

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЮ ТРАНСПОРТНО-ТЯГОВОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

Е.И. Бердов, В.Н. Бондарь, Г.М. Изгарев

Приводится анализ взаимосвязей между коэффициентом сопротивления передвижению гусеничной транспортно-тяговой машины по деформируемой опорной поверхности и основными конструктивными параметрами гусеничного движителя для различных условий работы.

Сопротивление передвижению P_f любой транспортно-тяговой гусеничной машины (ТТГМ), например трактора, является важной составляющей тягового баланса, во многом определяющей ее тягово-сцепные и топливо-экономические показатели. В свою очередь, величина P_f зависит от большого числа внешних и внутренних факторов. К внутренним относятся, в частности, факторы, определяемые конструктивными параметрами ходовой системы машины, а к внешним - факторы, зависящие от условия работы, физико-механических свойств опорной поверхности, варианта агрегатирования и т. п.

При движении ТТГМ по деформируемому грунту (что является наиболее вероятным событием) сопротивление передвижению P_f складывается, в основном, из двух составляющих:

$$P_f = P_{f,x} + P_{f,z},$$

где $P_{f,x}$ и $P_{f,z}$ - соответственно сопротивление передвижению вследствие потерь в элементах ходовой системы машины и обусловленное деформацией грунта опорной частью гусеничного движителя.

Считается, что величина $P_{f,x}$ практически не зависит от характера взаимодействия гусеничного движителя с грунтом и, как правило, учитывается при определении КПД трансмиссии ТТГМ [1]. Аналитическое определение $P_{f,x}$ с достаточной для практических целей точностью не представляет особых затруднений и подробно описано в различных источниках по теории гусеничных машин. Что же касается второй составляющей - $P_{f,z}$, то ее величина в решающей степени зависит как от физико-механических параметров грунта, так и от конструктивных параметров гусеничного движителя. Несмотря на определенное количество работ, посвященных исследованиям взаимодействия гусеничного движителя с деформируемой опорной поверхностью [2, 3], взаимосвязь составляющих потерь на деформацию грунта с конструктивными параметрами гусеничного движителя изучена недостаточно. В частности, практически отсутствуют публикации, в которых бы рассматривались вопросы влияния степени погружения грунтозацепов (имеющихся, в большинстве случаев, на гусеничных звеньях ТТГМ) в деформируемую опорную поверхность на сопротивление передвижению гусеничной машины. Между тем, как отмечает проф. Н.А. Забавниковым, потери на деформацию (прессование) грунта следует относить к главной, определяющей группе потерь, в решающей степени влияющей на величину сопротивления передвижению гусеничной машины. Экспериментальные исследования показывают, что степень внедрения грунтозацепов гусеничного движителя в грунт влияет не только на величину удельного давления машины на опорную поверхность, но и на ее сопротивление передвижению [4]. Однако корректное выделение вышеуказанных показателей из большой совокупности внешних и внутренних факторов требует организации весьма сложного и экономически затратного эксперимента. Поэтому становится очевидной важность и актуальность продолжения теоретических исследований влияния основных конструктивных параметров гусеничного движителя, снабженного грунтозацепами (во взаимосвязи с физико-механическими характеристиками грунта) на сопротивление передвижению ТТГМ.

При общем анализе составляющих тягового баланса ТТГМ, для исключения влияния веса

машины $G = m_3 g$ (где m_3 - эксплуатационная масса), вместо силы сопротивления передвижению P_f чаще используют удельный показатель $f = P_f / G$, называемый коэффициентом сопротивления передвижению.

Рассмотрим взаимосвязь между наиболее весомой составляющей коэффициента сопротивления передвижению f_2 , обусловленной деформацией грунта, и основными параметрами гусеничного движителя - длиной опорной поверхности L и шириной b гусениц, а также средним удельным давлением машины $q_{cp} = G / (L \cdot b)$ на опорную поверхность.

Известно, что взаимодействие гусеничного движителя с грунтом сопровождается вертикальными и горизонтальными деформациями последнего. Причем эти деформации для каждого опорного звена гусеничной цепи нарастают по мере продвижения звена от переднего опорного катка движителя к заднему, т. е. зависят от цикла нагружения.

Для повышения тягово-сцепных качеств ТТГМ каждое звено гусеничной цепи, как отмечалось выше, имеет на подошве гусеницы один или несколько грунтозацепов. Если пренебречь упругими деформациями грунта (они, в большинстве случаев, весьма малы), а также процессом накопления деформации при циклическом нагружении, то на основании данных [5, 6] графическая интерпретация процесса погружения гусеничного звена в грунт может иметь вид, представленный на рис. 1.

Для дальнейшего анализа условимся считать, что при установившемся движении гусеничной машины по горизонтальной деформируемой поверхности опорные катки жестко закреплены на раме гусеничной тележки и равномерно передают вертикальные усилия от веса машины на опорную поверхность гусениц, а также введем следующие обозначения:

- Y - вертикальная нагрузка, действующая на опорные звенья гусениц;
- H - суммарная осадка (погружение в грунт) опорной части гусеничного звена;
- n - число звеньев на опорной поверхности гусениц;
- h - высота грунтозацепа гусеницы;
- Y' - вертикальная нагрузка, действующая на единичное гусеничное звено;
- c, μ' - коэффициенты, зависящие соответственно от конструктивных параметров грунтозацепа и от механических свойств грунта;
- E - модуль общей деформации грунта в стадии уплотнения;
- χ - коэффициент интенсивности накопления пластичной деформации грунта при циклическом нагружении;
- q_{cp} - среднее удельное давление опорной части гусеничного движителя на грунт;
- q_{cp} - удельное давление на грунт, создаваемое опорной частью грунтозацепов гусеницы;
- q_1 - удельное давление на грунт, необходимое для полного заглубления грунтозацепа при первом цикле нагружения;
- Y_1 - вертикальная нагрузка на опорное звено гусеницы, требуемая для полного заглубления грунтозацепа при первом цикле нагружения;
- r - текущее число циклов нагружения;
- h_r - величина заглубления грунтозацепа при r циклах нагружения;
- q_r, Y_r - соответственно удельное давление на грунт и вертикальная нагрузка на звено гусеницы, необходимые для полного заглубления грунтозацепа при r циклах нагружения;
- k - общее число циклов нагружения опорных звеньев гусениц (равно числу опорных катков);
- p - число циклов нагружения подошвы гусеничного звена;
- m - номер цикла нагружения, соответствующий началу погружения в грунт подошвы звена;
- h_m, H_m - соответственно величина осадки грунтозацепа и звена при m -м цикле нагружения;
- Y_m - вертикальная нагрузка на звено при m -м цикле нагружения;
- h_n - суммарная величина осадки подошвы гусеничного звена;
- h_{nm} - осадка подошвы гусеничного звена при m циклах нагружения;

h_y - условная величина осадки подошвы звена при m циклах нагружения;

h_p - осадка подошвы гусеничного звена при p циклах нагружения.

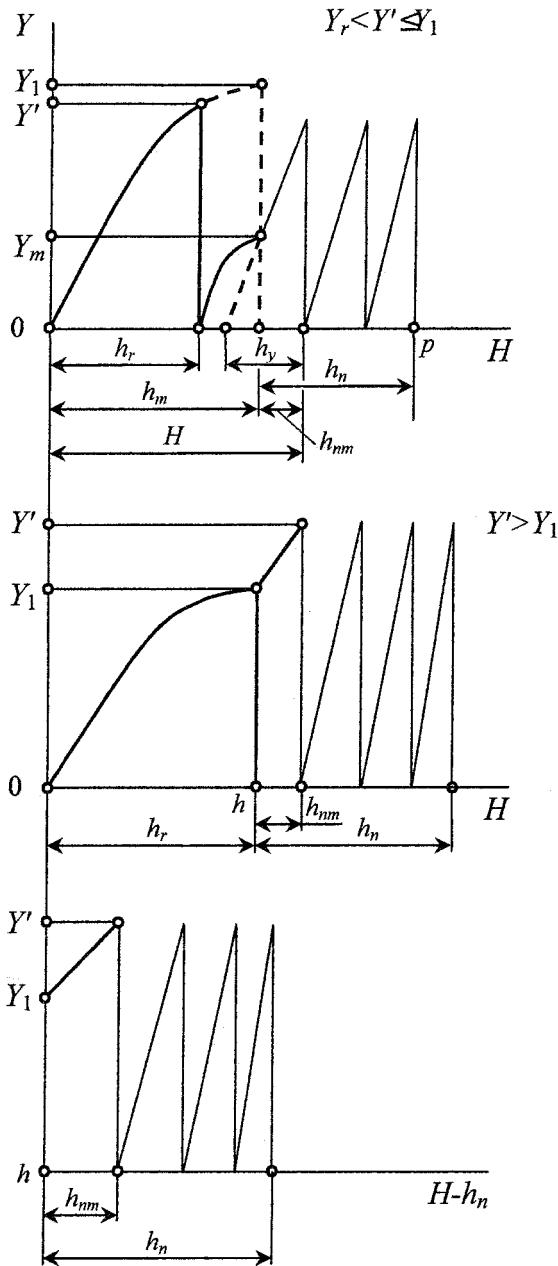


Рис. 1. Процесс нагружения звена гусеницы

Условимся считать, что удельное давление на грунт, необходимое для полного заглубления грунтозацепов при первом цикле нагружения (т. е. при наезде первого опорного катка ТТГМ на гусеничное звено), равно

$$q_1 = nY_1/bL.$$

Удельное давление на грунт, необходимое для полного заглубления грунтозацепов при m циклах нагружения, равно

$$q_m = nY_m/bL.$$

Площадь сечения грунтозацепа, как правило, много меньше площади подошвы звена гусеницы (а $q_{cp} \gg q_{cp}$), поэтому для дальнейшего анализа выделим среднее удельное давление на

На рис. 1, а показан случай, когда вертикальная нагрузка на единичное звено Y' меньше нагрузки Y_1 , требующейся для полного заглубления грунтозацепа при первом цикле нагружения, но больше нагрузки Y_r , соответствующей полному заглублению грунтозацепа при r циклах нагружения. На рис 1, б показан случай, когда вертикальная нагрузка на единичное звено Y' (передаваемая через соответствующий опорный каток гусеничного движителя) достаточна, чтобы уже в первом цикле произвести полное внедрение грунтозацепа и нагрузить подошву гусеничного звена. На рис. 1, в показан процесс нагружения подошвы гусеничного звена. Возможен также случай (например, при работе ТТГМ на плотном, малодеформируемом грунте или на грунте с поверхностным уплотнением), когда грунтозацепы полностью не погружаются и при конечном цикле нагружения (на рис. 1 не показан).

Аналитическое описание процесса внедрения опорной части гусеничного звена, снабженного грунтозацепом, с учетом его геометрии и реологических свойств грунта, в деформируемую опорную поверхность представляет собой весьма сложную задачу, точное решение которой до настоящего времени отсутствует. Поэтому для анализа зависимости между вертикальной нагрузкой Y , действующей на единичное звено гусеницы с грунтозацепом высотой h , и суммарной осадкой опорной части звена H воспользуемся эмпирической зависимостью [7] (справедливой при $H \leq h$)

$$Y' = cH^{\mu'}.$$

С учетом изложенного, среднее удельное давление q_{cp} опорной части гусеничного движителя на грунт составит

$$q_{cp} = \frac{ncH^{\mu'}}{bL}.$$

Расчет и конструирование

грунт $\Delta q_{cp} = q_{cp} - q_{cp}$, необходимое для вдавливания только подошвы звена.

В соответствии с данными [8]

$$\Delta q_{cp} = \frac{\Delta Y}{bL} = E \frac{h_m}{b},$$

где ΔY – доля вертикальной нагрузки на гусеничное звено, соответствующая вдавлыванию подошвы.

Тогда общая вертикальная нагрузка Y на опорную поверхность (численно равная весу G машины) составит:

$$Y = nY_1 + \Delta q_{cp} bL = ncH^{\mu'} + Eh_m L.$$

Используя данные [9], зависимость вертикальной деформации грунта от количества циклов нагружений m можно для рассматриваемого случая выразить уравнением

$$h_m = h + h_{nm} (1 + \chi \ln m),$$

где $h_{nm} = \Delta q_{cp} b / E$.

Составляющую коэффициента сопротивления передвижению f_z можно считать отношением работы A , затраченной на вертикальную деформацию грунта, к вертикальной нагрузке в пределах площади опорной поверхности гусеницы. Таким образом, при отсутствии буксования движителей составляющая f_z может быть представлена в виде

$$f_z = \left(\frac{A_1 + A_2}{L} \right) / Y = f_1 + f_2,$$

где A_1, A_2 – работа, требуемая для заглабления соответственно грунтозацепов и подошвы гусеничных звеньев;

f_1, f_2 – доли составляющей коэффициента сопротивления движению, соответствующие работам A_1 и A_2 .

В зависимости от величины q_{cp} возможны три различных варианта.

I. $q_{cp} \leq q_z$. В заданном диапазоне удельных давлений (при работе ТТГМ на плотных грунтах) грунтозацепы погружаются на некоторую глубину $H_r \leq h$, при этом не происходит погружения в грунт подошвы звена гусеницы (следовательно, $A_2 = 0$). В данном случае

$$f_z^I = \frac{A_1}{YL} = \frac{\int_0^H ncH^{\mu'} dH}{YL} = \frac{\int_0^{h_1} ncH^{\mu'} dH}{YL} + \frac{\int_{h_1}^{h_r} nc\Delta H_i^{\mu'} dH}{YL} = \frac{H}{(1 + \mu')L},$$

где $h_1 = \left(\frac{q_{cp} bL}{nc} \right)^{\frac{1}{\mu'}}$ – осадка грунтозацепа при первом цикле нагружения;

$h_r = h_1 (1 + \chi \ln r)$ – осадка грунтозацепа при r циклах нагружения;

$c\Delta H_i^{\mu'}$ – текущий прирост вертикальной нагрузки на гусеничное звено.

В итоге, с учетом принятых обозначений, для 1-го случая имеем:

$$f_z^I = \left(\frac{q_{cp} bL}{nc} \right)^{\frac{1}{\mu'}} \frac{1 + \chi \ln r}{(1 + \mu')L}. \quad (1)$$

II. $q_r \leq q_{cp} \leq q_{zp}$. В этом случае нагружения гусеничного движителя имеют место как не полностью заглубленные в грунт грунтозацепы ($h_r \leq h$), так и полностью заглубленные вместе с подошвой гусеничного звена (на глубину h_m). Для данной зоны $m = k - p$.

Определим значение q_m , при котором на m -м цикле произойдет полное погружение грунтозацепа и начнется внедрение в грунт подошвы гусеничного звена:

$$q_m = \frac{ncm}{bL} (h_m - h_{m-1})^{\mu'}$$

В результате подстановок и преобразований, в итоге получим:

$$q_m = c \left(\chi \ln \frac{m}{m-1} \right) \left\{ h - \left(\frac{q_{cp} bL}{nc} \right)^{\frac{1}{\mu'}} [1 + \chi \ln(m-1)] \right\}^{\mu'}$$

$$\text{В этом случае } q_{cp} = q_m + E \frac{h_{nm}}{b}; \quad h_{nm} = h_m - h = \frac{q_{cp} - q_m b}{E}$$

Работа, совершаемая при заглублении грунтозацепа, может быть выражена суммой

$$A_1 = \sum_{i=1}^{m-1} \int_0^{h_i} ncH^{\mu'} dH + \int_{h_{m-1}}^h Y dh = \frac{h_1 [1 + \chi \ln(m-1)] (Y - Y_m) + Y_m h}{1 + \mu'}$$

тогда

$$f_1 = \frac{\left(\frac{q_{cp} bL}{nc} \right)^{\frac{1}{\mu'}} [1 + \chi \ln(m-1)] \left(1 - \frac{q_m}{q_{cp}} \right) + \frac{q_m}{q_{cp}} h}{(1 + \mu')L}$$

Работа, совершаемая при вертикальной деформации грунта подошвой гусеничного звена, может быть представлена в следующем виде:

$$A_2 = \int_0^{h_m} Y dH + \int_0^{h_m} EhL dH + \sum_{i=r}^{i=p} \int_{h_{i-1}}^{h_i} EhL dH = Yh_m + 0,5h_{nm}(Y - Y_m) + 0,5Y(h_p - h_{nm}),$$

$$\text{где } h_p = h_{nm} \left[1 + \left(\frac{q_{cp}}{q_{cp} - q_m} \right) \chi \ln p \right]$$

Окончательно, после преобразований, можно записать

$$A_2 = \frac{(q_{cp} - q_m)}{2E} \left\{ Y_0 + Y \left[1 + \left(\frac{q_{cp}}{q_{cp} - q_m} \right) \chi \ln p \right] \right\}, \text{ откуда } f_2 = \frac{q_{cp} b}{2EL} \left(1 + \chi \ln p - \frac{q_m^2}{q_{cp}^2} \right)$$

Согласно полученным выражениям для f_1 и f_2 , коэффициент сопротивления передвижению ТТГМ для II-го варианта определится по формуле

$$f_2^{\text{II}} = f_1 + f_2 = \frac{\left(\frac{q_{cp} bL}{nc} \right)^{\frac{1}{\mu'}} [1 + \chi \ln(m-1)] \cdot \left(1 - \frac{q_m}{q_{cp}} \right) + \frac{q_m}{q_{cp}} h}{(1 + \mu')L} + \frac{q_{cp} b}{2EL} \left[1 + \chi \ln p - \left(\frac{q_m}{q_{cp}} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

III. $q_{cp} > q_{zp}$ ($m = 1$; $p = r$). Удельное давление гусеничного движителя на опорную поверхность в этом случае достаточно для того, чтобы уже при первом цикле нагружения произошло полное заглубление грунтозацепа и началось погружение в грунт подошвы гусеничного звена.

Работу, затрачиваемую на уплотнение грунта грунтозацепами, можно представить как

$$A_1 = \int_0^h ncH^{\mu'} dH = \frac{nc h^{\mu'+1}}{1 + \mu'}$$

Расчет и конструирование

Выражения для определения долей составляющих коэффициента сопротивления передвижению (аналогично предыдущему случаю) будут иметь вид:

$$f_1 = \frac{q_{cp}}{q_{cp}(1+\mu')L} \left(\frac{q_{cp}bL}{nc} \right)^{\frac{1}{\mu'}} = \frac{q_{cp}h}{q_{cp}(1+\mu')L}; \quad f_2 = \frac{bq_{cp}}{2EL} \left[1 + \chi \ln r - \left(\frac{q_{cp}}{q_{cp}} \right)^2 \right].$$

Таким образом, суммарный коэффициент сопротивления передвижению (учитывающий уплотнение грунта грунтозацепом и подошвой гусеничного звена) можно определить из следующей выражения

$$f_2^{\text{III}} = \frac{h}{(1+\mu')L} \cdot \frac{q_{cp}}{q_{cp}} + \frac{bq_{cp}}{2EL} \left[1 + \chi \ln r - \left(\frac{q_{cp}}{q_{cp}} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Преобразуем выражение (3) с целью последующего упрощения:

$$f_2^{\text{III}} = \left[\frac{hq_{cp}}{(1+\mu')L} - \frac{bq_{cp}^2}{2EL} \right] \frac{1}{q_{cp}} + q_{cp} \frac{b(1+\chi \ln r)}{2EL}, \quad (4)$$

или, в общем виде:

$$f_2^{\text{III}} = \frac{B}{q_{cp}} + Cq_{cp}, \quad (5)$$

где $B = \left[\frac{hq_{cp}}{(1+\mu')L} - \frac{bq_{cp}^2}{2EL} \right]$; $C = \frac{b(1+\chi \ln r)}{2EL}$.

Анализ зависимостей (3), (4), (5) показывает, что в диапазоне $q_{cp} > q_{cp}$ коэффициент сопротивления передвижению f_2^{III} зависит от двух составляющих (рис. 2): часть потерь, определяемых работой погружения грунтозацепа (пунктирная линия 1), уменьшается по гиперболической зависимости (т.е. $f_1 = B/q_{cp}$), а потери на деформацию (уплотнение) грунта подошвой гусеничного звена ($f_2 = Cq_{cp}$) прямо пропорциональны удельному давлению (пунктирная линия 2).

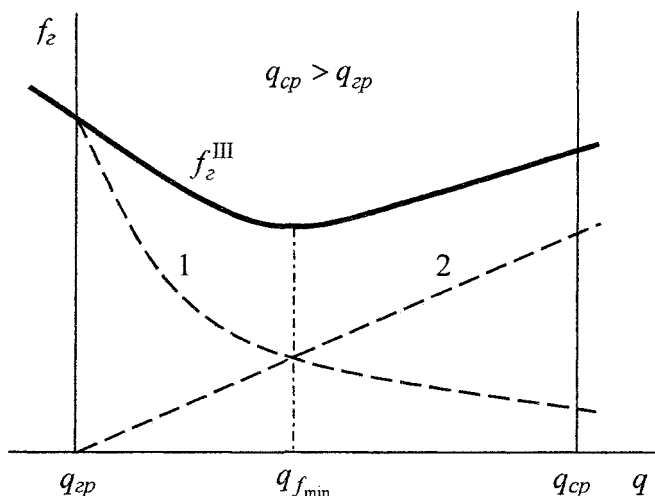


Рис. 2. Зависимость коэффициент сопротивления передвижению от величин q_{cp} и q_{cp}

Таким образом, в данной зоне, при сложении гиперболы с прямой, зависимость (5) будет иметь минимум в точке $q_{f_{\min}}$ (см. рис. 2), значение которого можно определить аналитически:

$$q_{f_{\min}} = (B/C)^{\frac{1}{2}}.$$

Выводы

1. Зависимость коэффициента сопротивления передвижению ТТГМ вследствие деформации грунта f_2 сложным образом зависит от величины удельного давления машины на опорную поверхность. При этом имеются три функционально различных зоны:

а) в первой зоне, соответствующей неполному погружению грунтозацепов ($q_{cp} \leq q_r$) потери на передвижение f_2^I пропорциональны удельному давлению в $1/\mu'$ -й степени;

б) во второй зоне ($q_r \leq q_{cp} \leq q_{zp}$) часть общего числа циклов нагружения затрачивается на заглубление грунтозацепов, а остальные - нагружают подошву звена; по мере увеличения удельного давления дискретно уменьшается число циклов m , необходимых для полного внедрения грунтозацепов, а величина f_2^{II} изменяется по сложному полиэкстремальному закону;

в) в третьей зоне ($q_{cp} > q_{zp}$) имеется минимум функции $f_2^{III}(q_{cp})$, величина которого для какого-либо грунта определяется конструкцией гусеничного звена и числом опорных катков (циклов нагружения) на длине опорной части гусеницы.

2. Влияние конструктивных параметров гусеничного движителя (длины опорной поверхности L , ширины гусеницы b и др.) также различно в каждой зоне. В частности, при $q_{cp} > q_{zp}$ величина коэффициента f_2 увеличивается прямо пропорционально ширине гусеницы b и обратно пропорционально (в определенных пределах) длине опорной поверхности L .

Адекватность приведенных выше зависимостей фактическим данным нашла подтверждение в результате экспериментальной проверки на различных объектах испытаний [4, 10, 11]. Данный анализ может быть положен в основу методики выбора рациональных конструктивных параметров ходовых систем ТТГМ на стадии проектирования.

Литература

1. Кычев В.Н., Бердов Е.И. Основы теории и анализ конструкций тракторов и автомобилей: Курс лекций. - Челябинск: РИО ЧГАУ, 2004. - 140 с.

2. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. - М.: Машиностроение, 1975. - 448 с.

3. Wong J. Y. Theory of ground vehicles. - Chichester: A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, 1978. - 284p.

4. Исследование с помощью корреляционного и спектрального анализа влияния подвески, характеристик грунта, вида выполняемой работы на динамическую погруженность элементов ходовой и несущей систем. Отчет ЧФ НАТИ. Руков. темы И.Н. Доскалович. - Челябинск, 1985. - арх. № 2797. - 74 с.

5. Васильев А.В., Докучаева Е.Н., Уткин-Любовцев О.Л. Влияние конструктивных параметров гусеничного трактора на его тягово-сцепные свойства. - М.: Машиностроение, 1969. - 191с.

6. Скотников В.А., Пономарев А.В., Климанов А.В. Проходимость машин. - Минск: Наука и техника, 1982. - 328 с.

7. Платонов В.Ф., Белоусов А.Ф., Олейников Н.Г. Гусеничные транспортеры-тягачи. - М.: Машиностроение, 1978. - 350 с.

8. Бабков В.Ф., Гербург-Гейбович А.В. Основы грунтоведения и механики грунтов. - М.: Автотрансиздат, 1964. - 366 с.

9. Хартуга Н.Я., Ивлев В.М. Реологические свойства грунтов. - М.: Автотрансиздат, 1961. - 72 с.

10. Сравнительный качественный анализ технического уровня базовых моделей тракторов ОАО «ЧТЗ» и зарубежных фирм. Отчет ГосНИИ ПТ. Руков. темы В.Н. Бондарь. - Челябинск, 1997.-Арх. №111.-423 с.

И. Теоретические и экспериментальные исследования оптимальных параметров сельскохозяйственной модификации трактора Т-170М1.03 и агрегатов на его базе. Отчет ГосНИИ ПТ. Отв. исп. Е.И. Бердов. - Челябинск, 1997. -Арх. № 113. -148 с.