

УДК 629.331

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ТИПОВ ДВИЖИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ВЫСОКОЙ ПРОХОДИМОСТИ

В. И. Котляренко, д. т. н. / Министерство транспорта России

Л. В. Барахтанов, д. т. н., проф. / Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

ВВЕДЕНИЕ

По данным Росреестра, территория Российской Федерации составляет 17 098,2 тыс. км². Около 2 млн км² занимает болотистая местность, 1,7 млн км² — тундра. Данные территории характеризуются слабонесущими поверхностями, что затрудняет движение транспортных средств. В зависимости от степени увлажнения средняя несущая способность болот может колебаться в пределах 0,01–0,12 МПа.

Многолетние наблюдения показывают, что около 90 % всей территории России на длительный срок (от пяти до десяти месяцев) устойчиво покрываются снегом. Глубина снежного покрова в основном составляет 0,3–0,6 м (в оврагах до 1–3 м), достигая в некоторых районах Сибири и Дальнего Востока 1,2 м и более (в оврагах до 4–10 м). Несущая способность снежного опорного основания колеблется в пределах 0,02–0,04 МПа.

Возможность движения, осуществления перевозок и технологических операций в условиях слабонесущих опорных оснований оказывает большое влияние на развитие экономики и инфраструктуры в данных регионах. Двигаться по опорным основаниям с низкой несущей способностью могут только вездеходные транспортные средства (далее — ТС) с низким давлением движителя на грунт.

Эффективность эксплуатации вездеходных ТС в тяжёлых дорожных условиях во многом определяется их проходимостью. Проблема проходимости ТС по опорным поверхностям с низкой несущей способностью решается в основном путём совершенствования конструкции движителей. В общем случае к движителям предъявляются следующие требования [1–15]:

- максимальная эффективность (повышение проходимости и безопасности движения);
- универсальность (возможность применения в широком диапазоне условий эксплуатации);
- высокие тягово-сцепные качества;

- минимальные потери на движение;
- рациональное взаимодействие с опорной поверхностью с точки зрения экологии;
- хорошие показатели управляемости и устойчивости;
- хорошие упругие и амортизирующие свойства;
- хорошая самоочищаемость;
- высокие показатели прочности и надёжности, достаточные износостойкость и долговечность;
- удобство эксплуатации (простота и быстрота монтажа, демонтажа и ремонта);
- небольшая масса и невысокая стоимость.

ГУСЕНИЧНЫЕ МАШИНЫ

Одним из движителей, значительно повышающих проходимость транспортных средств, является гусеничный движитель [3, 4, 9, 15]. Гусеничные ТС (рис. 1) обладают высокой проходимостью по деформируемым грунтам, снежной целине и заболоченной местности. Использование этих машин позволило ликвидировать сезонность транспортных работ в труднодоступной и бездорожной местности.

Исследованиями и расчётами гусеничных машин в разное время занимались А. С. Антонов, Л. В. Барахтанов, М. Г. Беккер, А. Н. Вержбицкий, Н. А. Забавников, В. И. Красенков, Г. А. Крестовников, М. К. Кристи, Г. О. Котиев, В. Н. Наумов, В. Ф. Пла-



Рисунок 1.
ТС с гусеничным движителем



Рисунок 2. Ходовой стенд ОНИЛВМ НГТУ на шасси ГАЗ-47

тонов, В. П. Рогожин, С. В. Рукавишников и ряд других учёных.

У классической современной гусеничной машины масса ходовой части составляет 20–24 % от её снаряжённой массы. Применение ленточных резинокордных гусениц позволило ликвидировать недостатки металлических гусениц, связанные со звенчатостью, уменьшить массу движителя и снизить динамические нагрузки и уровень шума. Однако и эти гусеницы сохранили значительную неравномерность распределения давлений по длине площади контакта с опорной поверхностью. У гусениц есть ещё один недостаток, связанный с бортовым способом поворота, — высокие касательные напряжения при криволинейном движении. Последнее обстоятельство приводит к срезанию верхнего почвенно-растительного покрова во время поворота.

МАШИНЫ НА ПНЕВМОГУСЕНИЧНОМ ДВИЖИТЕЛЕ

Стремление совместить положительные качества гусеницы (низкие средние давления на опорную поверхность) и пневмоколёсного движителя (высокую ходимость и демпфирующие свойства) привело к созданию пневмогусениц [6, 13].

Начало работ по созданию пневмогусениц в России было положено НАМИ, МВТУ им. Н. Э. Баумана и Ленинградским шинным заводом в 1961 году. С 1973 года эти работы были продолжены ОНИЛВМ НГТУ. Исследованиями пневмогусениц занимались Д. Бонмартини, Н. Ф. Бочаров, Н. Б. Веселов, В. И. Гусев, Р. Марш, В. М. Семёнов, В. И. Соловьёв, В. Чеппат и другие учёные.

На рис. 2 изображён ходовой стенд ОНИЛВМ НГТУ [6].

Пневмогусеницы делятся на однополостные и многополостные. Однополостные пневматические гусеницы (рис. 3) представляют собой одну или несколько замкнутых торообразных оболочек. Основным достоинством такой конструкции является равномерное распределение давлений на опорную

поверхность по длине. Однако однополостные гусеницы обладают большими гистерезисными потерями, склонностью к спаданию и сложны в изготовлении.

Многополостные пневмогусеницы представляют собой совокупность резинокордных пневмотраков, закреплённых на гусеничной цепи. В зависимости от способа крепления они делятся на гусеницы с неподвижными (рис. 4) и подвижными (рис. 5) пневмотраками.

Максимальные давления на опорную поверхность и неравномерность их распределения у ТС на пневмогусеничных движителях значительно меньше, чем у ТС на металлических гусеницах [6, 13]. Так, у транспортёра ГАЗ-47-ПГ по сравнению с ГАЗ-47 они меньше в 1,6–1,9 и 2,4–2,9 раза соответственно. Коэффициент сопротивления движению и глубина колеи машины с пневмогусеницами на снежной целине по сравнению с обычной гусеничной машиной меньше в 1,2–1,5 и 1,5–2,0 раза соответственно.



Рисунок 3. Однополостные пневмогусеницы: а — на тракторе Д. Бонмартини; б — на опытном образце НАМИ-0106



Рисунок 4. Пневмотраковый движитель: а — движитель НАМИ-СЗМУ; б — движитель финской фирмы Keksintosaatio

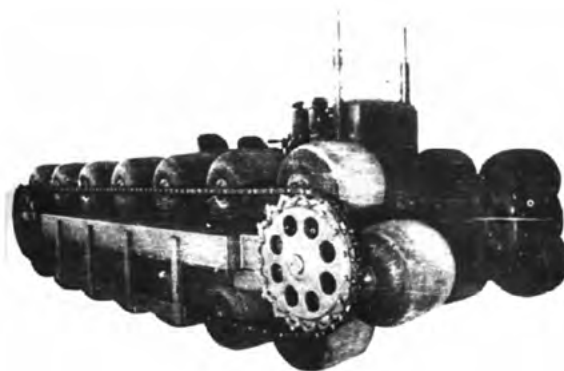


Рисунок 5. Движитель «Аэрол» с подвижными пневмотраками

Масса и металлоёмкость пневмогусеничных движителей ГАЗ-47-ПГ ниже массы и металлоёмкости металлических гусениц ГАЗ-47 на 29 и 45 % соответственно. Величина напряжений в почвенном слое по следу движения пневмогусеничного трактора Т-150 в 1,2–1,3 раза ниже по сравнению с движителем Т-150 на металлических гусеницах. Срок службы пневмогусеницы больше, чем традиционной, за счёт менее жёсткого контакта с опорной поверхностью и уменьшения инерционных сил.

На твёрдых опорных поверхностях коэффициент сопротивления движению пневмогусеницы в 1,2–1,3 раза выше по сравнению с движителем на металлических гусеницах, что связано с большими гистерезисными потерями в обводе гусеницы. Пневмогусенице присуща повышенная склонность к изгибу опорной ветви в плане. Последнее приводит к тому, что на больших скоростях движения по дорогам с твёрдым покрытием возникают колебания ТС вокруг вертикальной оси (рыскание). По сравнению с металлической гусеницей пневматическая гусеница чувствительна к низким температурам, имеет худшую ремонтпригодность и у неё существует опасность проколов.

КОЛЁСНЫЕ МАШИНЫ

Исследованиями и расчётами колёсных машин в разное время занимались Я. С. Агейкин, П. В. Аксёнов, А. С. Антонов, В. Ф. Бабков, М. Г. Беккер, Б. Н. Белоусов, В. В. Беляков, В. Л. Бидерман, А. К. Бируля, Н. Ф. Бочаров, Н. Р. Брилинг, Ю. А. Брянский, В. Ф. Васильченко, Д. П. Великанов, Д. Вонг, Г. В. Зимелев, В. И. Кнороз, Н. И. Коротышко, В. И. Котляренко, Н. Ф. Кошарный, В. Н. Кравец, А. С. Литвинов, В. А. Петрушов, Ю. В. Пирковский, В. Ф. Платонов, А. А. Полунгян, В. М. Семёнов, Г. А. Смирнов, Н. А. Ульянов, Я. Е. Фаробин, Е. А. Чудаков и ряд других учёных.

Пневматические шины — одно из наиболее простых и эффективных средств повышения проходимости колёсных машин. За счёт варьирования основных параметров шин (размеров, формы, числа слоёв корда, материала, внутреннего давления, рисунка и глубины протектора) в широких пределах можно изменять коэффициенты сцепления и сопротивления качению, а также площадь контакта между колёсным движителем и опорной поверхностью и, соответственно, давление на неё. Применение колёсных движителей позволяет обеспечить ТС высокие скоростные и экономические показатели.

Условно по величине наружного диаметра D шины делятся на малогабаритные ($D < 0,8$ м), среднегабаритные ($D = 0,8–1,5$ м) и крупногабаритные

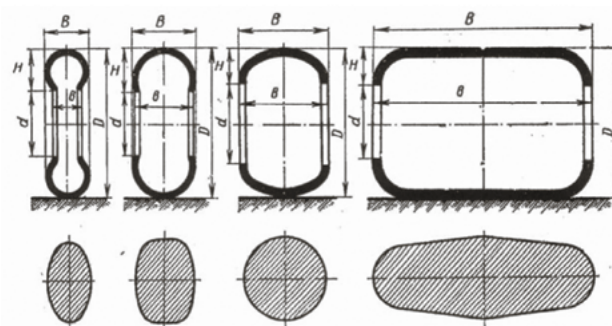


Рисунок 6. Геометрические формы отпечатков шин: а — тороидные шины; б — широкопрофильные шины; в — арочные шины; г — пневмокотки

($D > 1,5$ м). По величине внутреннего давления воздуха p шины можно разделить на шины высокого давления ($p > 0,35$ МПа), шины низкого давления ($p = 0,1–0,35$ МПа) и шины сверхнизкого давления ($p < 0,1$ МПа). По форме поперечного сечения пневматические шины классифицируются как традиционные (или тороидные), широкопрофильные, арочные, пневмокотки, крупногабаритные шины и шины-сверхбаллоны. На рис. 6 показаны геометрические формы и площади отпечатков тороидных, широкопрофильных и арочных шин и пневмокотков, нагруженных одной и той же вертикальной нагрузкой, имеющих одинаковый наружный диаметр и соответствующие жёсткости [2].

Если величину площади отпечатка тороидной шины принять за 100 %, то площади отпечатков других колёсных движителей составят: широкопрофильных — 120–140 %, арочных — 150–200 %, пневмокотков — 250–300 % [2].

Дальнейшим развитием пневмоколёсных движителей, значительно повышающих проходимость колёсных машин, стало создание в начале девяностых годов прошлого века высокоэластичных шин сверхнизкого давления на базе существующих широкопрофильных шин. Шины сверхнизкого давления имеют тонкостенную резинокордную оболочку с каркасом, состоящим, как правило, из двух слоёв корда, благодаря чему обеспечивается её высокая эластичность. Внутреннее давление воздуха в шине может меняться в пределах 0,01–0,08 МПа. При качении колеса с подобной шиной и с внутренним давлением воздуха в ней порядка 0,01–0,02 МПа напряжения в зоне контакта шины с опорной поверхностью распределяются весьма равномерно как по длине, так и по ширине контакта, снижая предельные нагрузки на выступы грунта и предотвращая его разрушение.

При взаимодействии с грунтом такая шина, так же как и пневмокоток, не разрушает его поверхность и приобретает способность «обтекать» неров-



Рисунок 7. ТС на шинах сверхнизкого давления «Вектор» типа 8 × 8

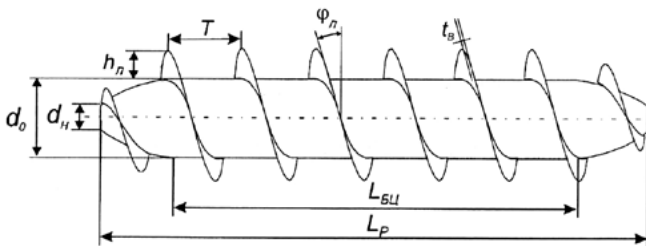


Рисунок 8. Общий вид роторно-винтового движителя

ности пути, а выступы и впадины беговой дорожки, повторяющей профиль поверхности пути, выполняют роль своеобразных грунтозацепов, увеличивая сцепление с опорной поверхностью. Как правило, относительно небольшая масса колёсных машин на пневмоколёсных движителях сверхнизкого давления при достаточном водоизмещении самих шин придаёт этим машинам амфибийные качества.

Транспортные средства на шинах сверхнизкого давления нашли широкое применение в районах с холодным климатом (рис. 7). Они успешно работают на глубокой снежной целине, в заболоченной местности и оттаявшей тундре, объединяя чрезвычайно высокую проходимость с хорошими экологическими и экономическими качествами [14].

Недостатком шин сверхнизкого давления является их ограниченная грузоподъёмность. К примеру, грузоподъёмность шины сверхнизкого давления 1300x600-533 составляет всего 600 кг, в то время как грузоподъёмность аналогичной по размеру многослойной шины 1300x530-533 семейства автомобилей КрАЗ — 4 500 кг.

ТС С РОТОРНО-ВИНТОВЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

Машины с роторно-винтовым движителем (РВД) занимают особое место в транспортной технике. Они могут уверенно передвигаться по различным деформируемым опорным поверхностям, таким как заболоченная местность, снег, вода и разбитый лёд («шуга»), песок и т. д. Область наиболее рационального применения транспортных средств с роторно-винтовым движителем — это переходные зоны от воды к суше и глубокий снег. Эксплуатация вне этих условий и на твёрдых опорных поверхностях приводит к значительному увеличению затрат мощности и к быстрому износу профиля движителя.

Машинами с РВД занимались в Великобритании, США и Японии. В России работы по роторно-винтовой технике велись в основном в АМО «ЗИЛ» (при создании аварийно-спасательных машин для поиска приземлившихся космических аппаратов), КАДИ и ОНИЛВМ НГТУ такими учёными, как В. И. Вологдин, И. А. Ерасов, В. Е. Колотилин, Н. Ф. Кошарный, А. А. Крживитский, А. П. Куляшов, В. А. Шапкин, и другими авторами.

Роторно-винтовой движитель (рис. 8) обладает относительно простой конструкцией и представляет собой полый водоизмещающий цилиндр диаметром d_o с навитыми на него по всей длине винтовыми лопастями (выступами) с шагом навивки T , длиной базового цилиндра ротора $L_{БЦ}$, общей длиной ротора L_p , углом подъёма винтовой линии φ_n и толщиной лопасти t_b [8].

Характер взаимодействия РВД с опорной поверхностью определяется трением о грунт и поведением массы грунта, заключённого между витками ротора. Величина сопротивления движению машин с РВД зависит от сцепного веса и глубины погружения цилиндра ротора транспортного средства. Увеличение погружения РВД в полотно пути с $0,25d_o$ до $0,5d_o$ вызывает увеличение сопротивления движению в три раза.

Сцепные качества меньше зависят от сцепного веса и в большей степени определяются геометрией РВД. При неизменных прочих параметрах машины сила тяги увеличивается при уменьшении угла подъёма винтовой линии лопасти и уменьшается с увеличением коэффициента трения материала лопасти о полотно пути. Эксплуатационные качества машин с РВД повышаются с увеличением высоты выступов винтовой линии.

Величина угла подъёма винтовой линии является одним из основных параметров РВД, вполне определённым для каждого вида опорной поверхности. Так, например, наилучший угол подъёма винтовой линии лопасти РВД для движения по воде составляет око-



Рисунок 9. ТС с РВД ГПИ-72 производства НГТУ

ло 50° , для движения по снегу — 42° , для движения по грязи и песку — 30° . При увеличении угла подъёма винтовой линии РВД его коэффициент полезного действия увеличивается. Максимальный коэффициент полезного действия, равный 0,8, можно получить при угле подъёма винтовой линии $40-45^\circ$. Минимально допустимый коэффициент полезного действия, равный 0,5, соответствует углу подъёма винтовой линии $25-35^\circ$ [29, 30]. То есть, чтобы получить одинаково приемлемые эксплуатационные характеристики для каждого типа опорной поверхности, желательно иметь свой угол подъёма винтовой линии. Следовательно, для каждого типа опорной поверхности рационально иметь РВД со своими параметрами.

Таблица 1. Достоинства и недостатки различных движителей ТС высокой проходимости

Гусеничный движитель	
<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> • большая площадь опоры, обеспечивающая низкие средние давления ТС на опорную поверхность; • высокие тягово-сцепные качества; • эффект перекрытия чередующихся неровностей полотна пути, сглаживающий колебания от вертикального перемещения корпуса ТС 	<p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> • неравномерность распределения давлений по длине площади контакта гусеницы с опорной поверхностью; • неравномерность вращения гусеницы из-за звенчатости гусеничной цепи, вызывающая большие динамические нагрузки в движителе и трансмиссии; • жёсткий контакт гусеницы с твёрдой опорной поверхностью, вызывающий значительные вибрации и высокий уровень шума; • большая масса и сложность конструкции ходовой части; • большое сопротивление движению, особенно на повороте; • низкий ресурс движителя
Пневмогусеничный движитель	
<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> • значительно меньшие максимальные давления на опорную поверхность и их более равномерное распределение; • более высокие тягово-сцепные качества на опорных поверхностях с низкой несущей способностью; • высокая эластичность и хорошие демпфирующие свойства, снижающие вибрации и динамические нагрузки в ходовой части и трансмиссии; • меньшая масса при той же площади контакта с опорной поверхностью 	<p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> • низкий ресурс при движении по дорогам с твёрдым покрытием; • высокий коэффициент сопротивления движению на твёрдых поверхностях; • неустойчивое движение на высоких скоростях по дорогам с твёрдым опорным основанием; • уязвимость движителя (риск прокола)
Колёсный движитель на шинах сверхнизкого давления	
<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> • экологичность; • возможность движения по дорогам общего пользования; • поворот за счёт управляемых колёс; • управление автомобильного типа; • ресурс движителя выше, чем у гусениц; • движитель имеет высокие демпфирующие свойства; • значительно меньшие максимальные давления на опорную поверхность и их более равномерное распределение; • движитель обеспечивает плавучесть ТС; • меньшая металлоёмкость конструкций 	<p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> • низкий ресурс при движении по дорогам с твёрдым покрытием; • низкая грузоподъёмность при значительных габаритах движителя; • уязвимость движителя (риск прокола); • низкие тягово-сцепные свойства; • проходимость движителя ниже, чем у гусеничных ТС и ТС с РВД; • высокий центр тяжести ТС; • низкая манёвренность; • неустойчивое движение на высоких скоростях по дорогам с твёрдым опорным основанием
Роторно-винтовой движитель	
<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> • большая площадь опоры, обеспечивающая низкие средние давления ТС на опорную поверхность; • тягово-сцепные качества на опорных поверхностях с низкой несущей способностью превосходят показатели гусеничных ТС; • высокая проходимость; • высокая манёвренность; • движитель обеспечивает плавучесть ТС и возможность движения по воде; • простота конструкции и минимум конструктивных элементов 	<p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> • быстрый износ движителя при движении по твёрдым опорным основаниям; • большие потери на трение во время движения; • тяговые свойства зависят от конфигурации движителя для конкретного опорного основания; • низкий ресурс движителя; • металлоёмкость конструкций

Таблица 2. Условия применимости различных движителей для ТС высокой проходимости

Гусеничный движитель	Движение практически по любым опорным основаниям, кроме водной поверхности (необходимо дополнительное водоизмещение). Благодаря высоким тягово-сцепным качествам возможно использовать ТС с данным движителем для выполнения транспортных и технологических операций в районах с менее уязвимой экологией. Из-за низких демпфирующих свойств движителя данные ТС не могут обеспечить достаточного комфорта при выполнении пассажирских перевозок
Пневмогусеничный движитель	Движение по любым опорным основаниям, в том числе и по водной поверхности, если водоизмещение пневмогусениц достаточно. Благодаря особенностям движителя возможно использовать ТС с данным движителем для выполнения транспортных и технологических операций без существенного вреда для экологии. Демпфирующие свойства движителя позволяют использовать ТС для пассажирских перевозок
Движитель на шинах сверхнизкого давления	Движение по любым опорным основаниям, в том числе и по водной поверхности, если водоизмещение движителей достаточно, а также возможность движения по дорогам общего пользования. Данный тип движителя целесообразно применять для работы в переходных районах, где необходимо двигаться как в условиях бездорожья, так и по дорогам общего пользования. Подходит для выполнения пассажирских перевозок в труднодоступных районах. Однако относительно низкая грузоподъемность ТС с данным типом движителя ограничивает применимость в качестве транспортно-технологического средства
Роторно-винтовой движитель	Движение практически по любым опорным основаниям (кроме скальных пород), включая водную поверхность без ограничений, и по любым другим опорным основаниям, кроме твердых (асфальта, бетона, каменистого грунта и т. д.). Благодаря высоким тягово-сцепным качествам возможно использовать ТС с данным движителем для выполнения транспортных и технологических операций в районах с менее уязвимой экологией. Наилучшим образом подходит для районов с опорными основаниями с экстремально низкой несущей способностью. Данный тип движителя лучшим образом подходит для работы в районах, где необходимо двигаться как по воде, так и по суше, а также выходить на лёд (необорудованный берег). Из-за низких демпфирующих свойств движителя данные ТС не могут обеспечить достаточного комфорта при выполнении пассажирских перевозок

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ ТС ВЫСОКОЙ ПРОХОДИМОСТИ

Для наглядности основные достоинства и недостатки рассматриваемых движителей были сведены в табл. 1.

ВЫВОДЫ

Для выбора оптимального типа движителя для ТС высокой проходимости необходимо определить характерные условия эксплуатации, включая природно-климатические и дорожно-грунтовые. Сопоставив и сравнив основные преимущества и недостатки рассматриваемых типов движителей, можно сделать вывод об их применимости для тех или иных условий и операций (табл. 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Агейкин Я. С. Вездеходные колёсные и комбинированные движители. — М.: Машиностроение, 1972. — 184 с.
2. Армейские автомобили: в 3 ч. / под ред. А. С. Антонова. — М.: Изд-во МО, 1970. — Ч. 1. — 543 с.
3. Снегоходные машины / А. В. Барахтанов, В. И. Ершов, А. П. Куляшов, С. В. Рукавишников. — Горький: Волго-Вятское книжное изд-во, 1986. — 192 с.
4. Барахтанов А. В. Проходимость автомобиля / А. В. Барахтанов, В. В. Беляков, В. Н. Кравец. — Н. Новгород: НГТУ, 1996. — 198 с.
5. Брянский Ю. А. Специальные движители транспортных средств: учебное пособие. — М.: Изд-во МАДИ, 1983. — 65 с.
6. Веселов Н. Б. Вездеходные транспортно-технологические машины: конструкции, конструирование и расчёт. — Н. Новгород: Бегемот, 2010. — 318 с.
7. Вонг Д. Теория наземных транспортных средств: пер. с англ. / под ред. А. И. Аксёнова. — М.: Машиностроение, 1982. — 284 с.
8. Движители специальных строительных и дорожных машин / В. Е. Колотилин, А. А. Кошурина, А. П. Куляшов и др. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 1995. — 208 с.
9. Забавников Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин. — М.: Машиностроение, 1975. — 448 с.
10. Котиев Г. О. Комплексное поддрессирование высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин / Г. О. Котиев, Е. Б. Сарач. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 184 с.
11. Наумов В. Н. Тяговый расчёт гусеничной машины: учебное пособие / В. Н. Наумов, Г. О. Котиев, К. Ю. Машков. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 35 с.
12. Проектирование полноприводных колёсных машин: учебник для вузов: в 3 т. / Б. А. Афанасьев, Б. Н. Белоусов, Л. Ф. Жеглов и др. / под ред. А. А. Полунгяна. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 441 с.
13. Транспортные средства на высокоэластичных движителях / Н. Ф. Бочаров, В. И. Гусев, В. М. Семёнов, В. И. Соловьёв. — М.: Машиностроение, 1974. — 208 с.
14. Котляренко В. И. Научное обоснование создания и разработка ходовых систем транспортных средств на пневмоколёсных движителях сверхнизкого давления: дис. ... докт. техн. наук. — М., 2009. — 359 с.
15. Платонов В. Ф. Гусеничные транспортёры-тягачи / В. Ф. Платонов, А. Ф. Белоусов. — М.: Машиностроение, 1978. — 352 с.