

УДК 629.367

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

МАЛОИЗВЕСТНЫЙ МЕХАНИЗМ ПОВОРОТА IV-ГО ТИПА ДЛЯ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН. АНАЛИЗ СВОЙСТВ МЕХАНИЗМА И КИНЕМАТИКИ ПОВОРОТА МАШИНЫ

Аннотация. Рассмотрена градация механизмов поворота гусеничных машин по их типу, влияющему на кинематику поворота гусеничных машин, указаны особенности механизмов поворота и их основные свойства. Особое внимание уделено теоретическим исследованиям кинематических свойств малоизвестного МП IV-го типа и анализу влияния его на кинематику поворота гусеничных машин. Приведены сравнительные расчетные данные по механизмам поворота различных типов, в частности, оценено влияние типа механизмов поворота на скоростные свойства быстроходных гусеничных машин (БГМ), определяющие возможность их применения в конструкциях подобных машин. Получена математическая зависимость угловой скорости поворота БГМ в зависимости от грунтовых условий и расчетной кривизны поворота. На основе анализа свойств гусеничных машин с рассматриваемым МП IV-го типа сделаны выводы о его основных эксплуатационных возможностях с точки зрения применения в быстроходных гусеничных машинах и тракторах. Выделены основные недостатки БГМ с МП IV-го типа, ограничивающие использование последнего в конструкциях современных гусеничных машин.

Ключевые слова: гусеничные машины, механизмы поворота, типы механизмов поворота, эксплуатационные возможности гусеничных машин с МП IV-го типа, расчетные формулы.

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

SMALL-KNOWN MECHANISM OF IV-GO TURN FOR TRACK MACHINES. ANALYSIS OF PROPERTIES OF MECHANISM AND KINEMATICS OF TURNING THE MACHINE

Abstract. The grading of the turning mechanisms (MP) of caterpillar machines (GMs) by their type, which influences the kinematics of the rotation of the GM, specifies the features of MP and their basic properties. Particular attention is paid to theoretical studies of the

kinematic properties of the little-known IV type MP and to the analysis of its influence on the kinematics of the rotation of the GM. Comparative calculated data on MP of various types are given, in particular, the influence of the MP type on the speed properties of fast track crawler machines (BSM), which determine the possibility of their application in the structures of similar machines, is estimated. A mathematical dependence of the angular velocity of the rotation of the bogie is obtained depending on the ground conditions and the design curvature of the rotation. Based on the analysis of the properties of the GM with the considered MP of the IV type, conclusions are drawn about its main operational capabilities from the point of view of application in high-speed crawler machines (BSM) and tractors. The main shortcomings of PGM with MP of the IV type, which limit the use of the latter in the designs of modern GM, are identified.

Key words: tracked vehicles, mechanisms of rotation, types of rotation mechanisms, operational possibilities of GM with MP of IV type, calculation formulas.

Введение

В настоящей статье рассмотрены особенности и свойства механизма поворота (МП) так называемого IV-го типа для гусеничных машин (ГМ). Это малоизвестный тип МП, о котором в специальной литературе практически ничего неизвестно. Имеется ограниченное число источников информации [1–3], в которых приводятся некоторые сведения о свойствах этого механизма, не нашедшего широкого применения в транспортной технике (БГМ и гусеничных тракторах различного назначения). Поиск в различных научно-технических библиотеках и сети Интернет является весомым подтверждением сказанному. Этому есть определённые объяснения, рассмотренные ниже. Поэтому тематика настоящей статьи актуальна и, по мнению автора, представляет интерес для специалистов и студентов вузов транспортного профиля. К тому же наиболее полные исследования, выполненные в работе [1], практически недоступны широкому кругу специалистов.

Классификация МП по их типу

Кратко рассмотрим деление МП по их типу (кинематическому признаку). По такому же признаку подразделяют механизмы передач

и поворота (МПП), объединяющие в себе одновременно свойства трансмиссии и собственно МП при двухпоточной передаче мощности от двигателя ГМ до ведущих колёс (звёздочек) гусениц, а также трансмиссии со ступенчатыми бортовыми коробками передач (БКП) и различными вариаторами (в т.ч. гидравлическими), установленными по бортовой схеме.

Начиная с 1930–40-х гг., при разработке МП для танков и тракторов по способу осуществления поворота при сохранении неизменными частот вращения коленчатого вала двигателя, их подразделяли на два основных класса: а) механизмы, сохраняющие скорость центра масс (Ц.М.) при повороте ГМ; б) механизмы, изменяющие эту скорость (чаще всего понижая её в процессе поворота) [4].

Существенно позднее специалисты рассматривали в качестве возможных для создания ГМ уже МП трёх типов. Обозначим их соответственно: а) МП-1 (I-го, дифференциального типа), обеспечивающие при повороте постоянство скорости Ц.М.; б) МП-2 (II-го типа), сохраняющие при повороте ГМ скорость забегающей гусеницы постоянной и равной скорости прямолинейного движения до входа ГМ в поворот; в) МП-3 (III-го типа), уменьшающие при повороте не только скорость Ц.М., но и скорости обеих гусениц ГМ. Последние МП ещё в большей степени, чем МП-2, снижают при повороте скорость Ц.М. Поэтому для БГМ из перечисленных МП предпочтительнее МП-1.

МП-1 обычно выполнены по однопоточной схеме с использованием дифференциальных механизмов; МП-2 известны как двухступенчатые планетарные механизмы поворота, или так называемые бортовые фрикционы; МП-3 выполнены по принципу электротрансмиссий или в виде сдвоенных несимметричных дифференциалов с общей кинематической связью, для управления которыми используют фрикционы поворота и остановочные тормоза [5].

Кинематика поворота ГМ

Общую кинематику в процессе поворота ГМ иллюстрирует рис. 1.

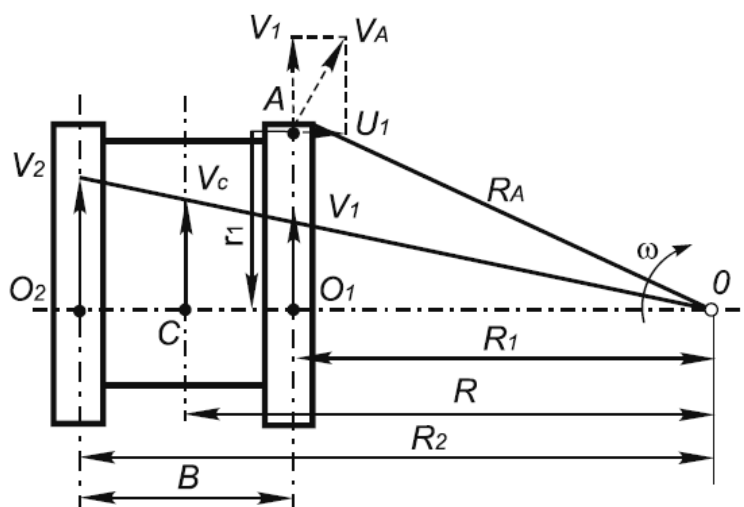


Рис. 1. Кинематика поворота ГМ на плоскости: C – центр масс ГМ; B – колея; R – радиус поворота средней точки (Ц.М.); O – полюс поворота ГМ; 1, 2 – индексы: «1» отстающей и «2» забегающей гусеницы

В теории ГМ для уяснения процессов, имеющих место при повороте машин с различными типами МП, введено понятие некоторой точки (т. A), мысленно связанной с корпусом машины и сохраняющей при повороте скорость прямолинейного движения (V_o) [6]. Это расстояние обозначим через l_k , а введя понятие «кинематический фактор» поворота q_k , его можем определить для любых МП по формуле

$$l_k = q_k \cdot \frac{B}{2}. \quad (1)$$

Для уяснения кинематических свойств МП-4 (IV-го типа) рассмотрим план скоростей в сравнении с МП-1 (рис. 2).

Здесь при прямолинейном движении $V_2 = V_c = V_1 = V_o$.

Итак, для МП-1 получим $q_k = 0$, для МП-2 – $q_k = +1$, а для МП-3 – $q_k > 1$. Для МП-4 (рис. 2б) $q_k = -1$ (отрицательное значение). При этом, учитывая знак величины q_k и рис. 1–2, для любых типов МП справедливы следующие соотношения скоростей характерных точек ГМ при повороте:

$$V_2 = \frac{R + 0,5 \cdot B}{R + 0,5 \cdot B \cdot q_k} \cdot V_0; \quad (2)$$

$$V_1 = \frac{R - 0,5 \cdot B}{R + 0,5 \cdot B \cdot q_k} \cdot V_0; \quad (3)$$

$$V_c = \frac{R}{R + 0,5 \cdot B \cdot q_k} \cdot V_0. \quad (4)$$

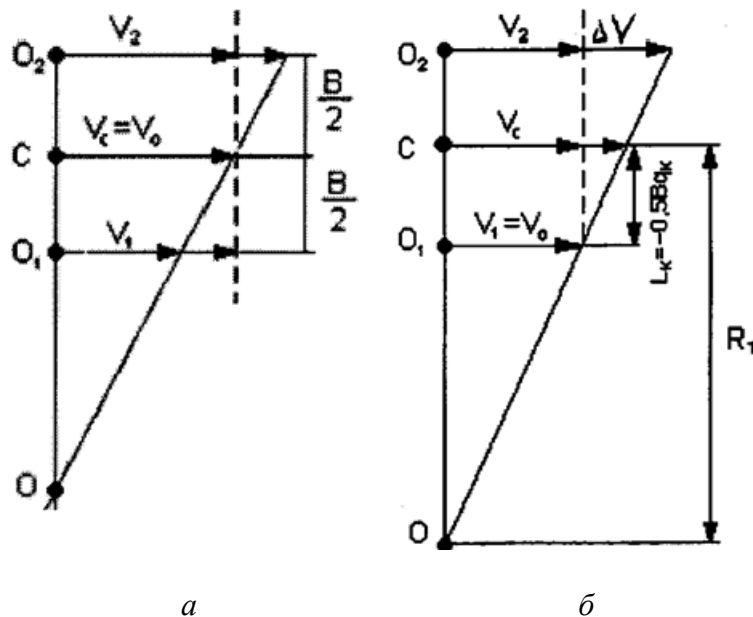
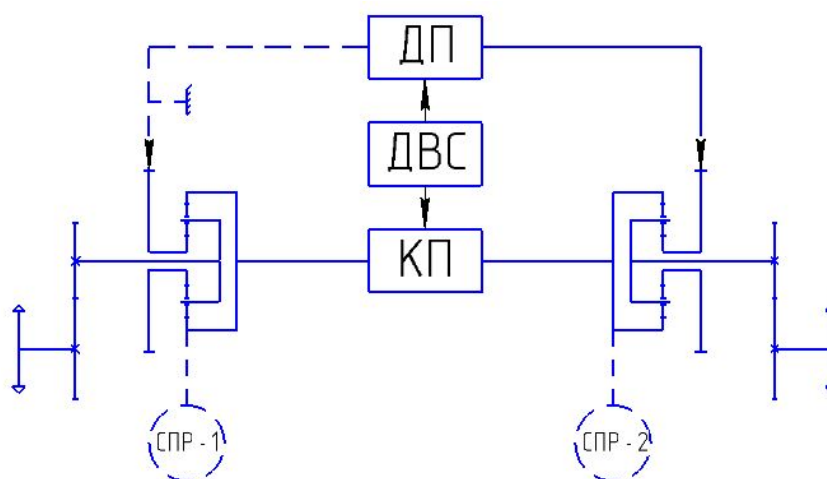


Рис. 2. План скоростей при повороте ГМ: а – с МП I-го типа; б – IV-го типа: R_m – теоретический радиус поворота; ΔV – приращение скорости гусеницы при повороте

Таким образом, для МП-4 (рис. 2б) при повороте ГМ существенно возрастает скорость забегающей гусеницы и Ц.М., а постоянной теоретически остаётся скорость отстающей гусеницы. Однако при этом в формуле (2) скорость забегающей гусеницы станет равной $V_2 = V_0 + \Delta V$. Приращение скорости можно обеспечить за счет установки в трансмиссии бортовых суммирующих планетарных передач, эпициклические шестерни которых связаны кинематически, а их частота вращения зависит от включённой передачи в КП (рис. 3).

Применение в дополнительном приводе регулируемых гидрообъемных передач (ГОП) улучшает управляемость БГМ

при повороте, облегчает труд водителя и при допущении несжимаемости рабочей жидкости в гидропередаче обеспечивает на всех передачах в КП расчетный, т.е. фиксируемый и меняющийся бесступенчато радиус поворота. У такого МП минимальный расчетный радиус поворота зависит от номера передачи в КП и весьма значителен по величине. Он много больше желаемого расчётного радиуса, равного $B/2$ (поворот относительно центра отстающей гусеницы). Если в качестве МП-4 рассматривать МПП, то теоретически этот радиус можно реализовать, имея в трансмиссии перед каждой бортовой передачей блокировочный фрикцион и остановочный тормоз гусеницы (на рис. 2 не показаны).



*Рис. 3. Принципиальная схема трансмиссии с МП-4:
ДВС – двигатель внутреннего сгорания; ДП – дополнительная передача;
КП – ступенчатая коробка передач;
СПР – 1, 2 – суммирующие планетарные ряды (передачи)*

С точки зрения требования к БГМ по подвижности (скоростным свойствам) и маневренным качествам в условиях ограничений (например, при заезде на железнодорожную платформу для перевозки ГМ) наиболее приемлемыми являются МП-1, МП-4 и в определенной степени МП-2. Механизмы поворота МП-3 в настоящее время не используются как в конструкциях БГМ, так и тракторов. Тем не менее, главным критерием по реализации движения ГМ в скоростном повороте будет условие

возможности управляемого поворота без бокового заноса на расчётном грунте [6, 7]. Ниже сравнению подвержены механизмы МП-1 и МП-4.

Выбор основных параметров МП

При проектировании выбор типа МП и их конструктивных схем для БГМ осуществляется с учётом известных требований к ним, исходя из их назначения и условий эксплуатации [7, 8]. Основным параметром, определяющим возможность гарантированного поворота ГМ с требуемым радиусом (кривизной поворота), является передаточное число МП. Его обычно определяют через отношение скоростей гусениц по выражению

$$u_{\text{мп}} = \frac{V_2}{V_1}, \quad (5)$$

справедливому для случая поворота ГМ с теоретическим радиусом $R > B/2$ [6]. Тогда с учётом формул (2) и (3) получим выражение для определения радиуса поворота

$$R = \frac{B}{2} \cdot \frac{u_{\text{мп}} + 1}{u_{\text{мп}} - 1}. \quad (6)$$

Заметим, что выражение (5) для случая поворота с радиусом, равным $B/2$, т.е. когда $V_1 = 0$, применять не очень информативно. В этом случае лучше использовать не передаточное число МП, а его передаточное

отношение $\varepsilon = 1/u_{\text{мп}}$; при этом $R = \frac{B}{2} \cdot \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon}$, а при $V_1 = 0$

имеем $\varepsilon = 0$ и $R = B/2$.

Для МПП, БКП и тому подобных механизмов предлагается вместо выражения (5) использовать передаточные числа от выходного вала двигателя до соответствующего ведущего колеса гусениц, поскольку их теоретические скорости обратно пропорциональны этим передаточным числам [3, 8].

Так, в работе [3] предложено общее выражение для определения передаточного числа МП в виде

$$u_{\text{мп}} = \frac{u_o + \Delta u_1}{u_o \pm \Delta u_2}, \quad (7)$$

где u_o – передаточное число от двигателя до ведущих колёс при прямолинейном движении ГМ; $u_{1,2}$ – изменение передаточного числа соответственно на отстающей гусенице (индекс 1) и забегающей гусенице (индекс 2).

Для МП-4 выражение (7) приобретает вид

$$u_{\text{мп}} = \frac{u_o}{u_o - \Delta u}, \quad (8)$$

а расчетный радиус поворота

$$r_p = \frac{u_o}{\Delta u} B - B/2. \quad (9)$$

Из плана скоростей ГМ с МП-4 (рис. 2б) для некоторого расчётного радиуса поворота можем получить соотношение

$$\frac{V_o + \Delta V}{V_o} = \frac{r_p + B/2}{r_p - B/2}. \quad (10)$$

После преобразования выражения (10) и его решения относительно радиуса получим

$$r_p = B \frac{V_o}{\Delta V} + B/2. \quad (11)$$

Приравняв друг к другу правые части выражений (9) и (11), можно получить равенство

$$\frac{V_o}{\Delta V} = \frac{u_o}{\Delta u} - 1. \quad (12)$$

Тогда, подставив (12) в (11), получим выражение (9), что указывает на идентичность формул, предложенных разными авторами [3, 6]. Однако с точки зрения оценки возможности реализации расчетного радиуса в скоростном повороте целесообразно иметь его зависимость

от допускаемой по условиям отсутствия заноса скорости Ц.М. машины. Поэтому для выполнения такого анализа целесообразно воспользоваться выражением (11). Динамические свойства (силовой расчёт) МП-4 с гидрообъемной передачей в дополнительном приводе (рис. 3) на примере конкретной ГМ рассмотрены в работах [3, 6]. Поэтому в настоящей статье указанные свойства не исследуются.

Расчётные исследования криволинейного движения ГМ с МП-4

Характер криволинейного движения ГМ зависит от действующих внешних и внутренних сопротивлений движению, параметров машины и приёмов управления трансмиссией и МП. Для БГМ важной задачей является осуществление гарантированного поворота с расчетным радиусом и допустимой по условиям отсутствия заноса скоростью.

На основании физических процессов, происходящих при заносе ГМ, можно получить соотношения между критической угловой скоростью поворота $\omega_{кр}$, расчетной кривизной поворота $K = 1/r_p$ и параметрами грунта (μ_{max}), а именно:

$$\omega_{кр}^2 = K\mu_{max}g, \text{ или } \omega_{кр} = \sqrt{K\mu_{max}g}, \quad (13)$$

где μ_{max} – максимальное значение коэффициента бокового скольжения гусениц для расчётного грунта, g – нормальное ускорение свободного падения тела.

Реальная кривизна K , при которой даже при минимальной скорости возможен занос ГМ, как показывают исследования ряда авторов, обычно соответствует значению $K_{\phi} \leq 0,2$ при скоростях Ц.М. порядка 20...47 км/ч. При этом считается, что поворот ГМ происходит на типовом грунте, когда коэффициент μ_{max} равен математическому ожиданию $m_s = 0,625$ [9]. Поэтому в расчётах следует рассматривать изменение кривизны в диапазоне $0 \leq K \leq K_{\phi}$.

Учитывая выражение (11), получим

$$K = \frac{2\Delta V}{(2V_o + \Delta V)B}. \quad (14)$$

На основании схемы трансмиссии с МП-4 (рис. 3) видно, что скорость V_o обеспечивается, когда солнечные шестерни СПР не вращаются (гидравлически заторможены), а дополнительное увеличение ΔV (приращение скорости на забегающей гусенице, рис. 2) происходит за счёт вращения солнечной и эпициклической шестерен СПР-2 в одном направлении. Значения указанных скоростей легко получить на основании уравнений кинематики СПР-1 и СПР-2 рассматриваемой трансмиссии и определения скоростей каждой из гусениц при повороте, а следовательно, возможной угловой скорости поворота ГМ. Однако изменение передаточного числа дополнительного привода и, следовательно, приращение скорости ΔV , допустимое по условиям нагрузки ГОП при повороте ГМ, возможно лишь в ограниченном диапазоне. Минимальный расчётный радиус поворота ГМ с повышением номера передачи в КП (скорости движения ГМ) увеличивается, а максимальное передаточное число дополнительного привода с ГОП постоянно, поэтому для любой передачи $\Delta V = \text{const}$, а V_o переменная величина.

На основании рекомендаций проф. Никитина А.О. [10] в выражении (13) следует подставлять значение кривизны, увеличенное в L/B раз (L – длина опорной поверхности гусеницы), что учитывает в определенной степени буксование и юз гусениц при повороте ГМ. Минимальное значение коэффициента μ_{max} рекомендуется выбирать для скользких грунтов, т.е. равным 0,4 [10]. Значение максимальной угловой скорости поворота современных БГМ, обладающих высокой удельной мощностью и динамичностью, при повороте на рассматриваемых грунтах находится в диапазоне 0,5...1,0 рад/с. Фактическая угловая скорость поворота меньше теоретической также примерно в L/B раз.

Оценим угловую скорость поворота как разность линейных скоростей гусениц, отнесённую к величине колеи ГМ.

Для рассматриваемой трансмиссии с МП-4 при криволинейном движении ГМ с радиусом $r_p > B/2$ из плана скоростей (рис. 2) найдём её угловую скорость поворота $\omega = \Delta V/B$; для МП-1 эта скорость при прочих равных условиях в два раза выше. То есть при движении в повороте на различных передачах в КП угловая скорость зависит только от параметров двигателя и дополнительного привода (ГОП), а кривизна траектории поворота одновременно от параметров двигателя, дополнительного привода и собственно КП. При МП-4 скорость Ц.М. машины при повороте больше, чем у МП-1, на незначительную величину ($\Delta V/2$). При этом для МП-4 расчётный радиус $r_p = (V_o + 0,5\Delta V)/\omega$, а для МП-1 – $r_p = V_o/\omega$. Используя полученные выражения при одинаковой угловой скорости, после преобразования получим отношение расчётных радиусов МП-4 к МП-1:

$$\frac{r_{p4}}{r_{p1}} = 2 + \frac{\Delta V}{V_o}. \quad (15)$$

Для рассматриваемой схемы МП-4 отношение $\frac{\Delta V}{V_o} = \frac{u_{дэ}}{ku_{дс}}$, где k – характеристика СПР-1 и СПР-2, $u_{дэ}$, $u_{дс}$ – передаточное число от вала двигателя до эпициклической и солнечной шестерен СПР-2 соответственно.

Таким образом, ГМ с МП-4 по сравнению с МП-1 реализует на любой передаче в КП при одинаковых параметрах трансмиссии радиус поворота существенно больший по величине, если поворот окажется возможным по условиям отсутствия бокового заноса. То есть повышение скорости Ц.М. (свойство, полезное для БГМ) существенного преимущества МП-4 перед МП-1 не даёт, что, очевидно, повлияло на неиспользование такого механизма в конструкциях гусеничных машин.

Автором выполнены экспериментальные исследования применительно к реальной ГМ массой 16 т с максимальной мощностью 210 кВт, параметры

которой приведены в [2, 6]. Исследования показывают, что в случае применения в качестве ГОП гидромашин серии ПР-20 величина $\Delta V \approx 0,1 V_0$ при движении ГМ на третьей передаче в КП со скоростью порядка 24 км/ч (при отсутствии заноса ГМ) на песчанистом грунте. На низшей (первой) передаче в КП приращение скорости составляет порядка 0,3. На более же высоких передачах (IV...V) указанное соотношение скоростей будет ещё меньше, чем на третьей передаче. Тем не менее, возможен некоторый резерв по увеличению этого соотношения почти в 2 раза при сохранении устойчивого поворота ГМ без заноса на данном грунте при скоростях порядка 40 км/ч. Этого можно достичь, выбрав для гусеничных машин, например, ГОП с другими параметрами и установочной мощностью.

Тем не менее, основными недостатками трансмиссий ГМ с МП-4 являются:

- 1) отсутствие «нулевого радиуса поворота» (поворот относительно геометрического центра ГМ), что может быть реализовано при МП-1;
- 2) сложное управление ГМ в криволинейном движении при схеме МП-4 по принципу использования двух бортовых регулируемых ГОП, особенно в случае изменения поворота ГМ в другую сторону;
- 3) ограниченная маневренность ГМ при движении на малых скоростях и для поворота в ограниченных условиях по сравнению, например, с МП-1 и МП-2.

Заключение

Автором проанализирована кинематика поворота ГМ с МП IV-го типа, малоизученного в специальной литературе. Даются рекомендации по проведению расчётных исследований поворота БГМ с данным МП. Получены основные кинематические соотношения, учитывающие параметры трансмиссии, механизма поворота, машины в целом и грунтовые условия. Проведены анализ полученных выражений

и сравнение рассматриваемого МП с механизмами других типов с точки зрения кинематических свойств и применимости его в БГМ.

Список литературы

1. Гречишкин, М.М. Исследование путей совершенствования ступенчатых механизмов поворота с целью улучшения управляемости современных танков: дис. ... канд. техн. наук / М.М. Гречишкин; ВА БТВ. – М., 1978. – 239 с.
2. Павлов, В.В. Применение гидрообъемных передач в механизмах поворота гусеничных машин / В.В. Павлов // Техника и технологии строительства и эксплуатации автомобил. дорог: сб. науч. тр. / МАДИ (ТУ); Уральский филиал МАДИ (ТУ). – М., 2000. – С. 75–82.
3. Бекетов, С.А. Теория управляемого движения гусеничных машин / С.А. Бекетов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 125 с.
4. Благонравов, А.И. Танки и тракторы. Расчёт и конструкции / А.И. Благонравов. – М.: Оборонгиз, 1940. – 392 с.
5. Трансмиссии гусеничных и колёсных машин / В.М. Труханов, В.Ф. Зубков, Ю.И. Крыхтин, В.Ф. Желтобрюхов. – М.: Машиностроение, 2001. – 736 с.
6. Павлов, В.В. Теория поворота гусеничных транспортных машин / В.В. Павлов. – М.: МАДИ (ТУ), 2000. – 151 с.
7. Расчёт и конструирование гусеничных машин / Н.А. Носов [и др.]; под ред. Н.А. Носова. – Л.: Машиностроение, 1972. – 292 с.
8. Шарипов, В.М. Конструирование и расчёт тракторов / В.М. Шарипов. – М.: Машиностроение, 2004. – 592 с.
9. Савочкин, В.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин / В.А. Савочкин, А.А. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1993. – 320 с.
10. Никитин, А.О. Теория танка / А.О. Никитин, Л.В. Сергеев. – М.: ВА БТВ, 1962. – 584 с.

References

1. Grechishkin M.M. *Issledovanie putey soverchenstvovaniya stupenchatykh mekhanizmov povorota s cel'ju ulucheniya upravlyaemosti sovremennykh tankov* (Study ways to improve the speed of the rotation mechanism with the aim of improving the manageability of modern tanks), Cand's thesis, Moscow, VA BTV, 1978, 239 p.
2. Pavlov V.V. *Technika i tehnologii stroitel'stva i akspluatacii avtomobil'nykh dorog*, Sbornik nauchnykh trudov, Moscow, MADI, 2000, pp. 75–82.
3. Beketov S.A. *Teoriya upravlyаемого dvigzheniya gusenichnykh mashin* (Theory of controlled motion of tracked vehicles), Moscow, MSTU them. N.Uh. Bauman, 2017, 125 p.
4. Blagonravov A.I. *Tanki i traktory. Raschyot i konstrukcii* (Tanks and tractors. Calculation and design), Moscow, Oborongiz, 1940, 392 p.
5. Trukhanov V.M., Zubkov V.F., Kryhtin Ju.I., Zheltobriuhov V.O. *Transmissii gusenichnykh i koliosnykh mashin* (Transmission of tracked and wheeled vehicles), Moscow, Mechanical Engineering, 2001, 736 p.
6. Pavlov V.V. *Teoriya povorota gusenichnykh transpornykh mashin* (The theory of turning of tracked vehicles), Moscow, MADI (TU), 2000, 151 p.
7. Nosov N.A., Galyshev V.D., Volkov Yu.P., Harchenko A.P. *Raschot i konstruirovaniye gusenichnykh mashin* (Calculation and design of tracked vehicles), Leningrad, Mechanical Engineering, 1972, 292 p.
8. Sharipov V.M. *Konstruirovaniye i raschot traktorov* (Design and calculation of tractors), Moscow, Mechanical Engineering, 2004, 592 p.
9. Savochkin V.A., Dmitriev A.A. *Statisticheskaya dinamika transportnykh i tyagovykh gusenichnykh mashin* (Statistical dynamics of transport and traction tracked vehicles), Moscow, Mechanical Engineering, 1993, 320 p.
10. Nikitin A.O., Sergeev L.V. *Teoriya tanka* (Tank theory), Moscow, VA BTV, 1962, 584 p.