

УДК 621.879

Койнаш В. А., Рудь Д. А.

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГУСЕНИЧНОГО ПРИВОДА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Повышение надежности гусеничных механизмов экскаваторов в большей части определяется предупреждением аварийных остановок работы вследствие поломок, в том числе и гусеничных звеньев. Решение данной проблемы тесно связано с исследованиями нагрузок в элементах гусеничного движителя. Данным вопросам посвящено множество работ [1–6], однако до сих пор задача является актуальной как для ученых, так и для инженеров.

Целью статьи является обоснование имитационной модели гусеничного движителя, в которой учтены геометрические, кинематические, жесткостные параметры входящих в него элементов, геометрия и физико-механические свойства подошвы забоя.

Гусеничный механизм удобнее рассматривать как объект, состоящий из подсистем, взаимодействующих между собой по определенным правилам. Структурная схема механизма (рис. 1) включает в себя следующие подсистемы: гусеничные звенья, шарниры гусеничной цепи, катки, гусеничные рамы, нижние рамы.

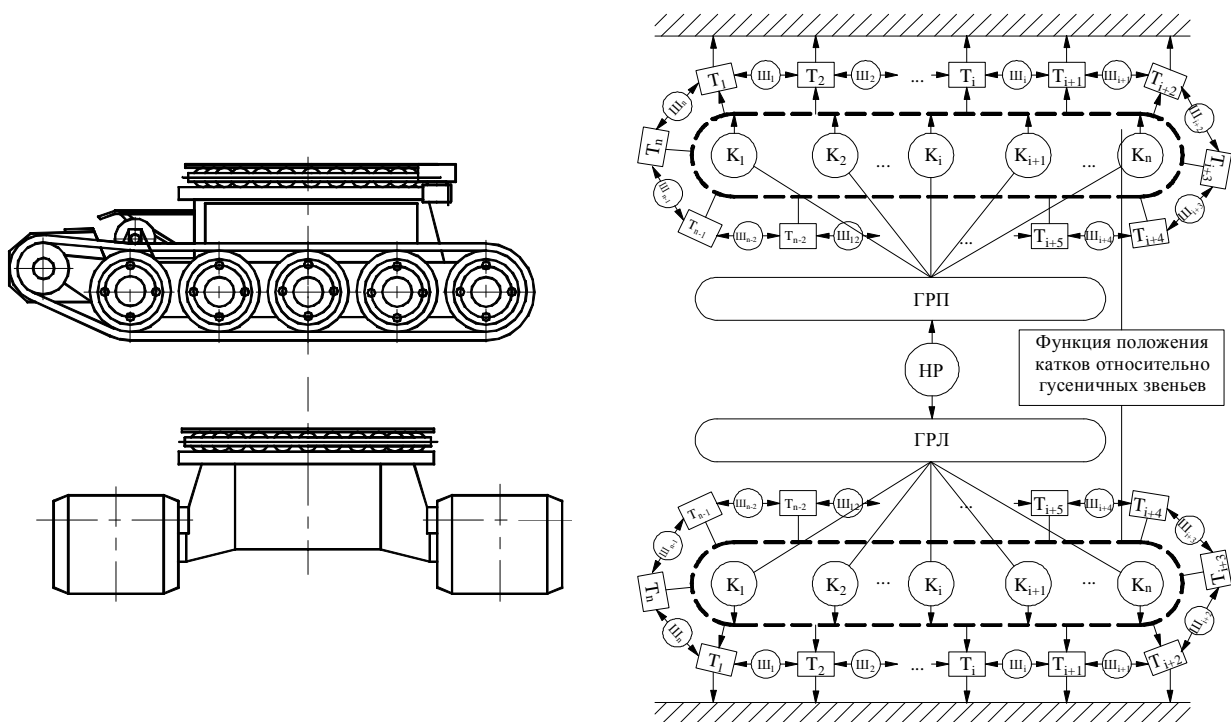


Рис. 1. Обоснование структурной схемы имитационной модели гусеничного хода

Используя принципы имитационного моделирования [5] разрабатывается математическая модель, где моделируемыми параметрами выступают: взаимодействие гусеничных звеньев между собой в составе гусеничной ленты, взаимодействие гусеничной ленты с опорной площадкой грунта, взаимодействие гусеничной ленты с опорными катками, взаимодействие опорных катков с гусеничными рамами.

Ограничения и допущения: гусеничная цепь представляет собой шарнирную систему без зазоров, жесткостные и геометрические параметры элементов ходового оборудования известны, ограничения и допущения, принимаемые в механике, теории упругости, пластичности и механике грунтов.

Согласно принятой структурной схеме выполним математическое описание составляющих ее подсистем.

Создание модели гусеничного звена. В общем случае гусеничное звено воспринимает нагрузки от опорных катков, нагрузки от действия соседних звеньев, нагрузки со стороны грунта (рис. 2). Таким образом, это поле нагрузок должно быть включено в расчетную схему.

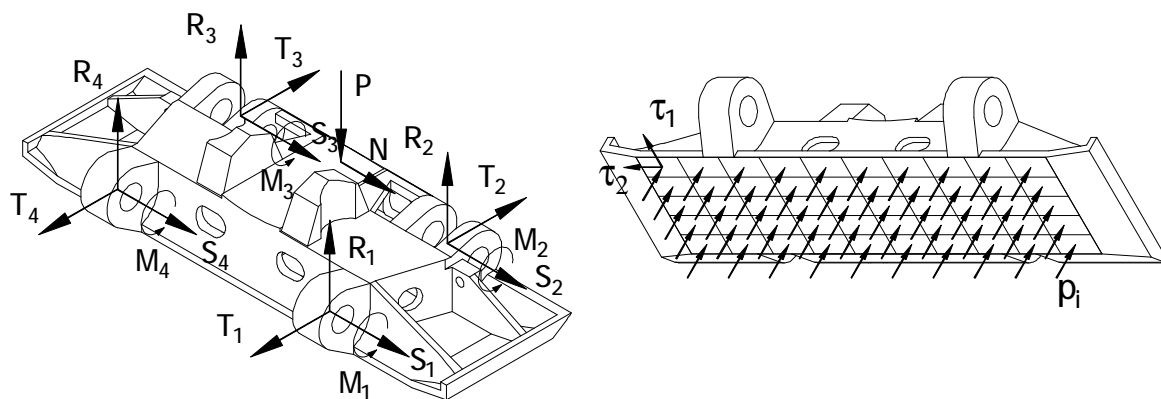


Рис. 2. Схема сил, действующих на гусеничные звенья

Для описания связей между силами и деформациями воспользуемся математическим аппаратом метода конечных элементов. Гусеничное звено представляется как трехмерная конструкция (рис. 3, а), воспринимающая пространственные нагрузки. Аппроксимация гусеничных звеньев производится объемными конечными элементами [4] (рис. 3, б). Жесткостные характеристики модели звена обеспечиваются самой геометрией и соответствующими характеристиками материала.

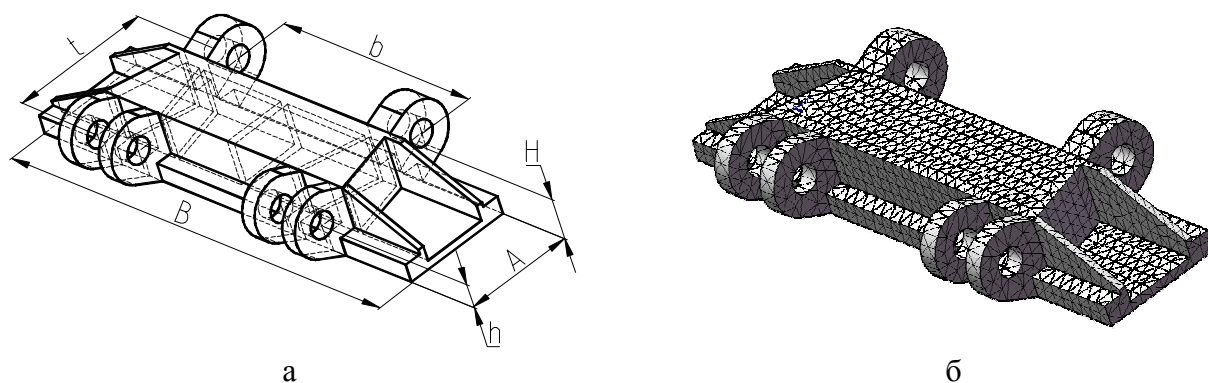


Рис. 3. Создание расчетной схемы гусеничного звена

Для получения матрицы жесткости звена воспользуемся математическим аппаратом метода конечных элементов в геометрически линейной постановке [4]. Так как задаче рассматривается трехмерное упругое тело, перемещения произвольной точки которого определяется вектором, заданным соотношением:

$$\{U\}^T = [u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)].$$

Напряжения в объеме описываются вектором-столбцом:

$$\{s\}^T = [s_{xx} \ s_{yy} \ s_{zz} \ s_{xy} \ s_{yz} \ s_{zx}].$$

Деформации в объеме:

$$\{e\}^T = [e_{XX} \ e_{YY} \ e_{ZZ} \ e_{XY} \ e_{YZ} \ e_{ZX} ] .$$

Зависимость между напряжениями и деформациями имеет вид:

$$\{s\} = [D]\{e\},$$

где  $[D]$  – матрица упругости.

Матрица жесткости каждого элемента вычисляется по формуле:

$$k^{(e)} = \iiint_V B^T DB dV = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T DB \cdot \det[J] dr ds dt ,$$

где  $B$  – матрица дифференцирования вида.

Общая матрица жесткости ансамбля строится из матриц жесткости отдельных элементов.

$$K = \sum_i k_i^{(e)} .$$

Аналогичным образом создается вектор внешних нагрузок ансамбля. Система уравнений для всей конструкции будет иметь вид:

$$[U]\{U\} = \{P\} .$$

Созданная таким образом расчетная схема имеет очень большое количество неизвестных, возрастающее с увеличением степени дискретизации. Снизить размерность задачи предлагается путем создания суперэлемента, во «внешние» узлы которого включены узлы, используемые в дальнейшем при составлении всей модели. На рис. 4 показаны зоны, узлы которых должны быть включены во «внешние»: 1 – проушины, 2 – место воздействия опорного катка, 3 – поверхность, взаимодействующая с грунтом.

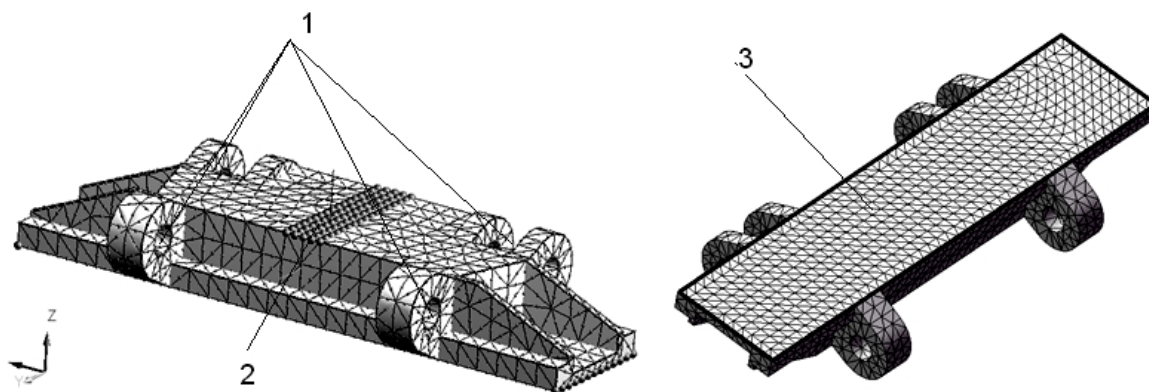


Рис. 4. Зоны расположения внешних узлов

Используя полученные ранее соотношения жесткости для структуры гусеничного звена, разделим степени свободы «внешних» (индекс E) и «внутренних» (индекс L) узлов [4].

$$\begin{bmatrix} K_{LL} & K_{LE} \\ K_{EL} & K_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_L \\ P_E \end{bmatrix} .$$

Исключая внутренние степени свободы формируем соотношения жесткости, связывающие только внешние степени свободы:

$$\bar{K}_E V_E = \bar{F}_E.$$

Матрица жесткости суперэлемента вычисляется по формуле:

$$\bar{K}_E = K_{EE} - z_{LE}^T D_{LL}^{-1} z_{LE},$$

где  $z_{LE}$  – матрица, которая определяется из уравнения.

$$R_{LL}^T z_{LE} = K_{LE},$$

где  $R_{LL}^T$  – треугольная матрица, полученная путем разложения  $K_{LL}$  по методу Холецкого [5].

$D_{LL}$  – диагональная матрица, полученная при разложении Холецкого.

Соответствующий вектор сил вычисляем как:

$$\bar{F}_E = P_E - z_{LE}^T D_{LL}^{-1} z_{Lf},$$

где  $z_{Lf}$  – матрица, вычисляемая из выражения:

$$R_{LL}^T z_{Lf} = P_L.$$

Расчетная схема гусеничной ленты формируется на основе расчетных схем гусеничных звеньев путем объединения перемещений внешних узлов суперэлементов, моделирующих работу проушин. Сформированная таким образом модель гусеничной ленты имеет все основные свойства реальной конструкции с учетом принятых допущений:

Расчетная схема нижней и гусеничных рам, на которых действуют реакции со стороны катков и внешние силы (рис. 5, а), представляется как стержневая система эквивалентной жесткости в условиях пространственной нагрузки (рис. 5, б).

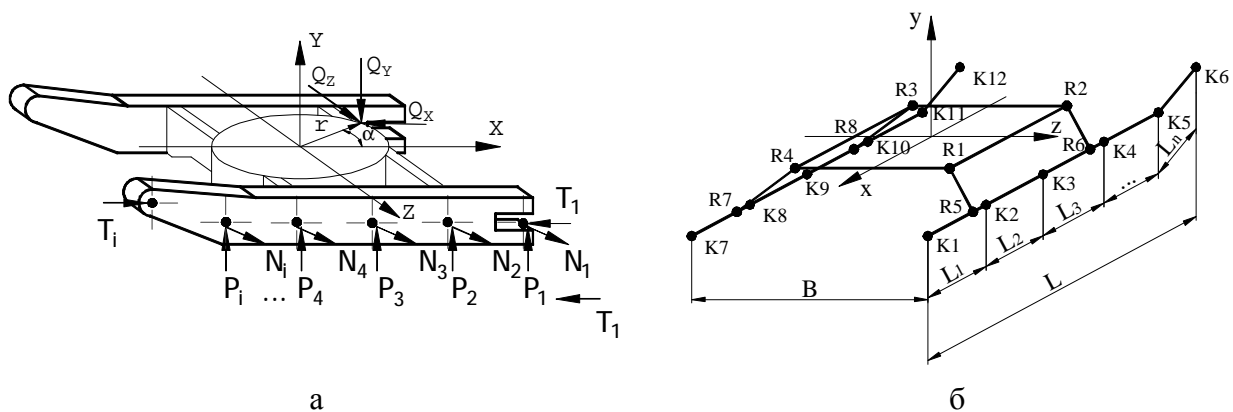


Рис. 5. Расчетная схема гусеничной рамы

Опорные катки моделируются стержневыми элементами эквивалентной жесткости, соединяющие узлы расчетной схемы гусеничной рамы с узлами гусеничных элементов, моделирующих дорожку качения.

Грунтовая площадка основания моделируется стержневыми элементами (рис. 5), работающими только на сжатие. Элементы в процессе расчета располагаются перпендикулярно опорной поверхности трака. Сила трения трака о грунт и момент трения в проушинах определяются предварительным пересчетом.

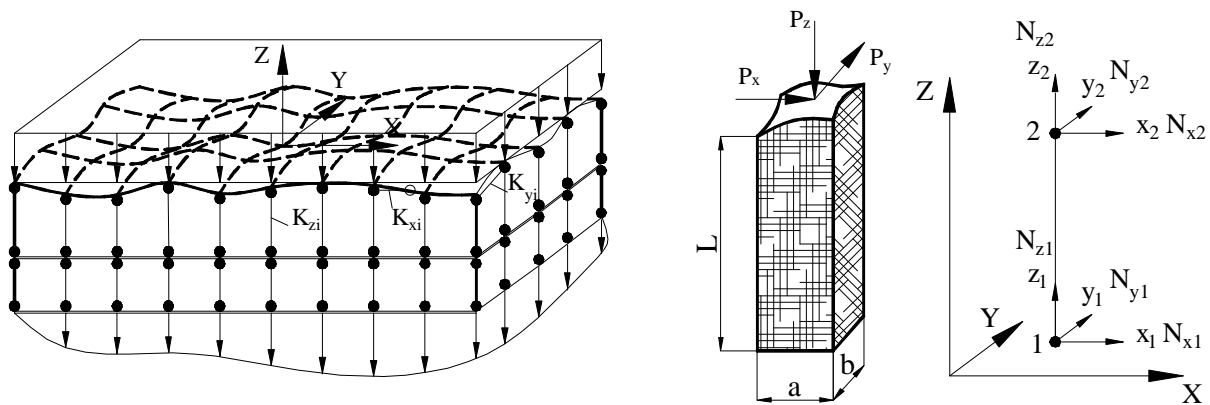


Рис. 5. Модель ґрунтового основи

Разрешающее уравнение в приращениях конечного элемента опорной поверхности ґрунта в матричном виде:

$$k_r \overline{\Delta q_r} = \overline{\Delta R_r},$$

где  $k_r$  – матрица жесткости r-го конечного элемента;

$\Delta q_r = (\Delta u_1, \Delta v_1, \Delta w_1, \Delta u_2, \Delta v_2, \Delta w_2)$  – вектор приростов узловых перемещений;

$\Delta R_r = (\Delta N_{x1}, \Delta N_{y1}, \Delta N_{z1}, \Delta N_{x2}, \Delta N_{y2}, \Delta N_{z2})$  – вектор приращений узловых реакций.

Расчетная схема математической модели всего гусеничного механизма передвижения формируется на основе расчетных схем ее составных частей, приложения внешних нагрузок и объединения, совместно работающих элементов (рис. 6)

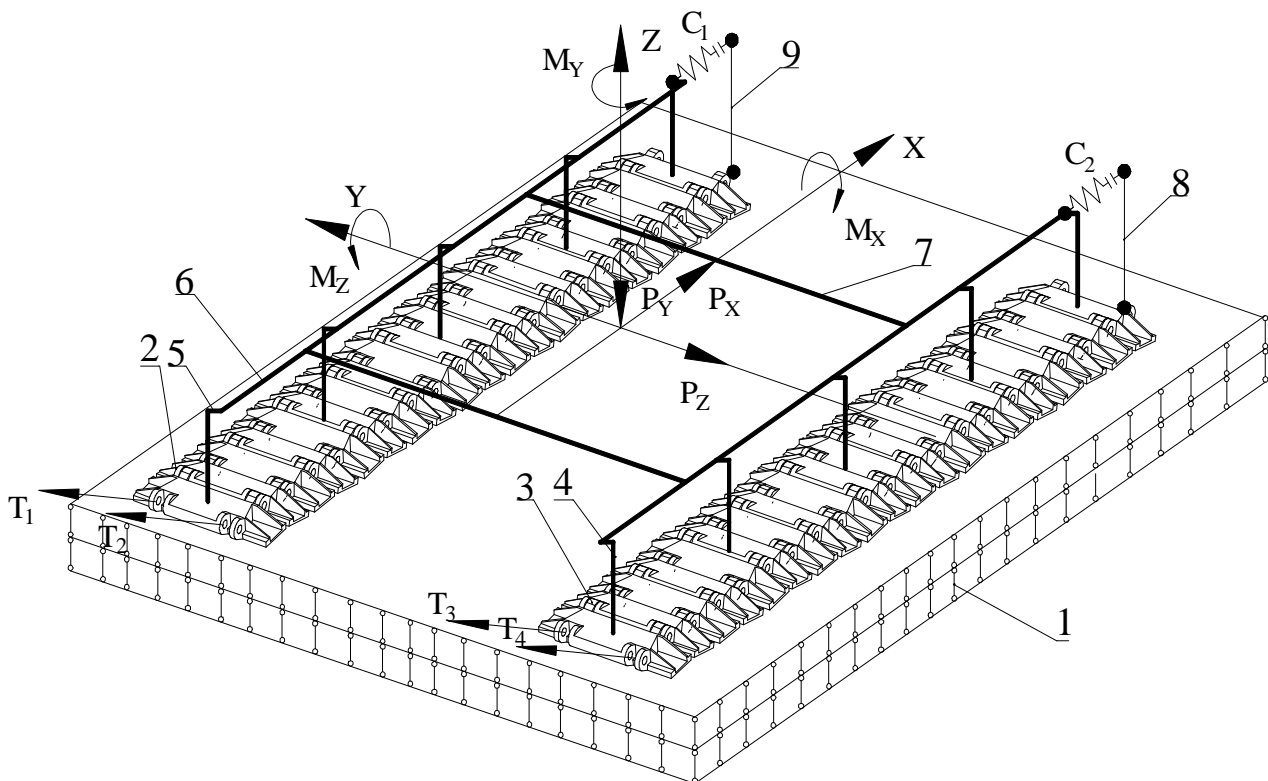


Рис. 6. Расчетная схема математической модели гусеничного механизма передвижения

Результат численного расчет перемещения шарниров гусеничной цепи для экскаватора ЭКГ-5Н при условии действия вертикальной нагрузки  $P_x = 1000$  кН приведен на рис. 7.

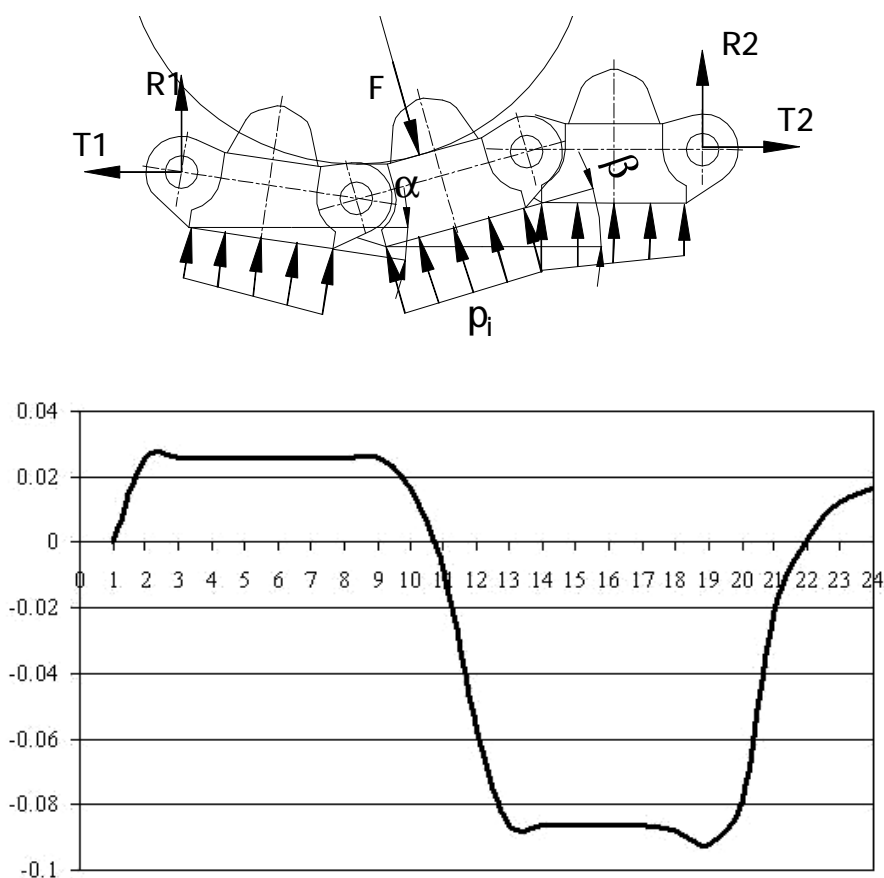


Рис. 7. Результат расчета перемещения шарниров гусеничной цепи для экскаватора ЭКГ-5Н

## ВЫВОДЫ

Реализация разработанной математической модели позволит исследовать влияние рабочих нагрузок экскаватора на условия работы опорных элементов, а также путем моделирования различных ситуаций прийти к рациональному выбору геометрических и силовых параметров гусеничных движителей экскаваторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Домбровский Н. Г. Теория и расчет гусеничного движителя землеройных машин / Н. Г. Домбровский, И. М. Гомозов, В. М. Гиллис. – К. : Техніка, 1970. – 192 с.
2. Забавников Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин / Н. А. Забавников. – М. : Машиностроение, 1975. – 448 с.
3. Платонов В. Ф. Гусеничные транспортеры-тягачи / В. Ф. Платонов. – М. : Машиностроение, 1978. – 351 с.
4. Сахаров А. С. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А. С. Сахаров, И. Альтенбах. – К. : Вища школа, 1982. – 480 с.
5. Томашевський В. М. Моделювання систем / В. М. Томашевський. – К. : Видавнична група ВНУ, 2005. – 352 с.
6. Крупко В. Г. Оценка нагрузок на опорные элементы механизмов передвижения землеройно-транспортных машин / В. Г. Крупко, В. А. Койнаш // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2004. – № 27. – С. 42–44.