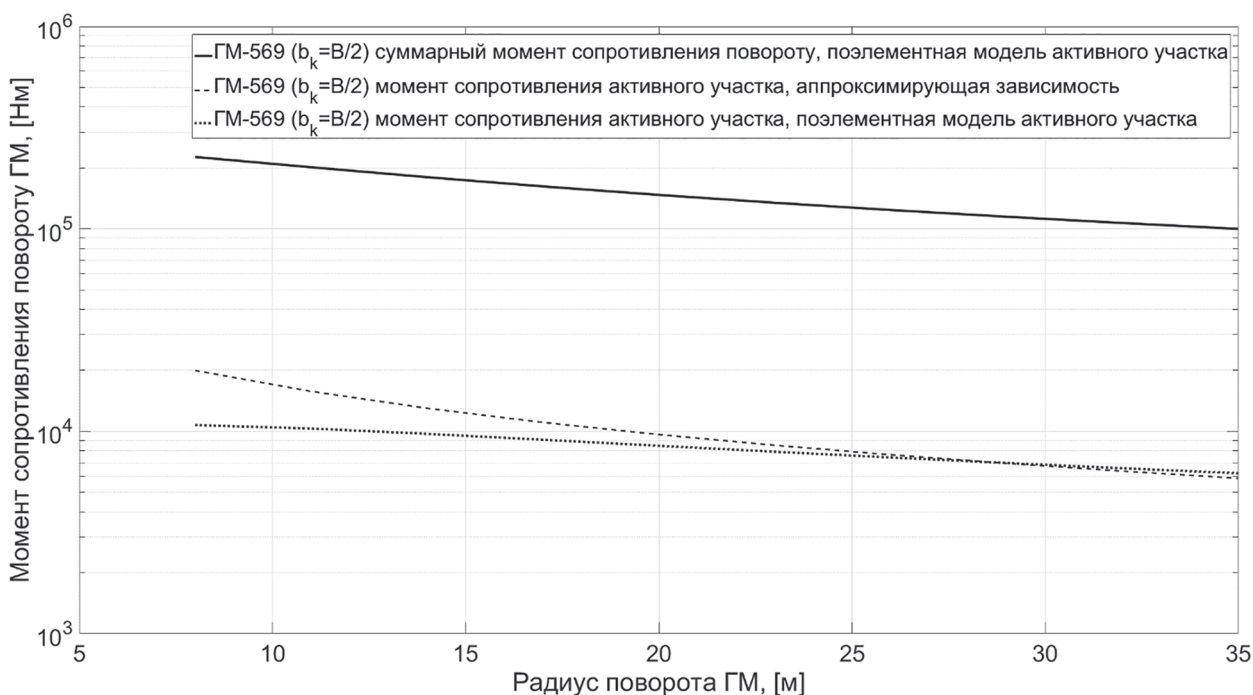


Рис. 11. Результаты численных экспериментов определения момента сопротивления повороту, возникающего в активном участке гусеницы, с суммарным моментом сопротивления повороту для ГМ-569 ($b_k = B/2$)

Fig. 11. Results of numerical experiments for determining the moment of cornering resistance, arising in the active section of the caterpillar, with the total moment of cornering resistance for GM-569 ($b_k = B/2$)

то есть оказывает низкое влияние на динамику поворота. В случае применения широких гусениц ($b_k \rightarrow B/2$) указанные величины отличаются всего на один порядок.

Вывод

Таким образом были проведены исследования по определению момента сопротивления повороту активных участков гусеницы, находящихся под опорными катками. Для этого использовалась модель, позволяющая разбивать пятно контакта на конечное число элементарных площадок. Для приблизительного определения момента сопротивления повороту активных участков гусеницы предложены зависимости (27) и (28).

Показано, что при исследовании большинства типов гусеничных машин вычисление момента сопротивления повороту активных участков гусеницы не имеет практического смысла. Однако указанный момент сопротивления необходимо учитывать в случае проведения расчетов для машин с широкими гусеницами (снегоходов, болотоходов и т.д.).

Литература

1. Kitano M., Jyozaki H. A Theoretical Analysis of Steerability of Tracked Vehicle // Journal of Terramechanics. 1976. Vol. 13. No. 4. Pp. 241–258.
2. Kitano M., Kuma M. An Analysis of Horizontal Plane Motion of Tracked Vehicles. Journal of Terramechanics. 1977. Vol. 14. No. 4. Pp. 211–226.
3. Kitano M., Watanabe K., Takaba Y., Togo K. Lane-Change Maneuver of High Speed Tracked Vehicles. Journal of terramechanics. 1988. Vol. 25. No. 2. Pp. 91–102.
4. Красненьков В.И., Харитонов С.А. Динамика криволинейного движения транспортной гусеничной машины // Труды МВТУ. 1980. № 339. С. 3–67.
5. Бекетов С. А. Теория управляемого движения гусеничных машин. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. 125 с.
6. Павлов В.В. Теория поворота гусеничных транспортных машин. Учебное пособие. М.: МАДИ (ТУ). 2000. 224 с.
7. Красненьков В.И., Ловцов Ю.И., Быкоянко А.В. Нормальные давления под гусеницей // Труды МВТУ. 1982. № 390. С. 3–12.
8. Васильев А.В. Докучаева Е.Н. [и др.]. Влияние конструктивных параметров гусеничного трактора на его тягово-сцепные свойства / М: Машиностроение. 1969. 196 с.

9. Опейко Ф.А. Экспериментальное исследование анизотропного трения // МИМЭСХ: Сб. научно-технических трудов. М.: Советская наука. 1952. С. 57–64.
10. Антонов А.С., Благоднаров А.И., Бинович Я.Е. [и др.]. Танки основы теории и расчета / Под ред. М.К. Кристи. Москва/Ленинград: Главная редакция машиностроительной и автотракторной литературы. 1937. 436 с.
11. Платонов В.Ф., Леиашвили Г.Р. Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины. М.: Машиностроение. 1986. 296 с.
12. Mehmet Nuri Cizdemir, Varlık Kılız, Y. Samim Bnlısoy. A new contact & slip model for tracked vehicle transient dynamics on hard ground // Journal of Terramechanics. 2017. № 73. P. 3–23. doi: 10.1016/j.jterra.2017.07.001.
13. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение. 1990. 352 с.
14. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. М.: Машиностроение. 1970. 176 с.
15. Никитин А.О. Теория танка. М.: Типография Военной ордена Ленина академии бронетанковых войск, 1962. 584 с.

References

1. Kitano M., Jyozaki H. A Theoretical Analysis of Steerability of Tracked Vehicle // Journal of Terramechanics. 1976. Vol. 13. No. 4. Pp. 241–258.
2. Kitano M., Kuma M. An Analysis of Horizontal Plane Motion of Tracked Vehicles. Journal of Terramechanics. 1977. Vol. 14. No. 4. Pp. 211–226.
3. Kitano M., Watanabe K., Takaba Y., Togo K. Lane-Change Maneuver of High Speed Tracked Vehicles. Journal of terramechanics. 1988. Vol. 25. No. 2. Pp. 91–102.
4. Krasnen'kov V.I., Kharitonov S.A. Dynamics of curved movement of a transport tracked vehicle. Trudy MVTU. 1980. No 339, pp. 3–67 (in Russ.).
5. Beketov S.A. Teoriya upravlyayemogo dvizheniya gusenichnykh mashin [The theory of controlled movement of tracked vehicles]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman Publ. 2017. 125 p.
6. Pavlov V.V. Teoriya povorota gusenichnykh transportnykh mashin [The theory of turning of tracked transport vehicles]. Uchebnoye posobiye. Moscow: MADI(TU) Publ. 2000. 224 p.
7. Krasnen'kov V.I., Lovtsov YU.I., Bykoyanko A.V. Normal pressures under the track. Trudy MVTU. 1982. No 390, pp. 3–12 (in Russ.).

8. Vasil'yev A.V. Dokuchayeva YE.N. [i dr.]. Vliyaniye konstruktivnykh parametrov gusenichnogo traktora na yego tyagovo-stsepnyye svoystva [Influence of design parameters of a caterpillar tractor on its traction and coupling properties]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1969. 196 p.
9. Opeyko F.A. Experimental study of anisotropic friction. MIM·ESKH: Sb. nauchno-tekhnicheskikh trudov. Moscow: Sovetskaya nauka Publ., 1952, pp. 57–64 (in Russ.).
10. Antonov A.S., Blagonravov A.I., Binovich YA.E. [i dr.]. Tanki osnovy teorii i rascheta [Tanks fundamentals of theory and calculation]. Pod red. M.K. Kri-sti. Moskva/Leningrad: Glavnaya redaktsiya mashinostroitel'noy i avtotraktornoy literatury Publ. 1937. 436 p.
11. Platonov V.F., Leishvili G.R. Gusenichn-yye i kole-sn-yye transportno-tyagov-yye mashiny [Tracked and wheeled transport and traction vehicles]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ. 1986. 296 p.
12. Mehmet Nuri Iqzdemir, Varlık Kılız, Y. Samim Bnlısoy. A new contact & slip model for tracked vehicle transient dynamics on hard ground. Journal of Terramechanics. 2017. No 73. P. 3–23. doi: 10.1016/j.jterra.2017.07.001.
13. Smirnov G.A. Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin [The theory of motion of wheeled vehicles]: Uchebnik dlya studentov mashinostroitel'nykh spetsial'nostey vuzov. 2-e izd., dop. i pererab. Moscow: Mashinostroyeniye Publ. 1990. 352 p.
14. Farobin YA.E. Teoriya povorota transportnykh mashin [The theory of turning of transport vehicles]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ. 1970. 176 p.
15. Nikitin A.O. Teoriya tanka [Tank theory]. Moscow: Tipografiya Voennoy ordena Lenina akademii bronetankovykh voysk Publ., 1962. 584 p.

INVESTIGATION OF THE COMPONENTS OF THE CORNERING RESISTANCE OF A TRACKED VEHICLE ON A SOLID SUPPORT BASE

PhD in Engineering **B.V. Padalkin**
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
padalkin@bmstu.ru

The purpose of the study is to increase the completeness and reliability of approaches to determining the components of the cornering resistance a tracked vehicle, as well as to create a method for their assessment, which will be suitable for practical calculations.

The article analyzes two components of the moment of cornering resistance of the tracked vehicle, which can be distinguished if we consider the interaction of the caterpillar with the support base through separate contact spots (active sections of the tracks located under the road wheels). The first component arises from the linear movement of the active sections of the tracks. The second is caused by the rotational movement of the contact patch about the vertical axis.

The paper presents a mathematical model of the interaction of the propeller and a dense support base, which makes it possible to study the dependence of the components of the moment of cornering resistance on the geometric parameters of the undercarriage of a tracked vehicle. The horizontal reaction force in this case is presented as a function of the slip coefficient. The possibility of realizing various adhesion qualities of the propulsion unit in the longitudinal and transverse directions of sliding is provided. The model assumes a preliminary division of the contact patch into a finite number of elementary areas. Since the number of elementary sites affects the result, the article conducted a study to determine the minimum number of sites to ensure acceptable accuracy.

An analysis of the expressions available in the literature was carried out to determine the specified component of the cornering resistance. The new empirical relationships that better agree with the mathematical model were proposed. The study of several existing tracked vehicles, differing in the mass and size of the track support surface, made it possible to conclude that it is advisable to take into account the moment of cornering resistance of the contact patch for various types of tracked vehicles.

Keywords: tracked vehicle, turn, cornering resistance, active track area.

Cite as: Padalkin B.V. Investigation of the components of the cornering resistance of a tracked vehicle on a solid support base. Izvestiya MGТУ «MAMI». 2021. No 2 (48), pp. 51–62 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-51-62.