

УДК 631.35

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ПО ОПОРАМ САМОХОДНОГО КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

О. В. РЕХЛИЦКИЙ, Ю. В. ЧУПРЫНИН

*Республиканское конструкторское унитарное предприятие
«ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике»,
г. Гомель, Республика Беларусь*

Введение

Правильное распределение массы в конструкции самоходного кормоуборочного комбайна закладывается на самом начальном этапе его проектирования. При планировании распределения массы разработчики должны руководствоваться совокупностью критериев, выполнение которых позволяет обеспечить самоходному кормоуборочному комбайну требуемые свойства.

Кормоуборочный комбайн состоит из самоходного измельчителя, включающего шасси и внутренние технологические органы, и адаптера, осуществляющего подачу технологической массы с поля. На самоходном кормоуборочном комбайне кроме заправочных топливных емкостей отсутствуют емкости для перевозимого груза или технологического продукта, заполнение или опорожнение которых может оказывать существенное влияние на величину и распределение массы. Основное влияние на изменение величины и распределения массы оказывает наличие, состояние и тип адаптера.

Самоходный кормоуборочный комбайн имеет несколько состояний, при которых существенно меняется и величина массы и ее распределение. Для обеспечения удовлетворительных тяговых свойств, продольной, поперечной устойчивости и управляемости необходимо на начальном этапе проектирования комбайна проводить анализ всех этих состояний и осуществлять рациональный подбор веса и расположения всех его агрегатов и агрегируемых с ним адаптеров.

Постановка задачи

При осуществлении кормоуборочным комбайном технологического процесса адаптер часть своего веса переносит на раму машины. Остальная часть веса адаптера воспринимается через опорные элементы поверхностью поля, если на этом технологическом процессе требуется копировать рельеф поля. На этом режиме присутствует дополнительная сила продольного сопротивления передвижению за счет трения опорных элементов адаптера по опорной поверхности. На этом режиме адаптер имеет минимальную высоту центра тяжести, что также оказывает влияние на устойчивость и перераспределение массы по опорам на уклонах.

При осуществлении коротких технологических переездов по полю или по полевым дорогам, адаптер может транспортироваться на самом комбайне. На этом режиме адаптер переводится навесным устройством комбайна в верхнее транспортное положение, но не меняет своей формы.

При осуществлении длительных транспортных переездов адаптер, если его конструкцией предусмотрена транспортировка на машине на длительные расстояния, поднимается вверх и переводится в транспортное состояние. Это также приводит к изменению расположения его центра тяжести и по вертикали и по горизонтали.

Те адаптеры, конструкцией которых не предусмотрена транспортировка на машине на длительное расстояние, снимаются с машины и перевозятся на специальной транспортной тележке. В этом случае существенно меняется распределение веса комбайна по опорам и величина опорных реакций. Кроме того, к общей массе комбайна, участвующего в длительном транспортном переезде, как по дорогам общего пользования, так и по полевым и проселочным дорогам, имеющим повышенное сопротивление самопередвижению, добавляется масса транспортной тележки, что в условиях разгрузки колес переднего ведущего моста при движении машины в гору может оказать существенное влияние на снижение тяговых свойств по критерию сцепления с опорной поверхностью.

Все это многообразие ситуаций дополняется тем, что комбайн имеет некоторый набор адаптеров, имеющих отличие по весу и расположению центра масс.

При проектировании самоходного кормоуборочного комбайна необходимо подобрать такие геометрические параметры и такое расположение центра масс, чтобы во всех возможных его состояниях со всем шлейфом предусмотренных адаптеров выполнялись условия продольной и поперечной устойчивости, управляемости и обеспечивалось достаточное сцепление ведущих колес с опорной поверхностью для преодоления предусмотренных технической характеристикой уклонов.

Для обеспечения этого условия необходимо на начальном этапе проектирования комбайна осуществлять оценку распределения массы машины по опорам. Для этого в свою очередь требуется разработать универсальный и удобный математический аппарат, позволяющий проводить расчет реакций на опорах комбайна с учетом продольных и поперечных уклонов местности.

Математическая модель

Расчетная схема каркаса кормоуборочного комбайна для составления математической модели определения нагрузок на опоры приведена на рис. 1.

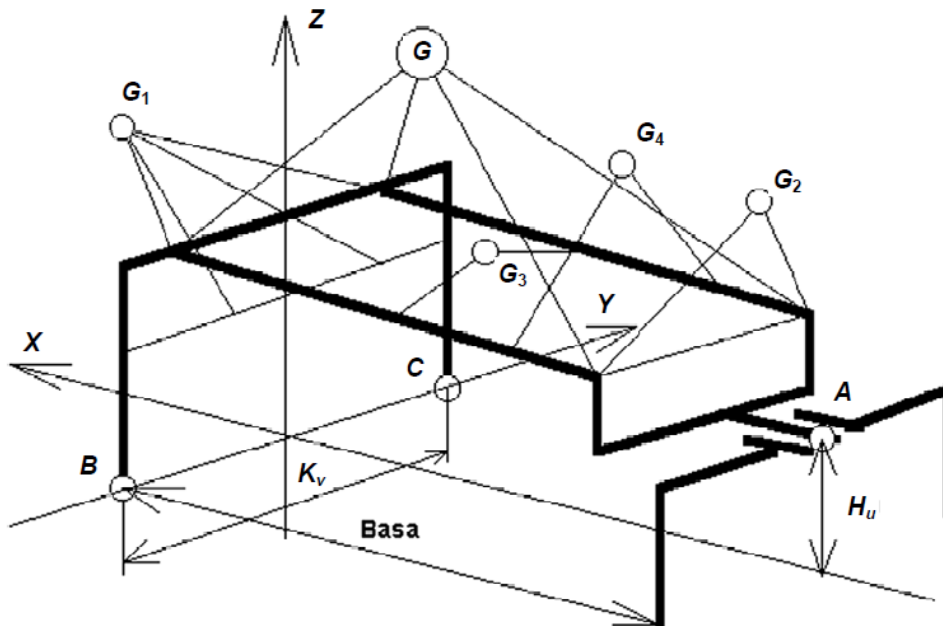


Рис. 1. Расчетная схема для определения нагрузок на опоры:
 A – шарнир качания управляемого моста; B и C – левое и правое колесо ведущего моста соответственно; G_1 , G_2 , G_3 – центры тяжести различных узлов и агрегатов;
 G – суммарный центр тяжести комбайна; K_v – колеса ведущих колес;
 Basa – база комбайна; H_u – высота шарнира управляемого моста

Самоходные кормоуборочные комбайны не имеют подвески ходовой части в том виде, в котором она присутствует у автомобилей и некоторых тракторов. Копирование рельефа опорной поверхности они осуществляют за счет качающейся балки управляемого моста. При этом, опираясь на четыре колеса, рама комбайна фактически опирается на три точки, двумя из которых являются ведущие колеса, третьей является шарнир качания управляемого моста. Причем вес самого управляемого моста с колесами участвует в формировании нагрузок на колеса, но не участвует при определении углов статической поперечной устойчивости.

Для разработки математического аппарата воспользуемся трехточечной схемой расположения опор и векторным способом [1] определения реакций.

Начало системы координат расположено на опорной поверхности на пересечении оси ведущего моста с продольной геометрической осью комбайна. Ось X направлена вперед по ходу движения; ось Y направлена вправо; ось Z направлена вверх. Направление осей X, Y, Z показано на расчетной схеме.

Для нахождения центра тяжести (ЦТ) воспользуемся выражениями (1)–(5):

$$M_{\Sigma} = \sum_i M_i; \tag{1}$$

$$X_{\Sigma} = \frac{\sum_i (M_i X_i)}{M_{\Sigma}}; \tag{2}$$

$$Y_{\Sigma} = \frac{\sum_i (M_i Y_i)}{M_{\Sigma}}; \tag{3}$$

$$Z_{\Sigma} = \frac{\sum_i (M_i Z_i)}{M_{\Sigma}}; \tag{4}$$

$$\vec{G}_{\Sigma} = \begin{bmatrix} X_{\Sigma} \\ Y_{\Sigma} \\ Z_{\Sigma} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

где M_i, M_{Σ} – масса i -го узла и суммарная масса комбайна соответственно; $X_i, Y_i, Z_i, X_{\Sigma}, Y_{\Sigma}, Z_{\Sigma}$ – продольная, поперечная и вертикальная координата центра тяжести i -го узла и ЦТ комбайна соответственно; \vec{G}_{Σ} – вектор суммарного центра тяжести комбайна.

Сформируем вектора опор A, B и C :

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} -Basa \\ 0 \\ H_u \end{bmatrix}; \tag{6}$$

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -K_v \cdot 0,5 \\ 0 \end{bmatrix}; \tag{7}$$

$$\vec{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_v \cdot 0,5 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Выражения (6)–(8) являются векторами опор для случая, когда ведущий и управляемый мосты симметричны относительно продольной оси комбайна.

Сформируем вспомогательный вектор для моделирования уклона опорной поверхности в продольной и поперечной плоскости, являющийся аналогом повернутого относительно опорной поверхности вектора гравитации (9):

$$\vec{Z} = \begin{bmatrix} \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha + \beta) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где α – угол поперечного уклона опорной поверхности; β – угол продольного уклона опорной поверхности.

Сформируем вектора взаимного расположения опор и ЦТ (10)–(14):

$$\vec{AB} = \vec{B} - \vec{A}; \quad (10)$$

$$\vec{AC} = \vec{C} - \vec{A}; \quad (11)$$

$$\vec{BC} = \vec{C} - \vec{B}; \quad (12)$$

$$\vec{AG}_\Sigma = \vec{G}_\Sigma - \vec{A}; \quad (13)$$

$$\vec{BG}_\Sigma = \vec{G}_\Sigma - \vec{B}. \quad (14)$$

Значения вертикальных реакций можно определить из выражений (15)–(17):

$$R_b = \frac{(\vec{AC} \times \vec{AG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{BC} \times \vec{AC}) \vec{Z}} M_\Sigma g; \quad (15)$$

$$R_c = \frac{(\vec{AB} \times \vec{BG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{AB} \times \vec{BC}) \vec{Z}} M_\Sigma g; \quad (16)$$

$$R_a = \frac{(\vec{BC} \times \vec{BG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{AC} \times \vec{BC}) \vec{Z}} M_\Sigma g, \quad (17)$$

где R_a , R_b , R_c – вертикальные реакции в опорах A , B и C соответственно; g – ускорение свободного падения.

Выражения (15)–(17) дают значения именно вертикальных составляющих реакций в опорах. Для получения нормальных реакций, значения, полученные из выражений (15)–(17), необходимо умножить на косинус угла уклона (18)–(20).

$$R_{bN} = \frac{(\vec{AC} \times \vec{AG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{BC} \times \vec{AC}) \vec{Z}} M_\Sigma g \cos(\alpha + \beta); \quad (18)$$

$$R_{cN} = \frac{(\vec{AB} \times \vec{BG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{AB} \times \vec{BC}) \vec{Z}} M_\Sigma g \cos(\alpha + \beta); \quad (19)$$

$$R_{aN} = \frac{(\vec{BC} \times \vec{BG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{AC} \times \vec{BC}) \vec{Z}} M_\Sigma g \cos(\alpha + \beta). \quad (20)$$

Вышеприведенные выражения (9)–(20) позволяют определить реакции в опорах комбайна в зависимости от углов продольного или поперечного уклона, но только при условии, что эти углы не вводятся в вышеприведенные выражения одновременно, т. е. выражения (9)–(20) дают правильный результат, если выполняется условие (21):

$$\begin{cases} \text{если } \alpha \neq 0, \text{ то } \beta = 0; \\ \text{если } \beta \neq 0, \text{ то } \alpha = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Для одновременной оценки влияния продольного и поперечного уклона требуется дополнение этих выражений элементами пространственного поворота векторов. В этом случае все вышеприведенные выражения стали бы весьма громоздкими и неудобными для использования.

Необходимо отметить, что при комбинировании продольного и поперечного уклона местности затрудняется интерпретация результатов расчета, так как суммарный угол при этом все равно не должен превышать максимально допустимое значение и продольного и поперечного уклона, предусмотренного инструкцией по эксплуатации комбайна. Поэтому целесообразность оценки изменения реакций в опорах при комбинированном уклоне является весьма сомнительной. Тем более, что при комбинированном наклоне опорной поверхности всегда можно так сориентировать комбайн, чтобы этот наклон был только продольным или поперечным.

Продольная, поперечная устойчивость и управляемость комбайна

Для определения предельных углов статической поперечной устойчивости можно воспользоваться выражениями (22) и (23):

$$\alpha_{\text{лев}} = \arctg \left(\frac{\vec{AB}_X (-\vec{B}_Y + \vec{G}_Y) - \vec{B}_Y \vec{G}_X}{\vec{AB}_X \vec{G}_Z + \vec{A}_Z \vec{G}_X} \right); \quad (22)$$

$$\alpha_{\text{прав}} = \arctg \left(\frac{\vec{AC}_X (\vec{C}_Y - \vec{G}_Y) + \vec{C}_Y \vec{G}_X}{\vec{AC}_X \vec{G}_Z + \vec{A}_Z \vec{G}_X} \right), \quad (23)$$

где $\alpha_{\text{лев}}$, $\alpha_{\text{прав}}$ – предельные углы поперечной статической устойчивости комбайна влево и вправо по ходу движения соответственно.

На рис. 2 и 3 показаны зависимости углов предельной поперечной статической устойчивости от высоты и продольного смещения ЦТ.

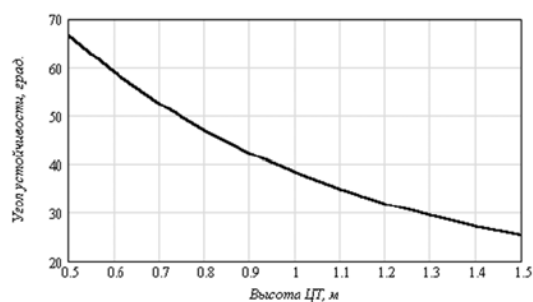


Рис. 2. Зависимость угла поперечной устойчивости от высоты ЦТ, град

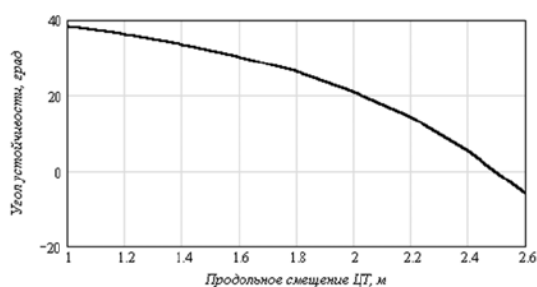


Рис. 3. Зависимость угла поперечной устойчивости от продольного смещения ЦТ, град

Как видно из приведенных графиков, подъем и продольное смещение ЦТ от ведущего моста назад ухудшает поперечную устойчивость вплоть до гарантированного опрокидывания при переходе через точку качания управляемого моста.

Поперечное смещение центра тяжести перераспределяет углы предельной поперечной устойчивости в разные стороны. Подъем шарнира качания управляемого моста при прочих неизменных параметрах улучшает поперечную устойчивость.

Как показывает практика, определенные по вышеприведенным зависимостям углы предельной поперечной статической устойчивости будут отличаться от фактических экспериментально определенных при опрокидывании комбайна на 1,5–2 градуса за счет податливости шин. Поэтому эту коррекцию необходимо учесть при проектной оценке устойчивости разрабатываемого комбайна.

Под продольной устойчивостью комбайна подразумевается способность в конкретном состоянии передвигаться по опорной поверхности на предусмотренной допустимой скорости без отрыва колес даже по пересеченной местности. Первым признаком приближения к потере продольной устойчивости является появление ярко выраженного галопирования.

Под управляемостью комбайна подразумевается наличие достаточной силы сцепления управляемых колес с опорной поверхностью для обеспечения необходимой величины бокового управляющего усилия.

В качестве критерия оценки продольной устойчивости и управляемости может выступать процент нагрузки на управляемый мост от всей массы. В соответствии с действующими стандартами, регламентирующими этот показатель для сельскохозяйственных машин, необходимо обеспечить, чтобы нагрузка на управляемый мост составляла не менее 12 % от веса всего агрегата и не менее 20 % от массы трактора. Из этих двух критериев ограничивающим, как правило, является первый.

Как показывает практика, для обеспечения продольной устойчивости, управляемости и исключения галопирования самоходного кормоуборочного комбайна достаточно, чтобы нагрузка на управляемый мост на горизонте составляла не менее 16 %

от веса агрегата, а на предусмотренных инструкцией по эксплуатации уклонах не падала ниже 12 %.

Тяговые свойства по критерию сцепления

Под предельными тяговыми свойствами по критерию сцепления с опорной поверхностью подразумевается [2]–[4] наличие на ведущих колесах достаточной силы сцепления с опорной поверхностью для преодоления силы сопротивления перекатыванию колес агрегата и силы сопротивления преодолеваемого уклона.

Для обеспечения требуемых тяговых свойств по критерию сцепления с опорной поверхностью необходимо, чтобы предельная сила сцепления ведущих колес уравновешивалась силой сопротивления перекатыванию и силой сопротивления преодолеваемого уклона при наиболее неблагоприятном сочетании коэффициента сопротивления перекатыванию и коэффициента предельного сцепления на угле преодолеваемого уклона не меньшем, чем максимально предусмотренный инструкцией по эксплуатации комбайна.

Проиллюстрируем оценку тяговых свойств на простом примере.

Имеется самоходный кормоуборочный комбайн с собственной массой 6000 кг и с распределением собственного веса на горизонте 60/40 %. Имеется адаптер с массой 2000 кг, при агрегатировании с комбайном в рабочем положении его центр масс находится впереди от ведущего моста на расстоянии 1,4 м.

Суммарную силу сопротивления передвижению с учетом преодолеваемого уклона и предельную силу тяги по критерию сцепления можно определить из выражений (24) и (25):

$$F_c = R_{\Sigma N} f_{\text{сн}} + M_{\Sigma} g \sin(-\beta); \tag{24}$$

$$F_T = (R_{bN} + R_{cN}) f_{\text{сн}}, \tag{25}$$

где F_c и F_T – сила суммарного сопротивления передвижению и сила предельной тяги по критерию сцепления соответственно; $R_{\Sigma N}$, R_{bN} и R_{cN} – суммарная нормальная опорная реакция и опорные нормальные реакции на ведущих колесах соответственно; $f_{\text{сн}}$ – коэффициент сопротивления перекатыванию; $f_{\text{сн}}$ – коэффициент предельного сцепления с опорной поверхностью; β – угол преодолеваемого уклона, (+) спуск, (–) подъем.

На рис. 4 показаны графики изменения силы сопротивления и предельной силы тяги в зависимости от преодолеваемого уклона для состояния комбайна с навешенным адаптером для коэффициента сопротивления перекатыванию равного 0,11 и коэффициента предельного сцепления равного 0,7.

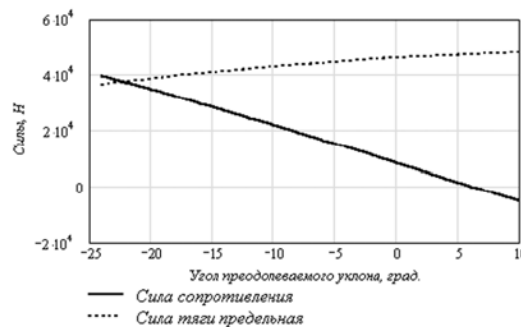


Рис. 4. Графики изменения силы сопротивления и предельной силы тяги (Н) в зависимости от угла преодолеваемого уклона (град) для состояния комбайна с навешенным адаптером

Для состояния с адаптером на тележке суммарную силу сопротивления передвижению с учетом преодолеваемого уклона можно определить из выражения (26):

$$F_c = (R_{\Sigma V} + (M_{ад} + M_{тел})g \cos(\beta)) \cdot f_{сп} + (M_{\Sigma} + M_{ад} + M_{тел})g \sin(-\beta), \quad (26)$$

где $M_{ад}$ и $M_{тел}$ – масса адаптера и масса тележки соответственно.

На рис. 5 показаны графики, аналогичные графикам на рис. 4, для состояния комбайна с адаптером на транспортной тележке.

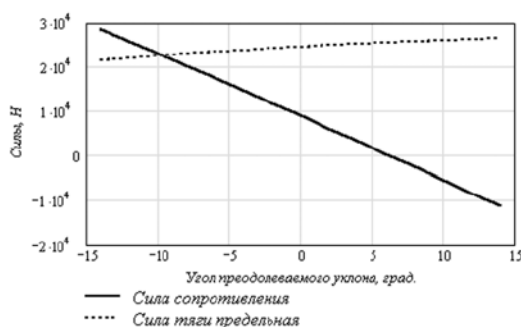


Рис. 5. Графики изменения силы сопротивления и предельной силы тяги (H) в зависимости от угла преодолеваемого уклона (град) для состояния комбайна с адаптером на тележке

Анализируя графики, приведенные на рис. 4 и 5, можно заметить, что в состоянии с навешенным адаптером (рис. 4) по критерию ограничения сцепления ведущих колес с опорной поверхностью комбайн способен преодолевать подъем 22 градуса, а в состоянии с адаптером на тележке (рис. 5) равновесие между суммарной силой сопротивления передвижению и предельной силой сцепления достигается при преодолении подъема всего лишь 10 градусов.

Этот пример иллюстрирует, как сильно могут отличаться тягово сцепные свойства комбайна в зависимости от его состояния. И это необходимо учитывать при проектировании.

Необходимо также обратить внимание на то, что при наличии разновеса по бортам, вызванного поперечным смещением центра тяжести и наличия межбортового дифференциала (или другого типа дифференцирования, например гидравлического), при нахождении предельной тяговой силы необходимо на коэффициент сцепления умножать не сумму реакций на ведущих колесах, а удвоенную реакцию на том ведущем колесе, на котором она имеет меньшую величину. Аналогичным образом необходимо оценивать тягово-сцепные свойства на поперечных уклонах, где происходит перераспределение реакций по бортам.

Заключение

1. При компоновке комбайна с целью обеспечения заданных параметров поперечной устойчивости необходимо учесть то, что увеличение высоты центра тяжести приводит к снижению поперечной устойчивости, поперечное смещение относительно продольной оси перераспределяет углы поперечной устойчивости по бортам, продольное смещение центра тяжести от ведущего моста к шарниру качания управляемого снижает поперечную устойчивость, а подъем шарнира качания увеличивает устойчивость.

2. Оценку продольной устойчивости и управляемости необходимо осуществлять по величине нагрузки на управляемый мост на горизонте и продольных уклонах. Для

обеспечения продольной устойчивости и управляемости, отсутствия галопирования достаточно обеспечить нагрузку на управляемый мост не менее 16 % от массы агрегата на горизонте и не менее 12 % на предельно допустимом продольном уклоне.

3. Для определения угла предельного подъема по критерию сцепления ведущих колес с опорной поверхностью необходимо определить суммарную силу сопротивления передвижению от сопротивления перекачиванию и сопротивления подъему, определить предельную силу сцепления ведущих колес с опорной поверхностью и найти угол продольного уклона, на котором эти силы уравниваются друг друга.

4. В случае имеющегося развеса по бортам, вызванного поперечным смещением центра тяжести, и при наличии дифференцированного привода ведущих колес определение предельной силы сцепления на уклоне необходимо осуществлять по удвоенной меньшей реакции из двух ведущих колес.

Использование предложенной методики на начальном этапе проектирования самоходного кормоуборочного комбайна позволяет подобрать такое распределение массы, параметры и расположение всего шлейфа адаптеров, которое, максимально используя все резервы принятой компоновочной схемы, обеспечивает удовлетворительные мобильные свойства во всех возможных состояниях.

Литература

1. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука ; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981.
2. Чудаков, Д. А., Основы теории трактора и автомобиля / Д. А. Чудаков. – М. : Изд-во с.-х. лит., 1962.
3. Гуськов, В. В. Тракторы, теория / В. В. Гуськов. – М. : Машиностроение, 1988.
4. Скотников, В. А. Проходимость машин / В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов. – Минск : Наука и техника, 1982.

Получено 28.10.2013 г.