

УДК 629.367

Павлов Владимир Викторович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, wp46@bk.ru

ФОРМУЛА А.О. НИКИТИНА – РЕВОЛЮЦИОННЫЙ ПРОРЫВ В ТЕОРИИ ПОВОРОТА ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

Аннотация. Рассмотрены основные работы по теории поворота гусеничных машин (ГМ), приведены и проанализированы расчетные формулы определения момента и коэффициента сопротивления повороту ГМ различных авторов, исследованы достоинства и недостатки, выполнена количественная и качественная оценка возможности их применения для расчетов криволинейного движения и тяговых свойств гусеничных машин.

Ключевые слова: гусеничные машины, коэффициент сопротивления повороту, расчетные формулы, физический смысл формул.

Pavlov Vladimir V., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, wp46@bk.ru

FORMULA A.O. NIKITINA – A REVOLUTIONARY BREAKTHROUGH IN THE TURNING THEORY TRACKED VEHICLE

Abstract. The main work on the theory of rotation of tracked vehicles (GM), are presented and analyzed formulas determine the moment and turn GM drag coefficient of different authors, studied their advantages and disadvantages, made a quantitative and qualitative assessment of their application for the calculation of curvilinear motion GM and traction properties.

Key words: tracked vehicles, turn the drag coefficient, calculation formulas, the physical meaning of the formulas.

Введение

Написанию настоящей статьи автора подвигло появление в последнее время ряда научных исследований и публикаций в отечественной прессе о создании математических моделей поворота ГМ и необоснованности ряда высказываний об ошибочности применения известной формулы доктора

технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Алексея Осиповича Никитина (1903–1974) [1].

Исторические факты

Наука – «Теория поворота гусеничных машин» (тракторов, и особенно быстроходных гусеничных машин – танков и пр.) в СССР стала усиленно развиваться практически в начале 1930-х гг., несмотря на появление первых отечественных тракторов в середине 18-го в. До середины 1920-х гг. страна не имела ни танковой промышленности, ни опытных кадров конструкторов и танкостроителей. В первой половине 1930-х гг., наряду с перевооружением бронетанковых войск, широкое развитие получила отечественная военная наука. В развитии отечественной теории гусеничных машин большую роль сыграли исследования Львова Е.Д., Заславского В.И., Медведева М.И., Кристи М.К. и других ученых, важность которых заключалось в подробном качественном анализе внешних сил и моментов, действующих на гусеницы в процессе движения ГМ и взаимодействия движителя с грунтом.

Основу подсчета силовых параметров (силы тяги и торможения) на основании уравнений моментов $\sum M_{oi=1,2} = 0$ (рис. 1) составляет зависимость момента сопротивления повороту (по Заславскому) $M_c = \mu GL/4$ (G – вес ГМ, L – база или длина опорной поверхности гусеницы, μ – коэффициент сопротивления повороту).

Развитие теории поворота ГМ происходило с использованием различных подходов, в частности, с применением эмпирических, обоснованных экспериментом, моделей определения μ как некоторого обобщенного коэффициента, учитывающего все силовые факторы взаимодействия гусениц с грунтом и зависящего, прежде всего, от радиуса поворота. В работах авторов [2–5] данное направление развивалось и совершенствовалось.

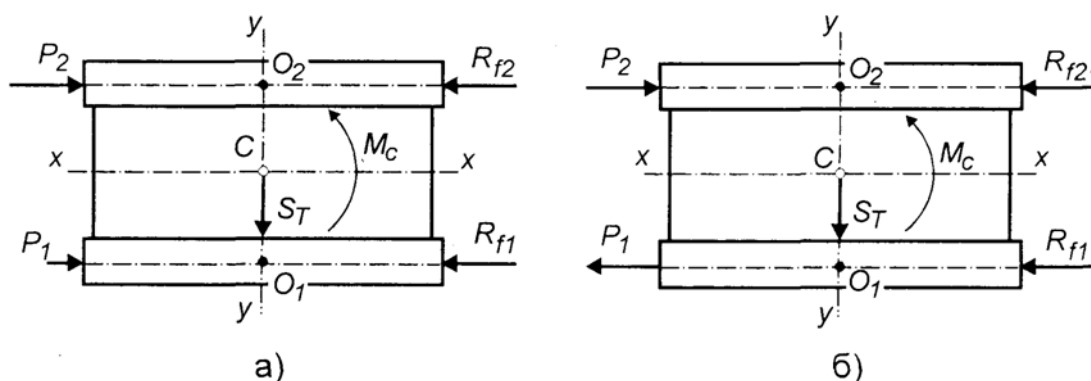


Рис. 1. Схема сил и моментов, действующих на ГМ при повороте:
а) P_1 – сила тяги на отстающей гусенице; б) P_1 – то же, тормозная сила;
 M_c – момент сопротивления повороту ГМ; $i = 1, 2$ – индекс гусеницы

Кинематика поворота ГМ и формула А.О. Никитина

Поворот ГМ происходит под действием движущих сил при изменении соотношения линейных скоростей гусениц ($V_2:V_1$) и угловой скорости поворота ω (рис. 2).

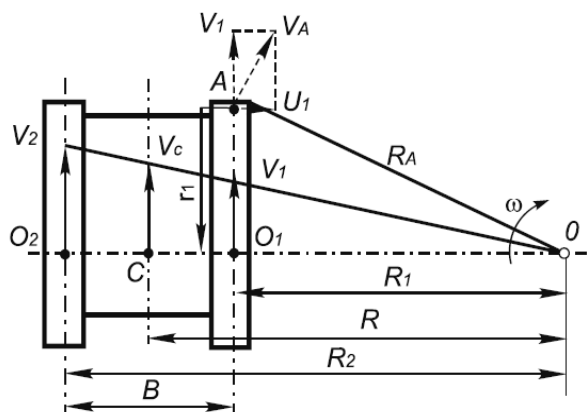


Рис. 2. Кинематика поворота ГМ на плоскости: C – центр масс ГМ; B – колея;
 O – полюс поворота ГМ; 1, 2 – индексы: «1» отстающей и «2» забегающей гусеницы

Основным параметром, характеризующим криволинейное движение машины и сопротивление повороту, является радиус R . Заметим, что рассматривая поворот ГМ на плоскости, ряд ученых исходят из того, что расчетный радиус поворота определяется по забегающей гусенице ($R_2 = R + B/2$), однако целесообразнее это делать по центру масс ГМ (R). Такой

подход наиболее удобен при рассмотрении динамики движения ГМ, как системы, на плоскости.

До исследований А.О. Никитина ученые-танкисты считали, что сопротивление повороту – величина постоянная и не зависит от радиуса поворота. Именно его исследованиями установлена гиперболическая зависимость $\mu = f(R)$, что потребовало коренного пересмотра методов оценки тяговых качеств танков и других ГМ при повороте и выборе мощностных параметров двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В учебнике «Танки», изданном в 1944 году Н.И. Груздевым, теория танков была изложена без учета исследований А.О. Никитина, но в процессе издания учебника им была включена в текст ссылка на первую формулу Никитина: $\mu = 4\mu_{\max}/(3 + R/B)$, где B – колея машины, $\mu_{\max}$ – максимальное значение коэффициента μ при повороте. Максимальное значение коэффициента $\mu_{\max}$ принято для случая движения ГМ с радиусом поворота относительно заторможенной отстающей гусеницы, когда возникает наибольшее сопротивление из-за юза этой гусеницы и значительного нагребания вала грунта торцевой частью гусениц.

Формула Никитина А.О. широко используется в различных вариантах и по настоящее время, поскольку она проверена на множестве объектов гусеничной техники и дает хорошую сходимость с опытными данными [4]. В дальнейшем, работая в МАДИ, свою формулу Никитин А.О. уточнил и несколько видоизменил, сохранив ее физический смысл:

Формула Никитина:

$$\mu = \mu_{\max}/(a + b \cdot R/B), \quad (1)$$

где a , b – эмпирические коэффициенты (если радиус поворота равен теоретическому радиусу по забегающей гусенице, т.е. $R = R_2$, то коэффициент $a = 0,85$; если R выбран по центру машины и $R_{\min} = B/2$, то $a = 0,925$); коэффициент $b = 0,15$ в обоих случаях, а $\mu \rightarrow \mu_{\max}$.

Другие известные эмпирические зависимости $\mu = f(R)$, полученные по результатам экспериментов, имеют существенные недостатки, которые рассмотрены ниже.

Формулы зависимости $\mu = f(R)$ других авторов

Формула Крылова:

$$\mu = [0,3 + 3/(4 + R/B)]\mu_{\max}. \quad (2)$$

Формула Исаева:

$$\mu = A - B \cdot R + C/R. \quad (3)$$

Формула Заверняева:

$$\mu = ae^{-bR/B}. \quad (4)$$

В формуле (1), если радиус поворота $R \rightarrow B/2$ или $R \rightarrow B$ (при $R = R_2$), то сумма коэффициентов ($a + b = 1$) и $\mu \rightarrow \mu_{\max}$ (при повороте ГМ вокруг отстающей гусеницы); при $R \rightarrow \infty$ получаем, что $\mu \rightarrow 0$ (прямолинейное движение, когда сопротивление повороту отсутствует). Для сравнения приведем значения $\mu_{\max}$ и коэффициента сопротивления грунта качению f по формулам (1) и (2). Расхождение в данных табл. 1 можно объяснить «разбросом» параметров грунта, особенно его влажности, и различными экспериментальными методами их определения. При этом по формуле (2) при $R \rightarrow \infty \mu \rightarrow 0,3\mu_{\max}$, что не соответствует прямолинейному движению ГМ.

Таблица 1

Экспериментальные значения коэффициентов f и $\mu_{\max}$

Дорожные условия	По данным А.О. Никитина		По данным Л.К. Крылова	
	f	$\mu_{\max}$	f	$\mu_{\max}$
Грунтовая дорога	0,03...0,04	0,7...0,9	0,08	0,70
Суглинок	0,06...0,08	0,8...1,0	0,07	0,75
Снег	0,07...0,22	0,25...0,70	0,2	0,5

Многочисленность коэффициентов (A , B , C), зависящих от конструктивных параметров ГМ и свойств грунта, в формуле Исаева Е.Г. (табл. 2) затрудняет её практическое использование. Эта формула индивидуальна для каждой конкретной машины и грунта [2]. Кроме того, при некотором конечном значении R коэффициент $\mu = 0$, а при $R \rightarrow \infty$ физический смысл данной формулы из-за второго слагаемого формулы вообще теряется. Формула (3) проверена при $R = 0,5B \dots 20B$. При $R > 20B$ в формуле (3) коэффициент $B \rightarrow 0$ так же, как и значение обобщенного коэффициента μ [3]. Плотность грунта не характеризует полностью его свойства.

Таблица 2

Значения коэффициентов в формуле (3)

Коэффициент	Плотность грунта по числу ударов плотномера Союздорнии		
	1...4	5...8	9...16
A	0,3...0,4	0,4...0,5	0,5...0,6
B	0,004...0,010	0,005...0,012	0,010...0,015
C	0,6...0,7	0,4...0,5	0,2

Выполненные расчеты по формуле Крылова Л.К. и Никитина А.О. при одном значении $\mu_{\max} = 0,8$ и $B = \text{const}$, когда $R \geq 4,5B$, дают расхождение в коэффициенте μ более 9%, еще больше при свободном радиусе поворота ($51B$) – 186% не в пользу выражения (2), что нереально и подтверждается экспериментами. При повороте с $R = B$ формула Заверняева А.К. дает заниженные результаты, а эмпирические коэффициенты (a , b) трудоемки для определения. Она не нашла широкого использования в теории ГМ другими авторами.

Линейная зависимость формулы Антонова, приведенная в [5]:

$$\mu = \mu_{\max}(1,2 - 0,4R/B) \quad (5)$$

вообще лишена всякого смысла и не отражает физических процессов деформирования грунта гусеницами при повороте ГМ [3, 4] и

рекомендуется при $R < B/2$ [5]. Использование формулы (5) для анализа поворота ГМ с $R = 0$ увеличивает существенно величину коэффициента μ , что противоречит, например, исследованиям Исаева Е.Г. В его работе [6] указано, что на типовом грунте коэффициент $\mu = 0,72$ при радиусе $R = 0,5B$, а при повороте с нулевым радиусом он в среднем меньше на 15% и составляет порядка 0,61. Поэтому исследования данного случая поворота ГМ из-за противоречивости результатов следует продолжить.

Формула Никитина А.О., проверенная многочисленными экспериментами, используется во множестве научных работ до сих пор как наиболее правдоподобная, например в [7, 8] и др. В работе [9] Балдиным В.А. эта формула предложена в виде:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} - A}{a + (1 - a)R/B} + A, \quad (6)$$

где a – коэффициент формулы (1), равный 0,85; минимальный теоретический радиус поворота $R = R_2 = B$; коэффициент $A = 0,5b\mu_{\text{св}} = bfB/L$; $\mu_{\text{св}}$ – коэффициент сопротивления повороту ГМ со свободным радиусом (при $P_1 = 0$); B – колея машины; L – длина опорной поверхности гусеницы. При $f = 0,07$, $\mu_{\max} = 0,8$, $L/B = 1,5$ коэффициент $A = 0,0093 \approx 0,01$ и свободный радиус поворота $R_{\text{св}} = 51B$.

Анализ выражения (6) показывает, что при $R \rightarrow \infty$ коэффициент $\mu \approx A$, а при $R = B$ этот коэффициент максимален ($\mu = \mu_{\max}$). Формула (6) лучше описывает закономерности движения ГМ в повороте при изменении R от свободного радиуса $R_{\text{св}}$ до минимального $R = R_2 = B$, а также при выходе ГМ из поворота, когда этот радиус от некоторого значения возрастает до бесконечности. По данным Балдина В.А., для быстроходных ГМ коэффициент $b = 0,18 \dots 0,23$ и в среднем примерно равен 0,2.

Авторы работы [10] на основании метода математического эксперимента по модели [11] предлагают другую модификацию формулы

(1) Никитина А.О., учитывающую, по их мнению, влияние на коэффициент μ скорости движения ГМ, а именно:

$$\mu = \mu_{\max} / [a + \frac{(1-a)R_2}{B}], \quad (7)$$

в которой радиус $R_2 = R + B/2$, а коэффициент «а» предлагается подсчитывать по следующей экспоненциальной зависимости:

$$a = a_{\max} [1 - e^{-R/a_v}], \quad (8)$$

где $a_{\max}$ – максимальное значение коэффициента «а» (рис. 3); R – теоретический радиус поворота по центру масс (рис. 2); $a_v = kV/\mu_{\max}$, коэффициент, зависящий от типа грунта и скорости; k – постоянная величина, которую предлагается определять из графика (рис. 4) авторов [10].

Попытка учесть влияние скорости движения ГМ на сопротивление повороту экспериментально исследовалась и ранее в работах Двали Р.Р. (1947 г.), Елюхина А.И. (1947 г.), Гуланса А.Я. и Кувшинова Я.И. (1956 г.), Саяпина В.И. и Позина Б.М. (1961 г.) и др. Влияние скорости ими в основном оценивалось в пределах ошибок обработки результатов экспериментов и приборных погрешностей.

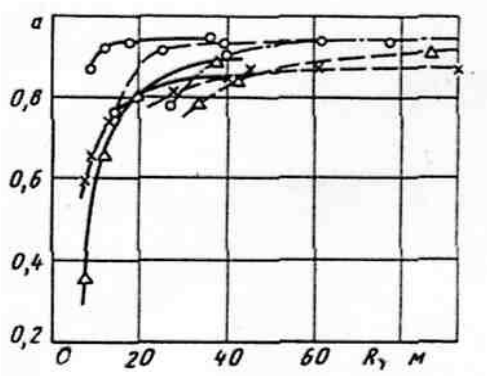


Рис. 3. Функция $a = f(R)$:
 ° – сухой суглинок; х – песок;
 Δ – влажный суглинок

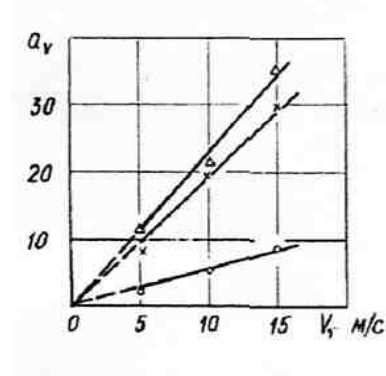


Рис. 4. Зависимость коэффициента a_v от скорости ГМ и типа грунта:
 ° – сухой суглинок; х – песок;
 Δ – влажный суглинок

Заметим, что к полученным в работе [10] данным следует относиться осторожно, поскольку они не проверены многочисленными физическими экспериментами, а основаны лишь на математическом моделировании.

Кроме того, из графика (рис. 4) и формулы $a_v = kV/\mu_{\max}$ следует, что этот коэффициент должен иметь размерность скорости, т.е. м/с. А из физического смысла зависимости (8) коэффициент a_v должен иметь размерность длины, т.е. м. Если радиус поворота $R \rightarrow 0$, то из формулы (8) видно, что коэффициент $a \rightarrow 0$, и по выражению (7) получается, что $\mu \rightarrow \infty$, а это нереально. Исследованиями других ученых (см. выше) доказано, что коэффициент $\mu_{\max}$ имеет предельное значение.

В заключении необходимо отметить статью [12] авторов из Украины. Авторы данной работы при математическом моделировании криволинейного движения ГМ предлагают коэффициент μ определять в зависимости от отношения действительного ρ_d радиуса поворота ГМ к длине опорной поверхности машины L , кратной продольному смещению полюса поворота, что является весьма спорным предложением. Коэффициент μ предлагается подсчитывать по разным формулам, отдельно для больших (μ_1) и малых (μ_2) радиусов поворота:

$$\mu_1 = \mu_{\max} / (0,905 + \frac{0,095\rho_d}{L}). \quad (9)$$

$$\mu_2 = 0,81\mu_{\max} / (0,965 + \frac{0,035\rho_d}{L}). \quad (10)$$

Действительный радиус ρ_d при моделировании определяется при решении системы дифференциальных уравнений плоского движения ГМ как отношение линейной скорости центра масс машины к угловой скорости поворота ГМ. К сожалению, сведений об экспериментальной оценке формул (9) – (10) авторы не привели. Уравнения используются для обоснования бокового заноса ГМ при моделировании поворота, при этом считается, что когда продольное смещение полюса поворота смещается на кромки опорных поверхностей гусениц, машина движется боком при постоянной величине $\mu = \mu_{\max}$. Это равенство у авторов [12] получается при $\rho_d = L$, что на практике не всегда бывает.

Заключение

Автором проанализированы известные расчетные формулы для определения коэффициента μ и момента M_c . Рассмотрена история вопроса, проведены расчеты и сравнение этих формул, выявлены их достоинства и недостатки. Ряд предложений по модификации известной формулы проф. Никитина А.О., а также изучение влияния скорости на величину коэффициента μ требуют дальнейшей доработки. Наиболее приемлемыми для расчетов и дающими практически одинаковый результат автор считает формулы Никитина А.О. и Балдина В.А., как основанные на правомерных физических явлениях при взаимодействии гусеничной машины с грунтом при повороте.

Список литературы

1. Избранные труды А.О. Никитина: сб. научн. тр. / отв. ред. А.П. Степанов, В.В. Павлов; МАДИ. – М., 1993. – 116 с.
2. Исаев, Е.Г. Вопросы общей теории поворота гусеничного трактора: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е.Г. Исаев; МАДИ. – М., 1969. – 60 с.
3. Никитин, А.О. Теория танка / А.О. Никитин, Л.В. Сергеев. – М.: ВАБТВ, 1962. – 584 с.
4. Никитин, А.О. Новый метод опытного определения коэффициента μ // Тр. ВАБТВ. – М., 1944. – Сб. № 7 (24). – С. 40–49.
5. Тарасов, В.В. Исследование поворотливости трактора Т-330 / В.В. Тарасов // Тр. МАДИ. – М., 1974. – Вып. 78. – С. 58–67.
6. Исаев, Е.Г. Особенности кинематики и сопротивления движению гусеничной машины при повороте с радиусом, равным нулю / Е.Г. Исаев // Тракторы и сельхозмашины. – 1976. – № 1. – С. 8–10.
7. Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В.М. Труханов, В.Ф. Зубков, Ю.И. Крыхтин, В.О. Желтобрюхов. – М.: Машиностроение, 2001. – 736 с.

8. Замкнутые системы управления поворотом гусеничных машин / Ю.В. Галышев, А.П. Григорьев, Р.Ю. Добрецов, А.В. Лозин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 3 (202). – С. 201–208.

9. Балдин, В.А. Определение параметров подвижности колесных и гусеничных машин с использованием вероятностной методики расчета (некоторые вопросы статистической теории движения): отчет о НИР / МАДИ; Балдин В.А. – М., 1980. – 144 с.

10. Шумилин, А.В. Уточненные характеристики поворота гусеничной машины / А.В. Шумилин, А.Н. Володин // Тракторы и сельхозмашины. – 1993. – № 7. – С. 9–11.

11. Шумилин, А.В. Математическая модель криволинейного движения гусеничной машины по деформируемому грунту / А.В. Шумилин // Тракторы и сельхозмашины. – 1993. – № 4. – С. 8–11.

12. Толстолицкий, В.А. Методология моделирования функционирования многоэлементных мобильных машин на плоской горизонтальной поверхности / В.А. Толстолицкий, Р.В. Антощенко // Молодой ученый. – 2013. – № 11. – С. 186–191.

References

1. Stepanov A.P., Pavlov V.V. *Sbornik trudov A.O. Nikitina*, Moscow, MADI, 1993, 116 p.

2. Isaev E.G. *Voprosy obshey teorii povorota gusenichnogo tractor* (Questions of the general theory of rotation caterpillar tractor), Doctor's thesis, Moscow, MADI, 1969, 60 p.

3. Nikitin A.O., Sergeev L.V. *Teoriya tanka* (Tank Theory), Moscow, 1962. 584 p.

4. Nikitin A.O. *Novy metod opytnogo opredeleniya koefitsienta μ* (A new method of experimental determination of the coefficient μ), *Sbornik trudov VA BTV*, Sb. №7 (24), Moscow, 1944, pp. 40–49.

5. Tarasov V.V. *Issledovanie povorotlivosti traktora T-330* (The study's turning tractor T-330), Sbornik trudov MADI, no. 78, Moscow, 1974, pp. 58–67.
6. Isaev E.G. *Traktory i sel'hozmashiny*, 1976, no. 1, pp. 8–10.
7. Trukhanov, Zubkov V.F., Kryhtin Ju.I., Zheltobriuhov V.O. *Transmissii gusenichnyh i koliosnyh mashin* (Transmissions tracked and wheeled vehicles), Moscow, Mashinostroenie, 2001, 736 p.
8. Galyshev Ju.V., Grigor'v A.P., Dobretcov R.Ju., Lozin A.V. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*, 2014, no. 3 (202), pp. 201–206.
9. Baldin V.A. *Opredilenie parametrov podvijnosti koliosnyh i gusenichnyh mashin s ispol'zovaniem veroyatnostnoy metodiki raschota* (Defining the parameters of mobility wheeled and tracked vehicles using a probability calculation method), the report on research, Moscow, MADI, 1980, 144 p.
10. Shumilin A.V., Volodin A.N. *Traktory i sel'hozmashiny*, 1993, № 7, pp. 9–11.
11. Shumilin A.V. *Traktory i sel'hozmashiny*, 1993, no. 4, pp. 8–10.
12. Tolstolucky V.A., Antoshenkov P.V. *Molodoj uchenyj*, 2013, no. 11, pp. 186–191.