МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Транспортные и технологические машины»

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 1-36 11 01 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование (по направлениям)» очной и заочной форм обучения

Могилев 2019

УДК 625.08:004.94
ББК 39.9:32.973
К 63

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой ТТМ «26» марта 2019 г., протокол № 8

Составитель канд. техн. наук, доц. И. В. Лесковец

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Е. Науменко

Методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 1-36 11 01 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» очной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ответственный за выпуск И. В. Лесковец

Технический редактор А. А. Подошевко

Компьютерная верстка М. А. Меленяко

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2019

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Содержание

Введение 4
Требования безопасности 5
1 Лабораторная работа № 1. Определение основных параметров бульдозера 6
2 Лабораторная работа № 2. Моделирование ДВС 13
3 Лабораторная работа № 3. Моделирование сцепления и гидротрансформатора 17
4 Лабораторная работа № 4. Общая динамическая модель гусеничного движителя 21
5 Лабораторная работа № 5. Моделирование рабочего оборудования бульдозера 25
6 Лабораторная работа № 6. Моделирование гусеничного бульдозера 30
Список литературы 32
Приложение А 33
Приложение Б. Отчетная ведомость по комплексу лабораторных работ 34

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Введение

Целью учебной дисциплины является формирование у студентов знаний, умений и навыков, позволяющих решать задачи, связанные с математическим моделированием систем и механизмов строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин, правильно и обоснованно с использованием методов математического моделирования и ЭВМ выбирать требуемые параметры и характеристики.

Целью лабораторных работ является формирование умений и навыков разработки математических моделей рабочих процессов строительных и дорожных машин (СДМ), проведения расчетов характеристик изучаемых машин.

Лабораторные работы проводятся в компьютерном классе.

По лабораторным работам каждый студент оформляет отчет, содержащий тему работы, цель, основные теоретические сведения, описание выполняемых задач, методик проведения вычислительных экспериментов, результаты эксперимента и выводы.

Защита лабораторной работы проводится во время занятий устно, письменно или в форме тестирования.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Требования безопасности

При работе электрооборудования необходимо соблюдать следующие меры безопасности:

– запрещается во время работы разъединять и соединять электрические разъемные соединения;

– запрещается снимать задние и боковые крышки корпусов оборудования;

– запрещается скручивать или передавливать сетевые и интерфейсные кабели;

– во избежание перегрева запрещается закрывать посторонними предметами вентиляционные отверстия в корпусах оборудования;

– запрещается оставлять работающее электрооборудование без присмотра;

– запрещается самостоятельно ремонтировать и производить техническое обслуживание электрооборудования. В случае обнаружения неполадок необходимо доложить заведующему лабораторией для принятия мер по ремонту квалифицированными специалистами.

Повторное включение электрооборудования после его выключения должно производиться не ранее, чем через одну минуту.

Пользователь электрооборудования обязан немедленно отключить электропитание:

– во всех случаях обрыва кабелей питания, неисправности электрооборудования, заземления;

– при обнаружении человека, попавшего под напряжение;

– в случае внезапного прекращения подачи электроэнергии;

– при появлении нехарактерного для работы оборудования шума;

– при появлении дыма или запаха, характерного для горящей изоляции;

– при размещении ПЭВМ в тумбе (работа ПЭВМ во избежание перегрева разрешена только при открытой дверке тумбы).

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

1 Лабораторная работа № 1. Определение основных параметров бульдозера

Цель работы: приобрести навыки разработки электронных моделей расчета основных параметров строительных и дорожных машин.

Техническое обеспечение

Персональная ЭВМ типа IBM.

Программное обеспечение

Операционная оболочка Windows XP.

Программное приложение, позволяющее производить математические расчеты с элементами выбора.

Заполнить соответствующий раздел отчетной ведомости по комплексу лабораторных работ.

Постановка задачи

Изучить теоретические сведения по определению основных параметров бульдозера.

Разработать структуру электронного варианта математической модели.

Определить исходные данные и получить результаты расчетов.

Разработать электронную модель определения основных параметров бульдозера в соответствии с вариантом.

Содержание отчета

Электронная модель определения основных параметров бульдозера по вариантам (таблица А.1).

Результаты расчетов основных параметров бульдозера.

Поля разделов отчетной ведомости по комплексу лабораторных работ (таблицы Б.1–Б.6, рисунки Б.1–Б.5).

1.1 Теоретические сведения. Выбор и расчёт основных параметров бульдозера

Главный параметр гусеничного бульдозера – номинальное тяговое усилие, под которым понимают усилие, развиваемое базовым трактором на плотном грунте с учётом его догрузки от веса навесного оборудования при буксовании не выше 7 % и скорости 2,5…3 км/ч.

Номинальное тяговое усилие, эксплуатационный вес и основные рабочие скорости бульдозера.

Номинальное тяговое усилие бульдозера определяется по формуле

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

$$T_{нб} = G_{сц}\ \varphi_{сц},$$

где $G_{сц}$ – сцепной вес бульдозера в рабочем состоянии (по эксплуатационному весу бульдозера);

$\varphi_{сц}$ – коэффициент использования веса базовой машины с оборудованием по сцеплению, соответствующий допустимому буксованию движителей и определенному значению тягового КПД.

В зависимости от типа базовой машины $\varphi_{сц}$ имеет следующие значения:

– гусеничные сельскохозяйственные тракторы – 0,62;
– колёсные сельскохозяйственные тракторы – 0,50;
– гусеничные промышленные тракторы – 0,90;
– колёсные промышленные тракторы и тягачи – 0,60.

При проектировании новых бульдозеров $G_{сц}$ определяется из выражений:

– при навешивании на базовую машину только бульдозерного оборудования

$$G_{сц} = (1{,}17\ldots1{,}22)\ G_{бм};$$

– при навешивании на базовую машину спереди и сзади бульдозерного и другого оборудования (рыхлителя и др.)

$$G_{сц} = (1{,}35\ldots1{,}45)\ G_{бм},$$

где $G_{бм}$ – эксплуатационный вес базовой машины без навесного оборудования (со смазкой, водой, полной заправкой топлива, водителем, балластом и возимым инструментом и комплектом запасных частей).

Если мощность двигателя базовой машины не обеспечивает получение максимального тягового усилия по сцеплению с учётом догрузки от веса бульдозерного оборудования и работы со скоростью 2,5…3,0 км/ч, то за номинальное тяговое усилие принимается наибольшее возможное по двигателю тяговое усилие при скорости, близкой к указанным выше значениям.

При отсутствии у базовой машины передач со скоростью 2,5…3,0 км/ч или невозможности их использования на бульдозерных работах по условиям прочности номинальным считают наибольшее тяговое усилие на передаче, которая может применяться и обеспечивать скорость, близкую к указанным значениям.

Эксплуатационный вес бульдозера определяется как сумма эксплуатационных весов базовой машины и бульдозерного оборудования:

$$G_{б} = G_{бм} + G_{бо},$$

где $G_{бм}$ – вес базовой машины;

$G_{бо}$ – эксплуатационный вес бульдозерного оборудования (со смазкой, маслом в гидросистеме и возимым инструментом).

Скорость рабочего хода бульдозера при отсутствии автоматизированного управления бульдозерным оборудованием и трактором выбирают в пределах 2,5…3,0 км/ч.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Длина и высота отвала.

Длина отвала бульдозера выбирается минимально возможной из расчета перекрытия габарита базовой машины по ширине или наиболее выступающих в стороны элементов толкающей рамы при любом положении отвала. Отвал должен перекрывать наиболее выступающие части базовой машины или толкающей рамы не менее чем 100 мм с каждой стороны.

Длина отвала, предназначенного для работы в легких грунтовых условиях и, особенно, на сыпучих грунтах, может быть увеличена за счет применения съемных удлинителей или открылков, устанавливаемых под углом 15…30° к режущей кромке ножей.

Высота отвала определяется тяговым усилием бульдозера при скорости, требующейся для бульдозерных работ, параметрами профиля отвала и грунтовыми условиями, для которых в основном предназначается бульдозер.

Для бульдозеров общего назначения высоту отвала рекомендуется определять по следующим эмпирическим формулам:

– для неповоротных отвалов

$$H_н = 500\sqrt[3]{0{,}1 \cdot T_{н.б.}} - A \cdot T_{н.б.};$$

– для поворотных отвалов

$$H_п = 450\sqrt[3]{0{,}1 \cdot T_{н.б.}} - A \cdot T_{н.б.},$$

где $H_н$ и $H_п$ – высота неповоротного и поворотного отвалов, мм;

$T_{н.б.}$ – класс трактора;

A – корректирующий коэффициент.

В формулах A = 0,5 при номинальных тяговых усилиях базовых машин менее 400 кН. При номинальных тяговых усилиях выше 400 кН A = 1.

В таблице 1.1 приведены скорректированные значения высоты отвалов бульдозеров общего назначения при оптимальных параметрах отвальной поверхности для ряда номинальных тяговых усилий базовых машин и бульдозеров.

Таблица 1.1 – Рекомендуемое значение высоты отвала

Номинальное тяговое усилие базовой машины, кН	Номинальное тяговое усилие бульдозеров, кН	Неповоротный отвал		Поворотный отвал	
		Высота отвала, мм	Минимальная высота отвала с козырьком, мм	Высота отвала, мм	Минимальная высота отвала с козырьком, мм
1	2	3	4	5	6
2	2,5	400	–	300	400
6	7,5	400	500	–	–
9	11	–	–	–	–
14	18	600	700	500	600
30	36	800	900	700	800

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
50	60	900	1000	800	900
100	120	1100	1300	1000	1200
150	180	1200	1400	1100	1300
250	300	1400	1600	1200	1400
500	600	1800	1100	1600	1900

Высота козырька (по вертикали) должна составлять 0,1…0,25 высоты отвала. При определении высоты отвала с козырьком необходимо обеспечивать при транспортном положении отвала требуемый угол въезда и достаточно хорошую видимость пространства перед бульдозером.

Параметры профиля отвальной поверхности.

К основным параметрам профиля отвала относятся (рисунок 1.1):

– высота отвала без козырька (расстояние по вертикали между режущей кромкой среднего ножа и верхней кромкой отвала) H;

– угол резания при основной установке отвала (угол между горизонталью и передней плоскостью ножей) γ_0;

– угол опрокидывания при основной установке отвала (угол между горизонталью и касательной к верхней кромке отвала) β_0;

– угол наклона при основной установке отвала (угол между горизонталью и линией, соединяющей верхнюю кромку отвала с режущей кромкой среднего ножа отвала) ε_0.

К дополнительным параметрам профиля отвала относятся:

– высота отвала с козырьком (расстояние по вертикали между верхней кромкой козырька в середине и режущей кромкой среднего ножа) $H_к$;

– угол установки козырька при основном положении отвала (угол между горизонталью и плоскостью козырька) $\beta_к$;

– задний угол при основной установке отвала (угол между горизонталью и линией, соединяющей режущую кромку среднего ножа с наиболее выступающим элементом конструкции внизу на тыльной стороне отвала) θ_0.

Под основной установкой отвала понимают его положение, обеспечивающее наиболее эффективную работу в средних, часто встречающихся грунтовых условиях.

Вес бульдозерного оборудования ориентировочно принят равным 20 % веса базовой машины для бульдозеров обоих типов.

С учетом обстоятельств работы бульдозеров в таблице 1.2 приводятся основные параметры профиля отвала, рекомендуемые для бульдозеров общего назначения.

Угол резания значительно влияет на процесс копания грунта и его энергоемкость, определяя необходимое усилие для отделения грунта от массива, а также потребное для внедрения в грунт вертикальное давление на режущей кромке отвала.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

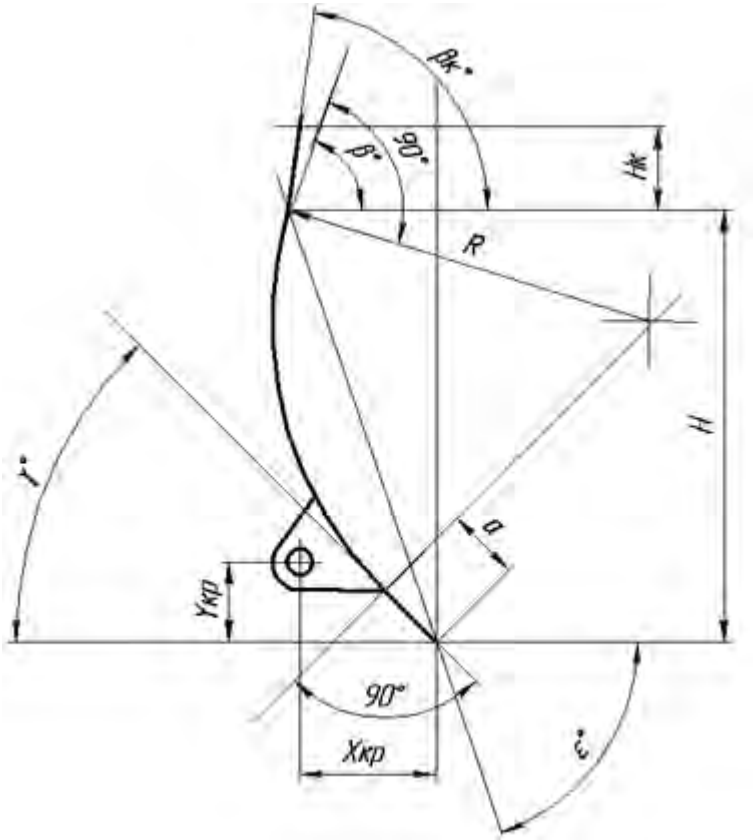

Рисунок 1.1 – Параметры профиля отвала

Таблица 1.2 – Рекомендуемые значения параметров отвала

Наименование параметра	Неповоротный отвал, град	Поворотный отвал, град
Угол резания γ_0	55	50…55
Угол наклона отвала ε_0	75	75
Угол опрокидывания β_0	70…75	65…75
Угол установки козырька $\beta_к$	90…100	90…100
Радиус линейной части отвальной поверхности R	$R \approx H$	$R = (0{,}8…0{,}9)H$
Длина прямой части внизу Q	По ширине ножей	По ширине ножей

Угол опрокидывания. При выборе угла опрокидывания следует учитывать, что с его уменьшением растет возможность залипания отвала и увеличивается энергоемкость процесса копания, но улучшается возможность работы с отвалом в плавающем положении. Необходимо также принимать во внимание то, что при работе на подъем этот угол увеличивается, а при работе под уклоном – уменьшается. Наиболее распространенные уклоны на бульдозерных работах составляют 15…20°, в отдельных случаях они достигают 25…30°.

Угол наклона. Чем меньше угол наклона отвала, тем меньше энергоемкость процесса копания и перемещения грунта, но и тем более вероятно пересыпание грунта через отвал в результате толчков и изменения уклона, по которому движется бульдозер.

Увеличение угла наклона отвала способствует его залипанию и росту

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

энергоемкости копания, но при этом улучшается работа при плавающем положении отвала. Результирующая сила сопротивления на отвале в таком случае может быть направлена под небольшим углом вверх.

Длина прямой части профиля отвала должна обеспечивать концентрацию сил сопротивления в его нижней части. В противном случае формирование и движение стружки по поверхности отвала проходят с нарушениями, а энергоемкость процесса копания возрастает. Поэтому рекомендуется выбирать длину прямой части только из расчета расположения прямых ножей.

Кривизна отвала. С точки зрения энергоемкости процесса копания и перемещения грунта наилучшие результаты обеспечивает профиль, выполненный по эвольвенте с уменьшением кривизны кверху или очерченный двумя-тремя радиусами, величины которых увеличиваются от его нижней к верхней части (внизу $R = 0{,}8H$, вверху $R = 1{,}1H$).

Угол установки козырька. При работе на плотных грунтах с ненарушенной структурой рекомендуемые параметры профиля обеспечивают эффективный набор и перемещение грунта без участия козырька. Однако при бульдозерных работах неизбежны случаи, когда вследствие чрезмерной, не соответствующей тяговому усилию глубины резания, свойств грунта или специфичности работ (перемещение несвязных, сыпучих грунтов от экскаватора) стружка не формируется и не движется по поверхности отвала, а масса грунта перед отвалом в значительной мере перемещается волоком.

В таблице 1.2 приведены значения параметров профиля отвалов общего назначения для ряда номинальных тяговых усилий (при принудительном заглублении отвала). На рисунке 1.1 показан профиль отвала.

Радиус криволинейной части профиля R, высота H и углы резания γ_0, опрокидывания β_0, наклона E_0 связаны между собой следующей зависимостью:

$$R = H\frac{\sin\left(E_0-\gamma_0\right)}{\sin E_0\left[1-\sin\left(\beta_0+\gamma_0-\pi/2\right)\right]}\ .$$

При рекомендуемых величинах углов профиля неповоротного отвала $\gamma_0 = 55°$, $\beta_0 = 65°$ и $E_0 = 5°$ формула для определения радиуса криволинейной части отвала может быть приведена к виду $R \approx 0{,}99H$, а для поворотного отвала при $\gamma_0 = 55°$, $\beta_0 = 70°$ и $E_0 = 75°$ $R = 0{,}81H$.

Задний угол отвала имеет большое значение для работ с резкими изменениями уклона поверхности, по которой происходит движение (рытье каналов, траншей, штабелирование и т. п.).

У некоторых современных бульдозеров задний угол отвала находится в пределах 8…20°. При малых значениях заднего угла отвал при изменениях уклона местности, по которой движется бульдозер, может опираться на тыльную часть коробки жесткости, а не на нож. Это приводит к некачественному выполнению работ и потерям части набранного грунта.

Сопротивление резанию определяется по формуле

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

$$W_1 = K \cdot B \cdot h\ ,$$

где B – ширина отвала бульдозера;

K – удельное сопротивление грунта лобовому резанию;

h – глубина резания в процессе перемещения призмы грунта.

Средние значения K при угле резания $\gamma = 45…60°$ составляют:

– для грунтов I категории $K = 7$ Н/см^2;

– для грунтов II категории $K = 11$ Н/см^2;

– для грунтов III категории $K = 17$ Н/см^2.

Сопротивление перемещению призмы волочения

$$W_2 = V_ф\, q\, f_{пр}\, g,$$

где $V_ф$ – фактический объём призмы волочения в плотном теле, м^3;

q – плотность грунта в плотном теле, т/м^3;

$f_{пр}$ – коэффициент сопротивления перемещению грунта, принимается равным коэффициенту трения грунта о грунт, для связных грунтов $f_{пр} = 0{,}5$; для несвязных $f_{пр} = 0{,}7$ (максимальное значение $f_{пр} = 1{,}0$);

g – ускорение свободного падения.

Сопротивление от перемещения грунта вверх по отвалу

$$W_3 = V_ф\, q\, f_{гм} \cos^2\gamma\ ,$$

где γ – угол резания;

$f_{гм}$ – коэффициент трения грунта по металлу, $f_{гм} = \mathrm{tg}\varphi$.

Угол трения $\varphi = 20…35°$.

Сопротивление перемещению бульдозера

$$W_4 = G_б\, f\ ,$$

где $G_б$ – суммарный вес трактора и бульдозера;

f – коэффициент сопротивления перемещению трактора с бульдозером, $f = 0{,}1…0{,}12$.

Суммарное сопротивление движению при данном объёме призмы и глубине резания имеет вид:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4\ .$$

Контрольные вопросы

1 Как определяется сила сопротивления перемещению бульдозера?

2 Как определяется сила сопротивления резанию?

3 Как определяется сила сопротивления перемещению призмы волочения?

4 Как определяется сила сопротивления подъему грунта вверх по отвалу?

5 Как определяется сила сопротивления копанию?

6 Как определяется рабочая скорость бульдозера?

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

7 Как определяется требуемая мощность двигателя бульдозера?
8 Как определяется требуемый вращающий момент на коленчатом валу ДВС?
9 Как определяется скорость вращения ведущего колеса бульдозера?
10 Как определяется передаточное число трансмиссии?

2 Лабораторная работа № 2. Моделирование ДВС

Цель работы: приобрести навыки разработки электронных моделей расчета основных показателей двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и его элементов.

Техническое обеспечение

Персональная ЭВМ типа IBM.

Программное обеспечение

Операционная оболочка Windows XP.

Приложение, позволяющее производить математические расчеты с элементами выбора.

Постановка задачи

Изучить теоретические сведения по определению основных показателей двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Разработать структуру электронного варианта математической модели топливного насоса высокого давления (ТНВД).

Разработать структуру электронного варианта математической модели впускного коллектора (турбокомпрессора (ТК)).

Определить исходные данные и получить результаты расчетов для модели ТНВД.

Определить исходные данные и получить результаты расчетов для модели ТК.

Определить исходные данные и получить результаты расчетов для модели ДВС в соответствии с результатами лабораторной работы № 1.

Разработать электронную модель определения основных показателей ДВС в соответствии с результатами лабораторной работы № 1.

Заполнить соответствующий раздел отчетной ведомости по комплексу лабораторных работ.

Содержание отчета

Электронная модель определения основных показателей ДВС.

Результаты расчетов основных показателей ДВС.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

2.1 Общие сведения

В настоящее время наиболее широко используют регрессионные модели для определения выходных характеристик двигателя, построенных с помощью экспериментальных данных. Характеристики двигателя определяются на тормозном стенде. Определяются зависимости крутящего момента на коленчатом валу $M_Д$, расхода топлива $G_т$ и давления наддува $p_к$ от угловой скорости коленчатого вала $\omega_д$ и положения рычага управления топливным насосом высокого давления (ТНВД) $\gamma_н$, т. е. внешние скоростные и предельные и частичные регуляторные характеристики двигателя.

Выходные характеристики дизельного двигателя в основном определяются подачей ТНВД ($q_н = 4 \cdot \pi \cdot G / \omega_д$), а также давлением наддува турбокомпрессора (ТК). Зависимость момента двигателя предлагается определять как функцию цикловой подачи топлива и давления наддува ТК: $M_Д = f(\rho_ж, q_н)$, что близко к физической сущности процессов, происходящих в ДВС. В этом случае момент двигателя представляет собой следующую линейную зависимость:

$$M_д = a_1 \cdot q_н + a_2 \cdot p_к,$$

где a_1, a_2 – коэффициенты регрессии.

Зависимость подачи топлива ТНВД двигателя представляет собой поле характеристик с ярко выраженными участками (рисунок 2.1).

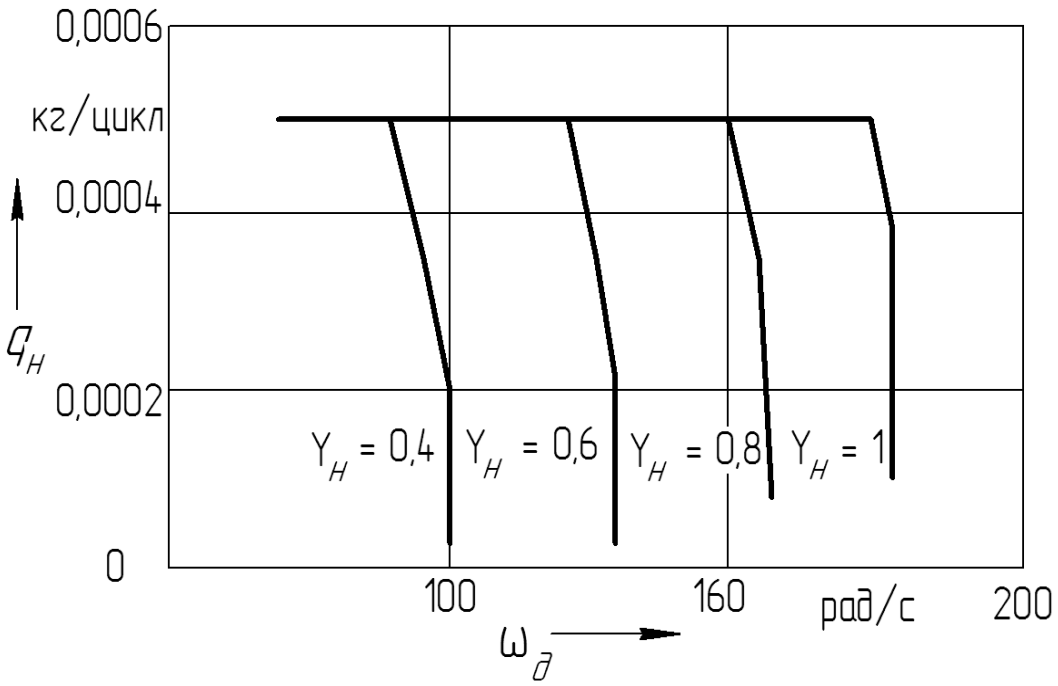

Рисунок 2.1 – Характеристики цикловой подачи топлива двигателя

Горизонтальный участок соответствует максимальной подаче топлива и определяет работу ДВС на внешней скоростной характеристике. В этом случае

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

рейка ТНВД упирается в ограничитель. Наклонные участки показывают работу двигателя на регуляторных характеристиках. Цикловая подача в этом случае описывается как $q_н = f(\omega_д, \gamma_н)$ и определяется по формуле

$$q_н = b_0 + b_1 \cdot \omega_д (b_2 + \gamma_н) + b_3 \cdot \gamma_н (b_4 + \gamma_н),$$

где b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты регрессии.

Расход топлива определяется следующим образом:

$$G_m = \frac{q_н \cdot \omega_д}{4\pi}.$$

Давление наддува ТК представляет собой функцию цикловой подачи и угловой скорости коленчатого вала $p_к = f(\omega_д, q_c)$ и описывается выражением

$$p_к = c_0 + c_1 \cdot \omega_д + c_2 \cdot q_н + c_3 \cdot \omega_д^2,$$

где c_0, c_1, c_2, c_3 – коэффициенты регрессии.

Характеристика давления наддува представлена на рисунке 2.2.

Характеристики вращающего момента двигателя представлены на рисунке 2.3, а секундного расхода топлива – на рисунке 2.4.

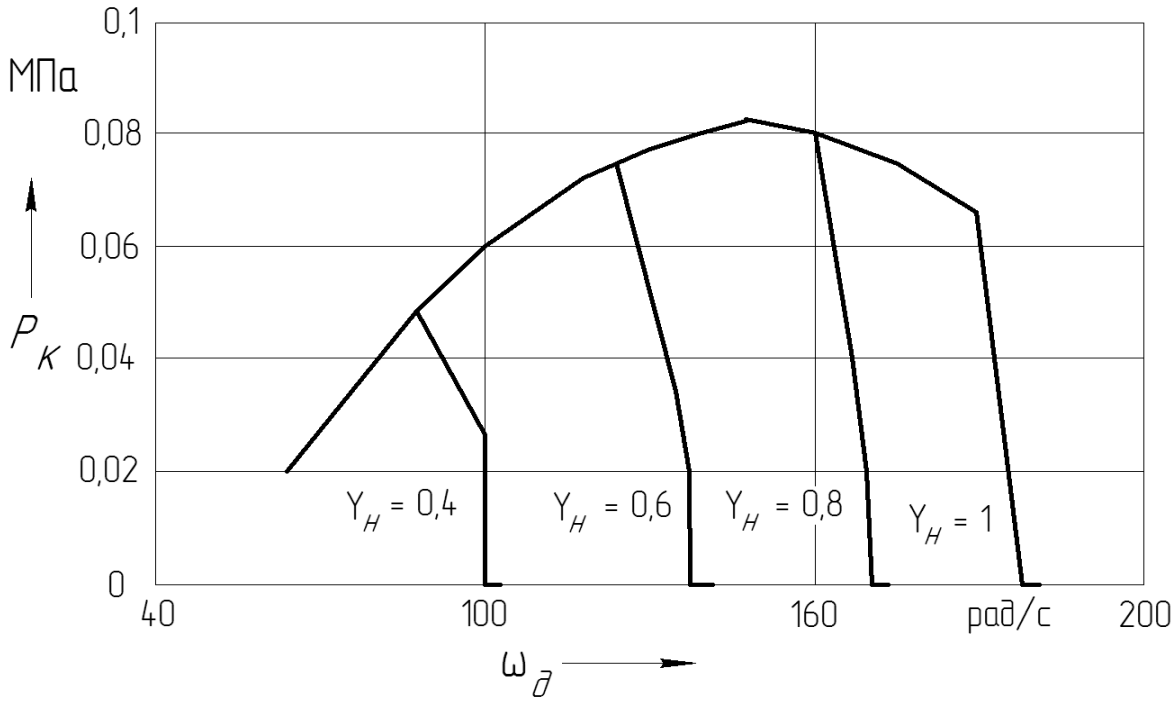

Рисунок 2.2 – Характеристики давления наддува двигателя

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

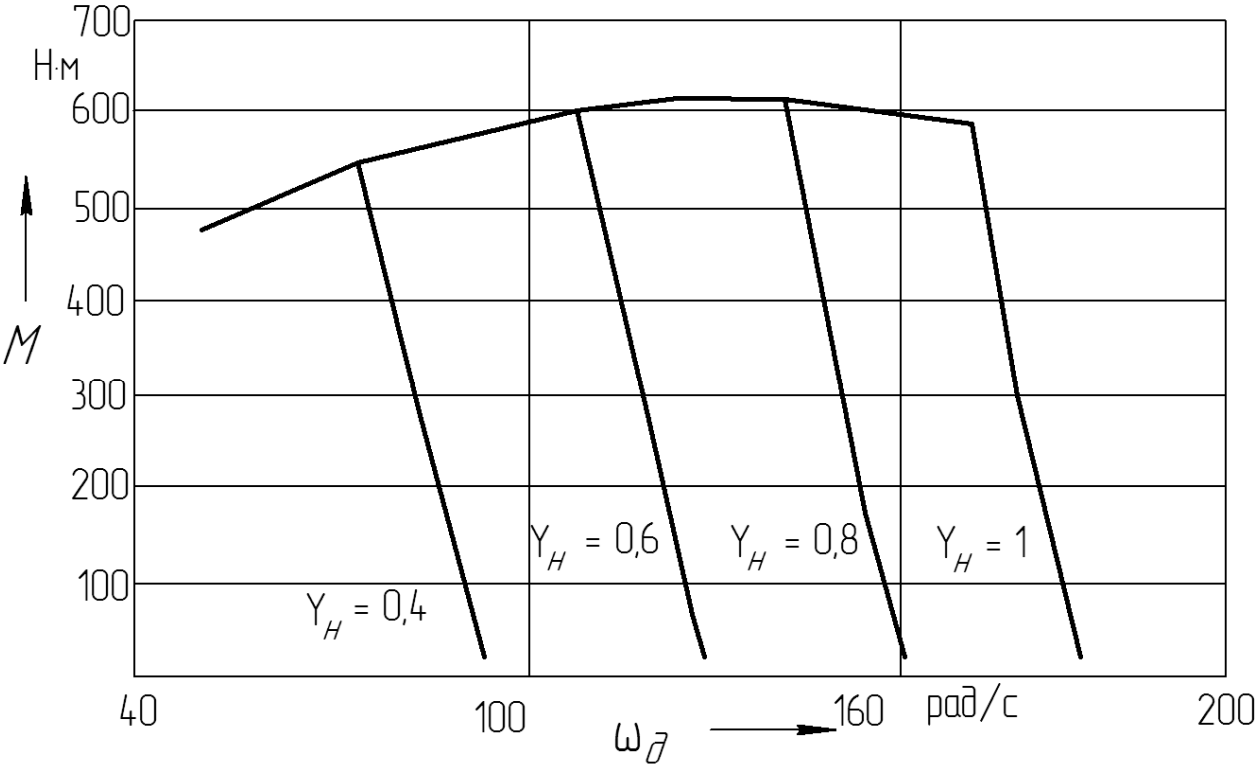

Рисунок 2.3 – Характеристики вращающего момента двигателя на тяговом режиме

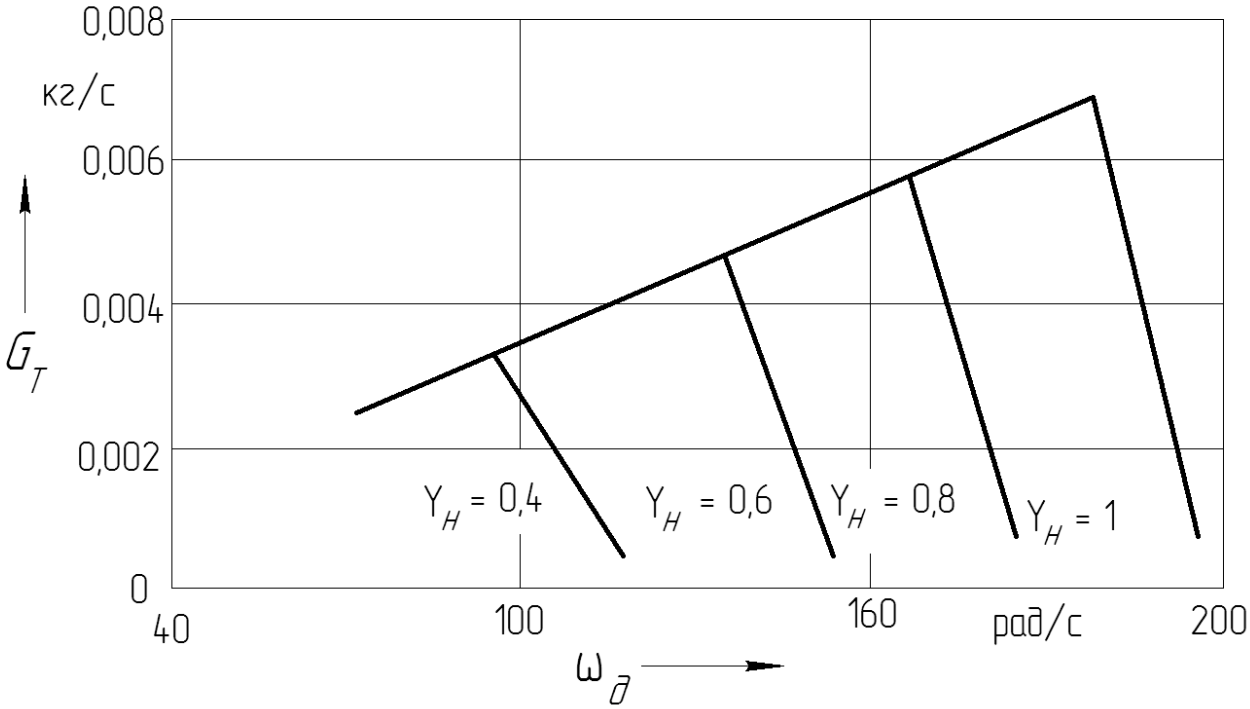

Рисунок 2.4 – Характеристики секундного расхода топлива двигателя

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Контрольные вопросы

1 Как определяется частота вращения коленчатого вала?
2 Как определяется вращающий момент на ведущем колесе?
3 Как определяется вращающий момент на коленчатом валу?
4 Как определяется требуемое передаточное число трансмиссии?
5 Как определяется требуемая мощность для передвижения машины?
6 Как определяется требуемая мощность на коленчатом валу?
7 Как определяется цикловая подача топлива?
8 Как определяется минутная подача топлива?
9 Как определяется удельный расход топлива?
10 Как определяется общее передаточное число механической передачи?

3 Лабораторная работа № 3. Моделирование сцепления и гидротрансформатора

Цель работы: приобрести навыки разработки электронных моделей расчета основных показателей гидротрансформаторов или сцепления.

Техническое обеспечение

Персональная ЭВМ типа IBM.
Программное обеспечение.
Операционная оболочка Windows XP.
Приложение, позволяющее производить математические расчеты с элементами выбора.

Постановка задачи

Изучить теоретические сведения по определению основных показателей гидротрансформатора или сцепления.

Разработать структуру электронного варианта математической модели гидротрансформатора или сцепления.

Определить исходные данные и получить результаты расчетов.

Разработать электронную модель определения основных показателей гидротрансформатора или сцепления, приняв за исходные данные результаты лабораторной работы № 2.

Заполнить соответствующий раздел отчетной ведомости по комплексу лабораторных работ.

Содержание отчета

Электронная модель определения основных показателей гидротрансформатора или сцепления.

Результаты расчетов основных показателей гидротрансформатора или сцепления.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

3.1 Общие сведения

Математическая модель гидротрансформатора представляется на основе регрессионных зависимостей.

При создании простых математических моделей гидротрансформаторов моменты на насосном и турбинном колесах гидротрансформатора (ГДТ) определяются по следующим зависимостям:

$$M_H = d_a^5 \cdot \rho \cdot \lambda_н \cdot \frac{d\varphi_H^2}{dt}; \qquad M_т = K \cdot M_н,$$

где d_a – активный диаметр гидротрансформатора;

ρ – плотность жидкости;

$\lambda_н$ – коэффициент момента насосного колеса ГДТ;

K – коэффициент трансформации.

Коэффициент момента насосного колеса и коэффициент трансформации определялись с помощью регрессионных зависимостей, полученных на основе опытных данных после испытаний ГДТ:

$$K = a_1 + a_2 \cdot i_{тн} + a_3 \cdot i_{тн}^2 + ... + a_6 \cdot i_{тн}^5,$$

где a_1, a_2, a_3, …, a_6 – коэффициенты регрессии;

$$\rho \cdot \lambda = b_1 + b_2 \cdot i_{тн} + ... + b_3 \cdot i_{тн}^2,$$

где b_1, b_2, b_3 – коэффициенты регрессии.

При описании работы гидротрансформатора на неустановившихся режимах его можно представить в виде апериодического звена с постоянной времени для этого ГДТ $T_т$ = 0,05 с. Тогда моменты на насосном и турбинном колесах ГДТ

$$\frac{dM_н}{dt} = (M_{н.ст} - M_н) / T_т;$$

$$\frac{dM_т}{dt} = (M_{т.ст} - M_т) / T_т,$$

где $M_{н.ст}$, $M_{т.ст}$ – статические моменты на насосном и турбинном колесах ГДТ.

На рисунках 3.1 и 3.2 представлены выходные статические характеристики ГДТ типа ЛГ-450, полученные с помощью модели.

3.1.1 Модель сцепления.

Имитационная модель сцепления должна позволять анализировать работу двигателя и трансмиссии в комплекте со сцеплением (рисунок 3.3). Представим на основе методики расчета фрикционной передачи метод определения основных

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

параметров сцепления для дальнейшего использования данной модели в общей модели машины.

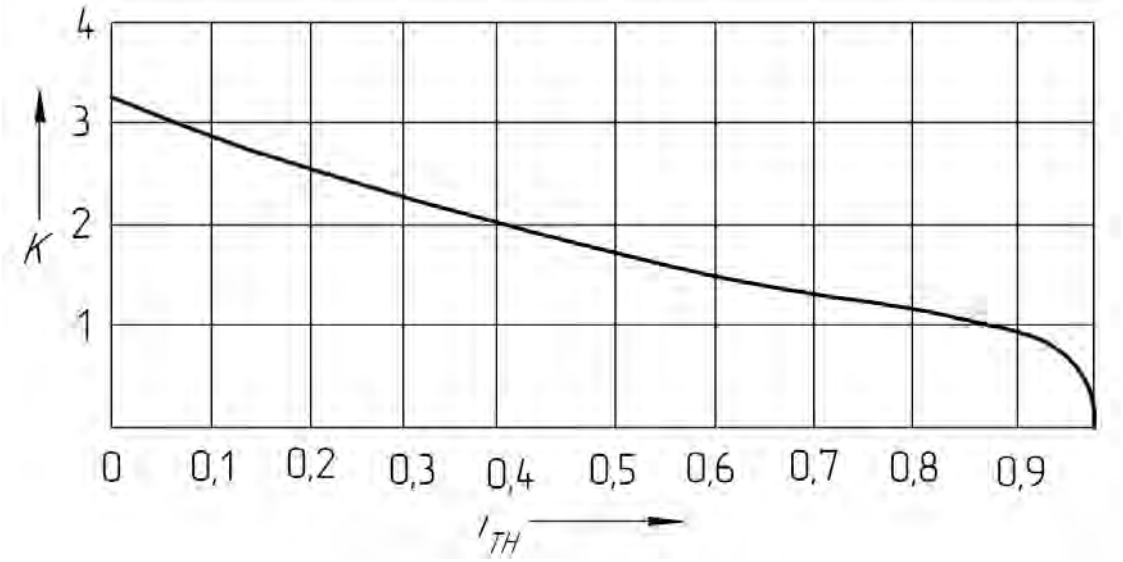

Рисунок 3.1 – Характеристика коэффициента трансформации ГДТ

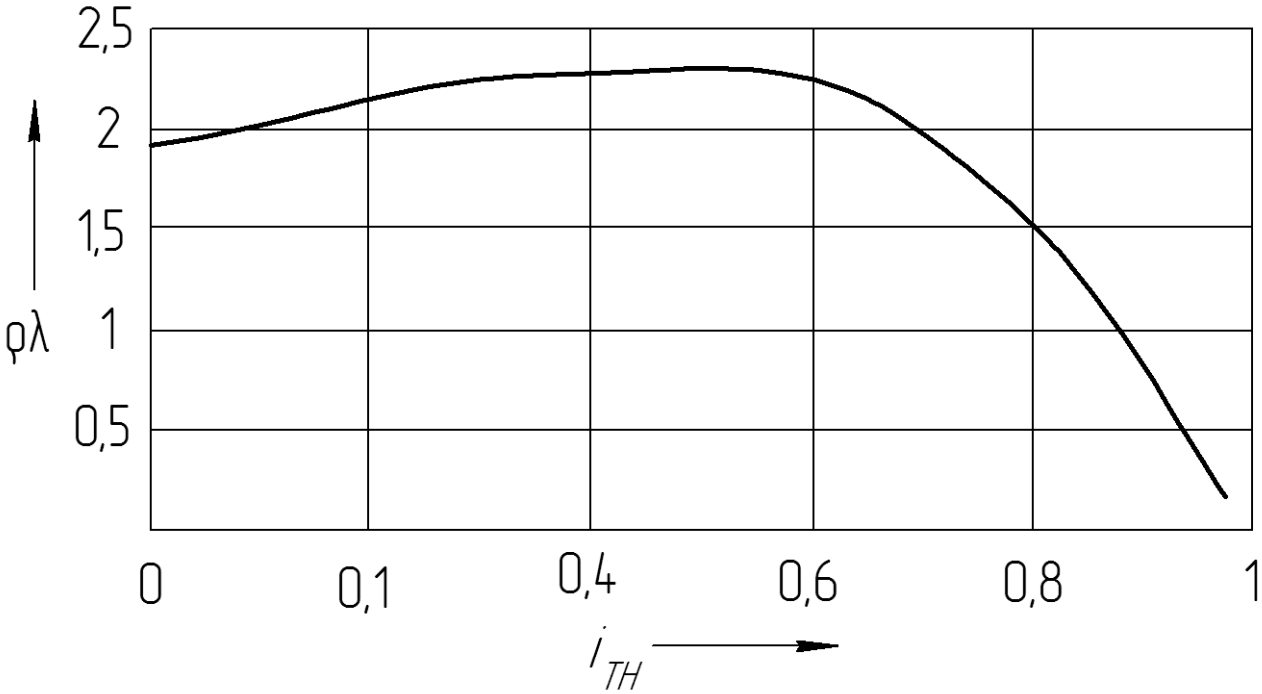

Рисунок 3.2 – Характеристика коэффициента момента насосного колеса ГДТ

Методика расчета фрикционной передачи заключается в следующем. Вращающий момент, передаваемый сцеплением, определяется по зависимости

$$M_K = S_{ПР} R_{СР} \varphi_{ТР} K_{ТР} / K_C ,$$

где $S_{ПР}$ – усилие прижатия дисков, Н;

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

R_{CP} – средний радиус дисков, м;

φ_{TP} – количество поверхностей трения, шт.;

K_{TP} – коэффициент трения;

K_C – коэффициент запаса сцепления.

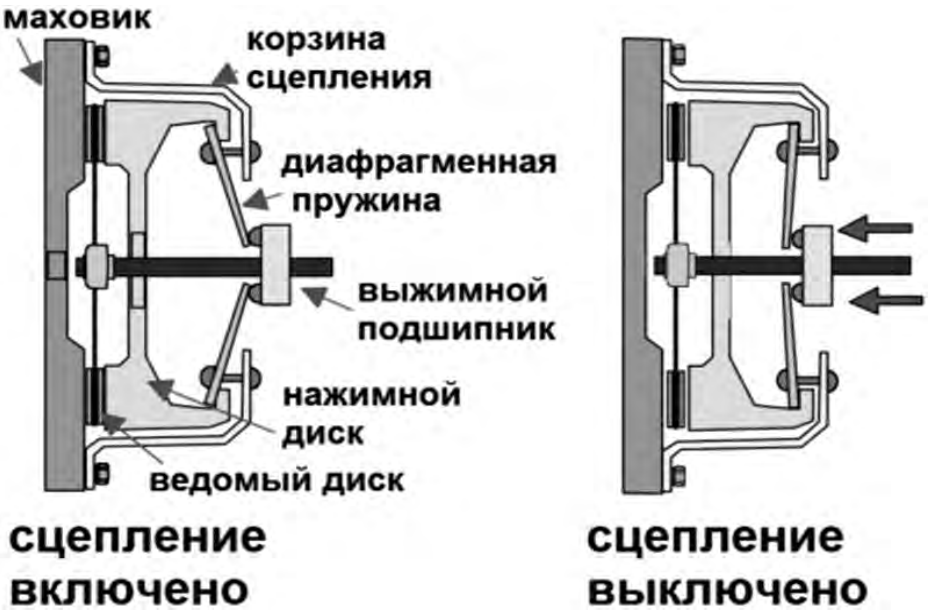

Рисунок 3.3 – Конструкция сцепления легкового автомобиля

Усилие прижатия дисков зависит от параметров конструкции механизма и не может превышать значений, при которых удельное давление превышает допускаемое, которое определяется с учетом применяемых материалов. Удельное давление прижатия дисков определяется по формуле

$$p_{СЦ} = \frac{M_K K_C}{\pi R_{CP} \varphi_{TP} K_{TP} (R_H^2 - R_{BH}^2)},$$

где R_H – наружный радиус дисков, м;

R_{BH} – внутренний радиус дисков, м.

В то же время удельное давление прижатия дисков является функцией усилия прижатия дисков при проведении расчетов в режиме реального времени, поэтому усилие прижатия дисков рассчитывается по формуле

$$F_C = \frac{M_K K_C}{R_{CP} \varphi_{TP} K_{TP}}.$$

Следующим этапом расчета является проверка конкретного варианта на допускаемое удельное давление. В случае, когда удельное давление превышает допускаемое, выдается рекомендация на возможную замену материала, увеличение поверхностей трения, изменение радиуса дисков. В случае, когда удельное давление превышает допускаемое, во время расчетов с использованием

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

данного варианта сцепления при определении параметров машины возможный передаваемый вращающий момент считается максимальным. Таким образом, максимальный вращающий момент является функцией усилия прижатия дисков. С другой стороны, механизм сцепления имеет свободный ход, при котором происходит разъединение поверхностей трения. В случае, когда подводимый вращающий момент превышает передаваемый, происходит буксование и нагрев дисков. Кроме того, такая ситуация вызывает появление колебаний в трансмиссии и может привести к существенному ухудшению качества выполняемых технологических операций, а также условий режима движения машины. Анализируя условия работы сцепления, можно сделать вывод, что в модели сцепления необходимо учитывать массу ведущего и ведомого дисков. Массы дисков следует учитывать в системе дифференциальных уравнений с целью обеспечения возможности установления влияния масс дисков сцепления на выходные характеристики машины.

Контрольные вопросы

1 Каков принцип работы гидротрансформатора?
2 Каков принцип работы сцепления?
3 Как определяется момент на насосном валу гидротрансформатора?
4 Как определяется момент на турбинном валу гидротрансформатора?
5 Как определяется динамический момент на насосном валу гидротрансформатора?
6 Как определяется динамический момент на турбинном валу гидротрансформатора?
7 Как определяется момент, передаваемый сцеплением?
8 Как определяется диаметр дисков сцепления?
9 Как определяется удельное давление прижатия дисков?
10 Как определяется динамический момент, передаваемый сцеплением?

4 Лабораторная работа № 4. Общая динамическая модель гусеничного движителя

Цель работы: приобрести навыки разработки электронных моделей расчета основных параметров гусеничного движителя.

Техническое обеспечение

Персональная ЭВМ типа IBM.

Программное обеспечение

Операционная оболочка Windows XP.

Специализированные программные приложения, позволяющие производить математические расчеты с элементами выбора.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Постановка задачи

Ознакомиться с приложениями по выбору основных параметров элементов гусеничного движителя.

Разработать структуру данных для электронных моделей элементов гусеничного движителя.

Определить численные значения исходных данных для электронных моделей элементов гусеничного движителя.

Разработать электронную модель определения основных параметров гусеничного движителя, приняв за исходные данные результаты лабораторной работы № 1.

Построить эпюры давления на грунт гусеничного движителя в зависимости от длины траков, проанализировав не менее шести вариантов.

Заполнить соответствующий раздел отчетной ведомости по комплексу лабораторных работ.

Содержание отчета

Электронная модель определения основных параметров гусеничного движителя.

Результаты расчетов основных параметров гусеничного движителя.

4.1 Общие сведения

Анализ структуры гусеничного движителя (рисунок 4.1) показывает, что каждый из его элементов является отдельным классом, который, в свою очередь, входит в другой элемент.

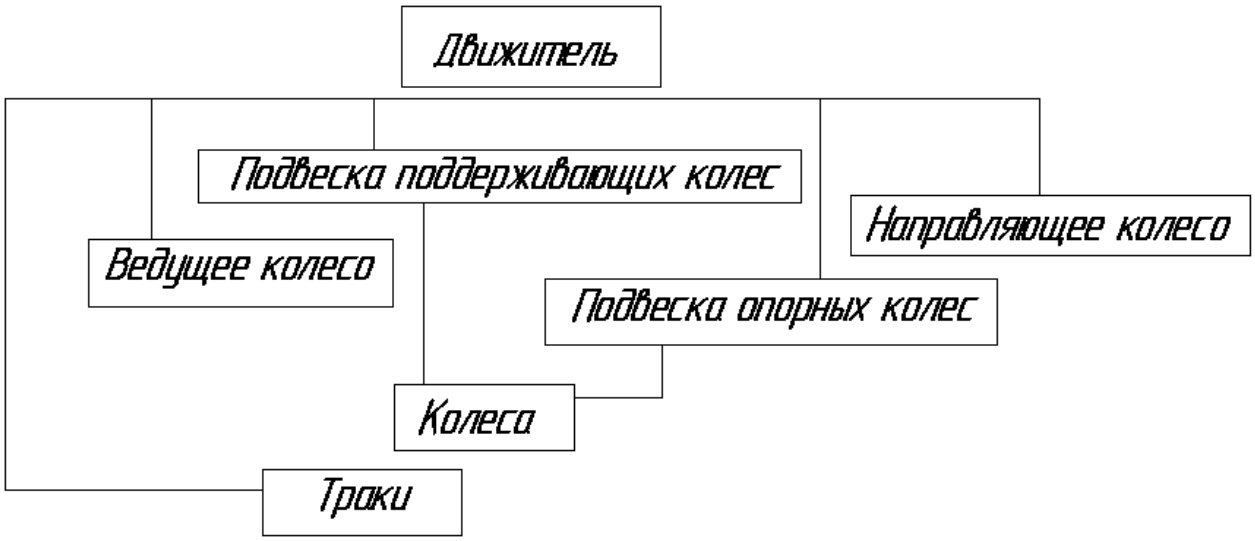

Рисунок 4.1 – Структурная схема гусеничного движителя

Основным элементом, взаимодействующим с опорной поверхностью, является трак. Для расчета его параметров используется соответствующий

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

пункт меню программного приложения для расчета характеристик гусеничного бульдозера (рисунок 4.2).

На первом этапе необходимо определить основные параметры трака в соответствии с исходными данными, полученными в лабораторной работе № 1.

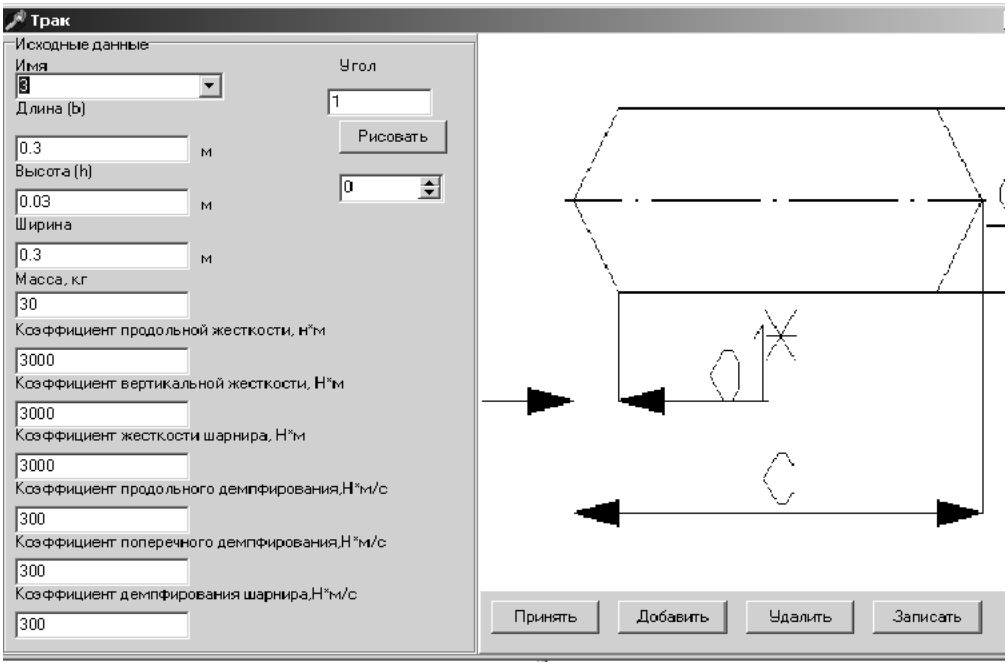

Рисунок 4.2 – Фрагмент программного приложения для расчета характеристик гусеничного бульдозера

Следующим структурным элементом является колесо. В соответствии с классификацией колесо может быть опорным, поддерживающим, ведущим и направляющим. Для определения параметров колес применяется соответствующий пункт меню программного приложения для расчета характеристик гусеничного бульдозера (рисунок 4.3).

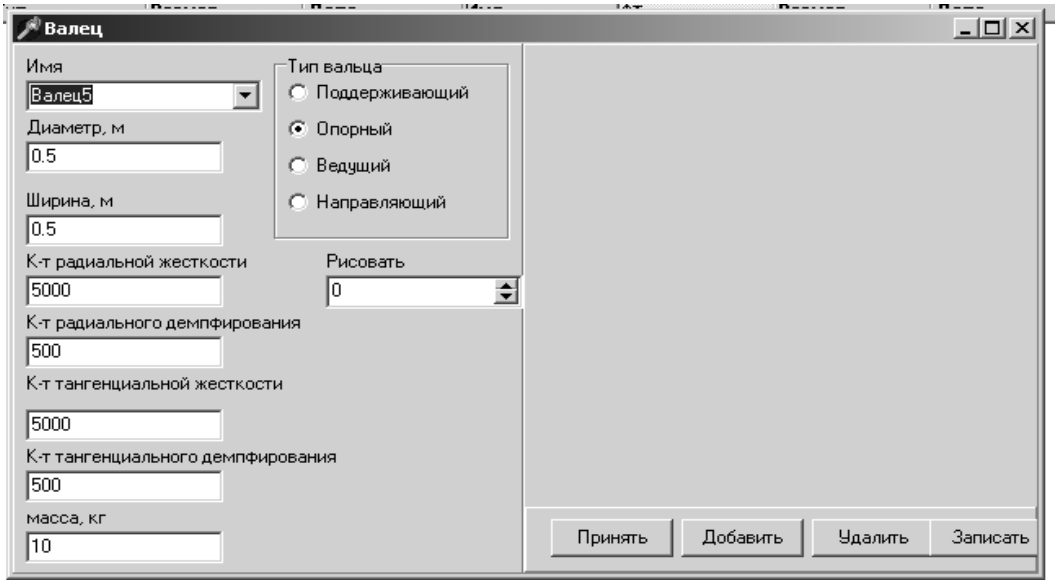

Рисунок 4.3 – Фрагмент программного приложения для расчета параметров колес гусеничного бульдозера

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

На следующем этапе необходимо определить исходные данные для колес всех типов гусеничного движителя.

Структурным элементом, включающим в себя некоторые типы колес, является подвеска. В данной модели используется свечная подвеска как наиболее перспективная, получившая широкое распространение на гусеничных машинах мировых производителей.

Для определения параметров подвески используется соответствующий пункт меню программного приложения для расчета характеристик гусеничного бульдозера (рисунок 4.4).

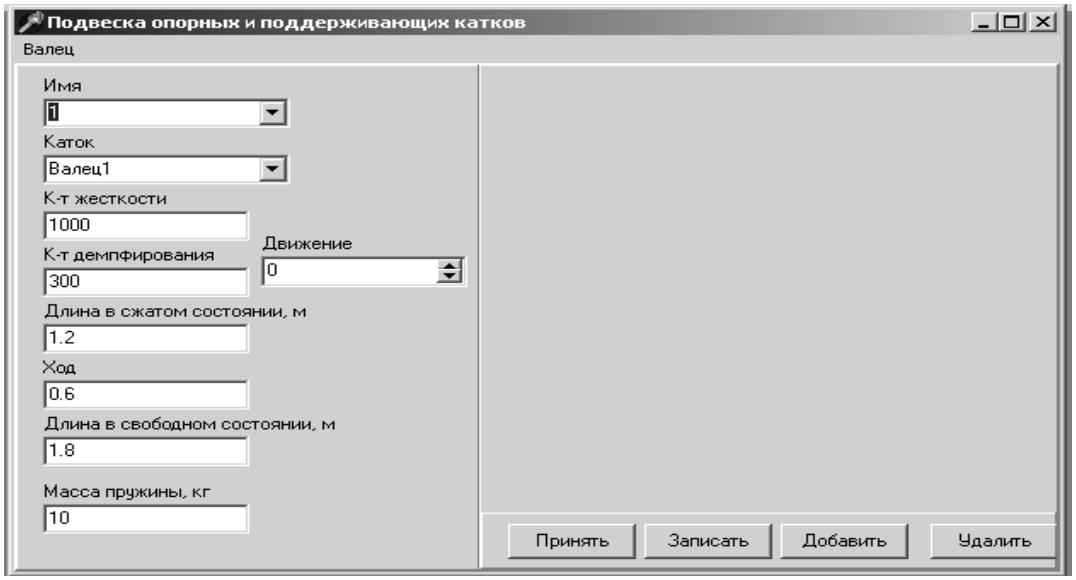

Рисунок 4.4 – Фрагмент программного приложения для расчета параметров подвесок колес гусеничного бульдозера

На следующем этапе необходимо определить параметры гусеничного движителя и исследовать его характеристики (рисунок 4.5).

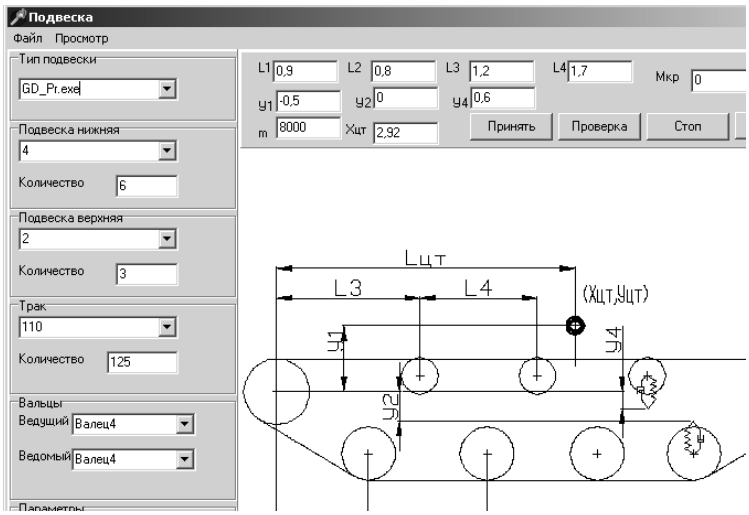

Рисунок 4.5 – Фрагмент программного приложения для расчета параметров подвесок колес гусеничного бульдозера

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

В качестве исходных данных необходимо принять результаты, полученные при выполнении лабораторной работы № 1.

Результатом определения параметров должна быть электронная модель гусеничного движителя, которая в процессе расчета способна поддерживать стабильность характеристик перемещения в вертикальной плоскости и угловых перемещений.

Контрольные вопросы

1 Как определить параметры трака?
2 Как определить параметры колес?
3 Как определить параметры подвесок?
4 Как влияет коэффициент жесткости на частоту и амплитуду колебаний?
5 Как влияет масса на частоту и амплитуду колебаний?
6 Как влияет длина гусеничного движителя на величину давления на грунт?
7 Как влияет размещение центра тяжести на величину давления на грунт?
8 Как влияет расстояние между колесами на величину давления на грунт?
9 Как влияет длина траков на величину давления на грунт?
10 Какие условия необходимо учитывать при выборе длины траков?

5 Лабораторная работа № 5. Моделирование рабочего оборудования бульдозера

Цель работы: приобрести навыки разработки электронных моделей расчета основных параметров рабочего оборудования с отвальным рабочим органом.

Техническое обеспечение

Персональная ЭВМ типа IBM.

Программное обеспечение

Операционная оболочка Windows XP.

Специализированные программные приложения, позволяющие производить математические расчеты с элементами выбора.

Постановка задачи

Сформировать электронную модель рабочего оборудования.

Сформировать электронную модель грунта.

Провести ряд вычислительных экспериментов и установить такие значения параметров грунта, при которых силы сопротивления копанию, рассчитанные по двум методам, будут отличаться не более чем на 10 %.

Установить оптимальное сочетание параметров рабочего оборудования.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Заполнить соответствующий раздел отчетной ведомости по комплексу лабораторных работ.

Содержание отчета

Электронная модель определения характеристик рабочего оборудования бульдозера.

Заполнить содержание полей таблиц Б.4 и Б.5.

На первом этапе необходимо определить основные параметры гидроцилиндра в соответствии с исходными данными, полученными в лабораторной работе № 1.

Используя параметры формы (рисунок 5.1) приложения для определения параметров рабочего оборудования, задавая значения исходных данных, необходимо сформировать имитационную модель гидроцилиндра на основании предварительных расчетов, проведенных в лабораторной работе № 1. Модель гидроцилиндра впоследствии будет использоваться в модели рабочего оборудования.

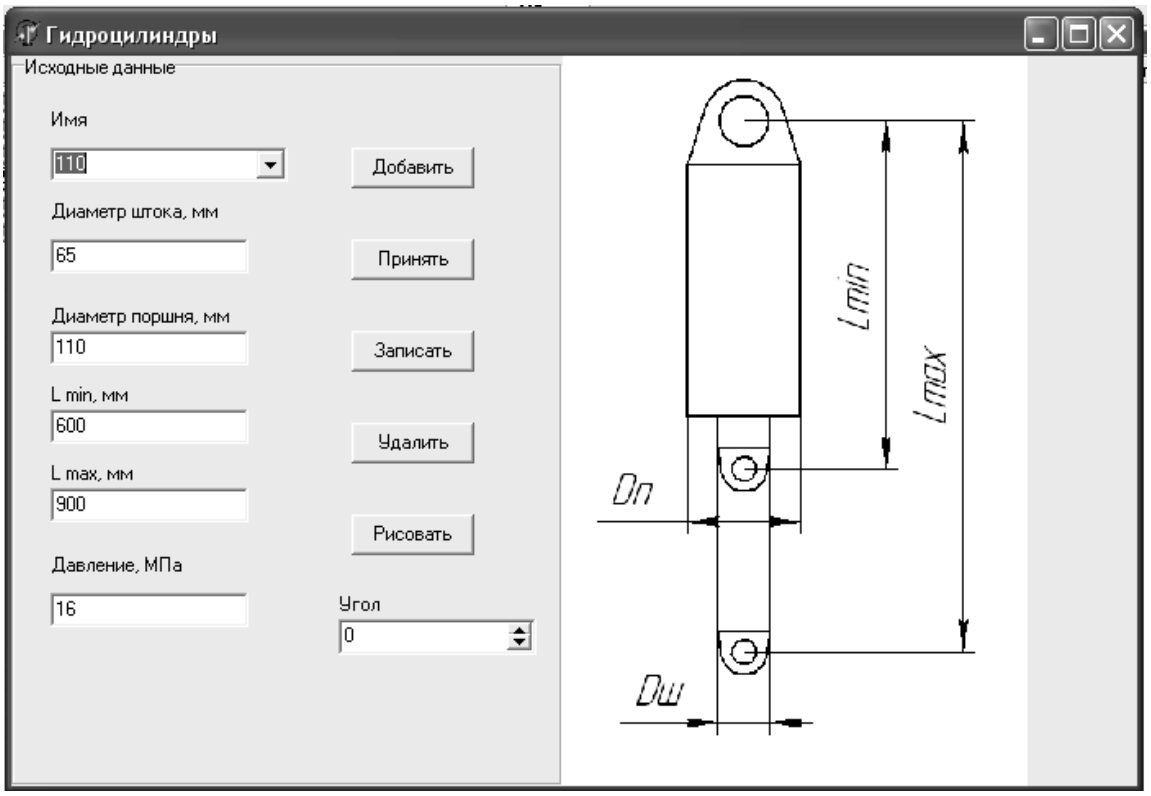

Рисунок 5.1 – Форма для задания исходных данных гидроцилиндра

Следующим структурным элементом являются толкающие брусья.

Используя параметры формы (рисунок 5.2) приложения для определения параметров толкающих брусьев, задавая значения исходных данных, необходимо сформировать имитационную модель рамы рабочего оборудования на основании предварительных расчетов, проведенных в лабораторной работе № 1. Модель рамы впоследствии будет использоваться в модели рабочего оборудования.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

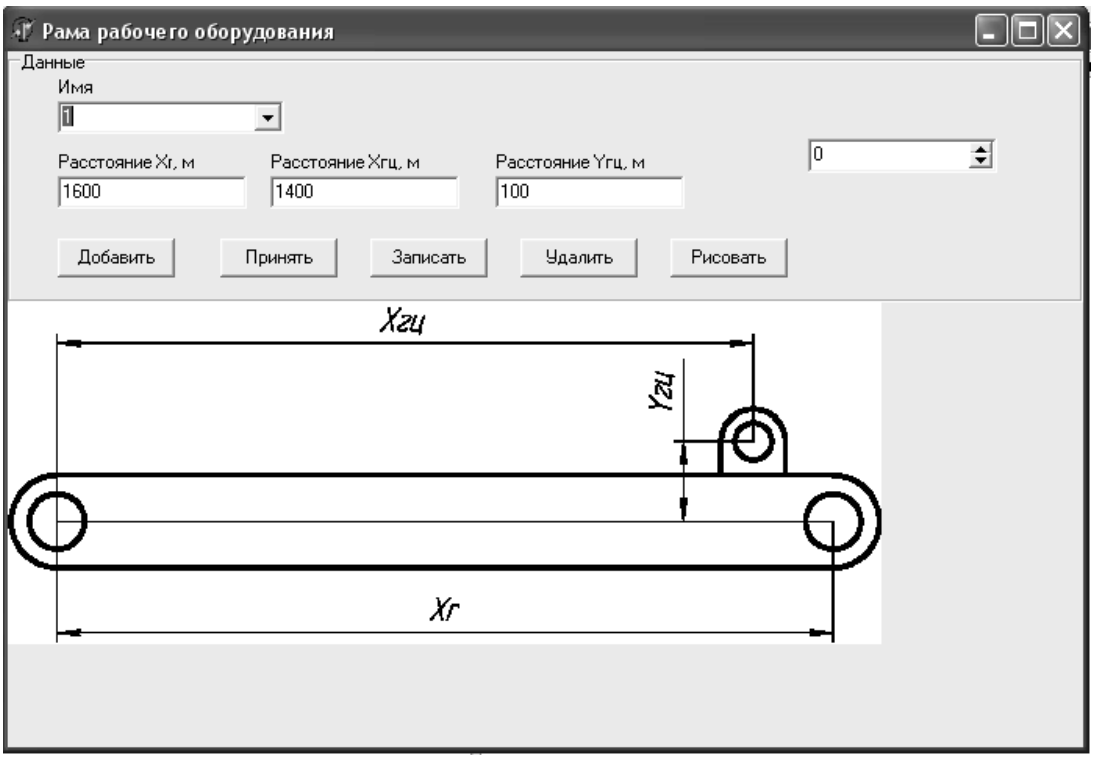

Рисунок 5.2 – Форма для задания исходных данных толкающих брусьев

Используя параметры формы (рисунок 5.3) приложения для задания параметров отвала, задавая значения исходных данных, необходимо сформировать имитационную модель отвала на основании предварительных расчетов, проведенных в лабораторной работе № 1.

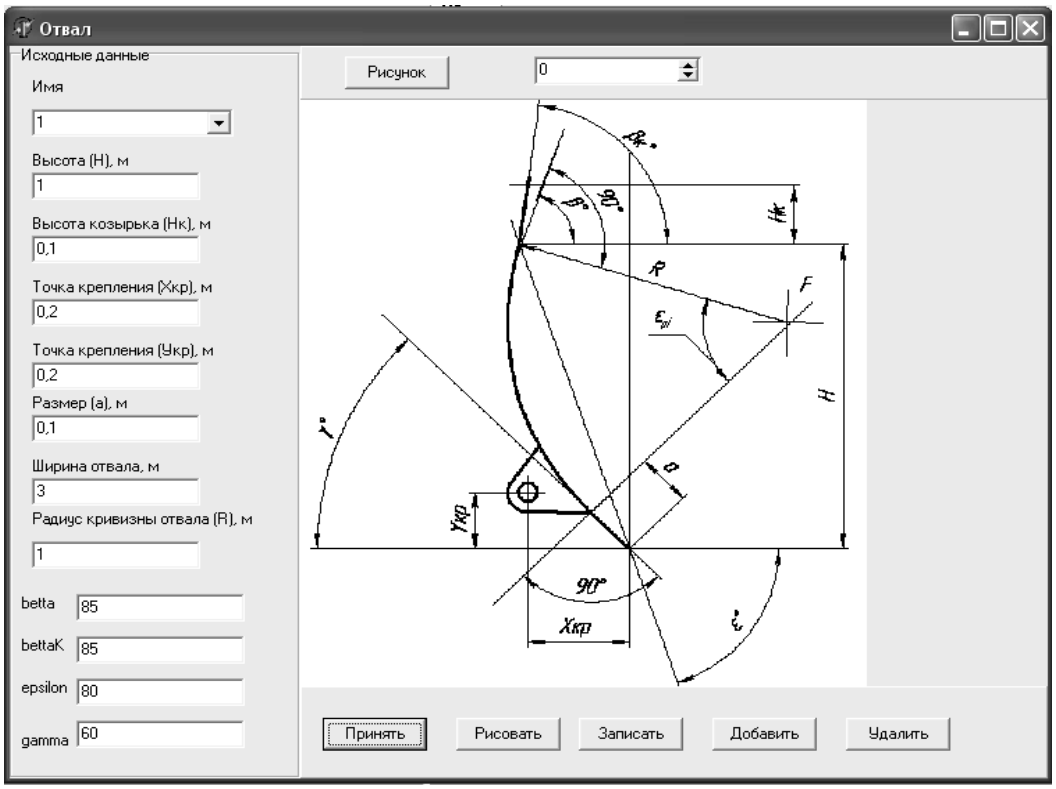

Рисунок 5.3 – Форма для задания исходных данных отвала

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Используя параметры формы приложения «Ro_Pr», задавая значения исходных данных, необходимо сформировать имитационную модель рабочего оборудования на основании предварительных расчетов, проведенных в лабораторной работе № 1. Модель рабочего оборудования впоследствии будет использоваться при расчете параметров копания грунта (рисунок 5.4).

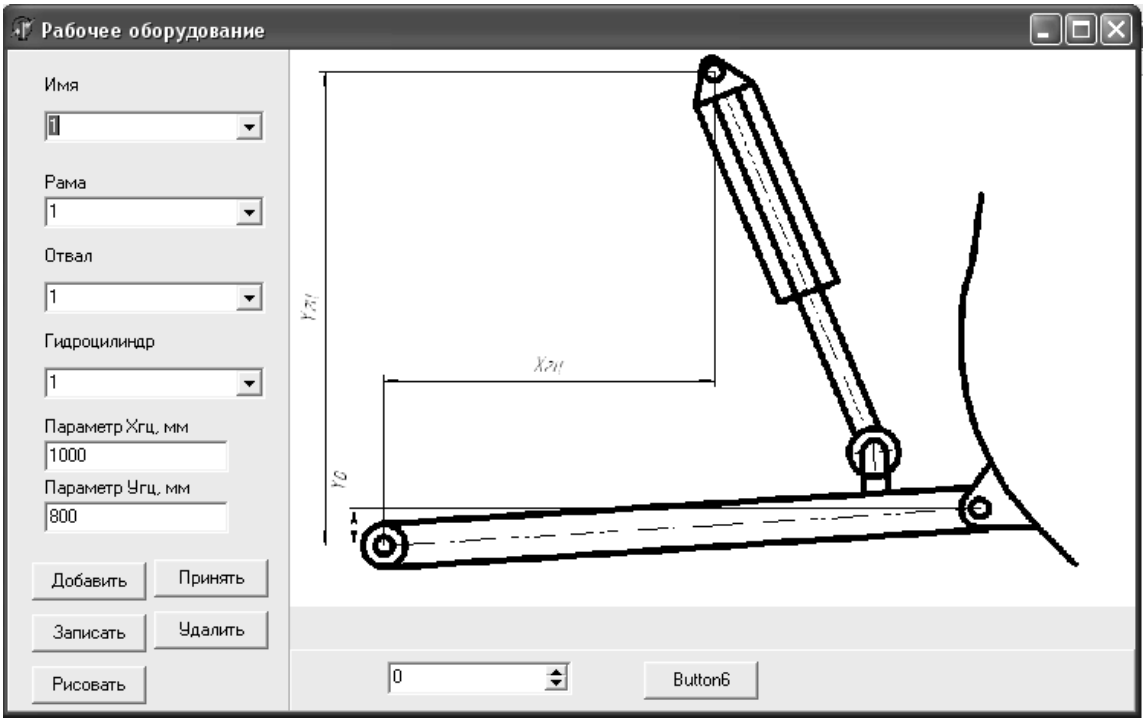

Рисунок 5.4 – Форма для формирования исходных данных рабочего оборудования

Используя параметры формы приложения работы с рабочим оборудованием и грунтом, задавая значения исходных данных, необходимо сформировать имитационную модель рабочего оборудования в комплекте с моделью грунта на основании предварительных расчетов.

Для принятых средних параметров отвала нужно провести серию экспериментов. Изменяя параметры грунта, необходимо добиться совпадения сил сопротивления копанию, полученных с помощью динамического метода и с помощью стандартной методики определения сил сопротивления копанию (рисунок 5.5).

На основании результатов лабораторной работы № 1 необходимо сформировать план проведения вычислительного эксперимента, используя в качестве факторов варьирования угол установки отвала, длину прямолинейной части, радиус кривизны отвала.

С помощью программного приложения провести серию экспериментов, сформировать матрицу полученных результатов для всех вариантов экспериментов, на основании анализа результатов матрицы необходимо определить наилучшие параметры рабочего оборудования.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

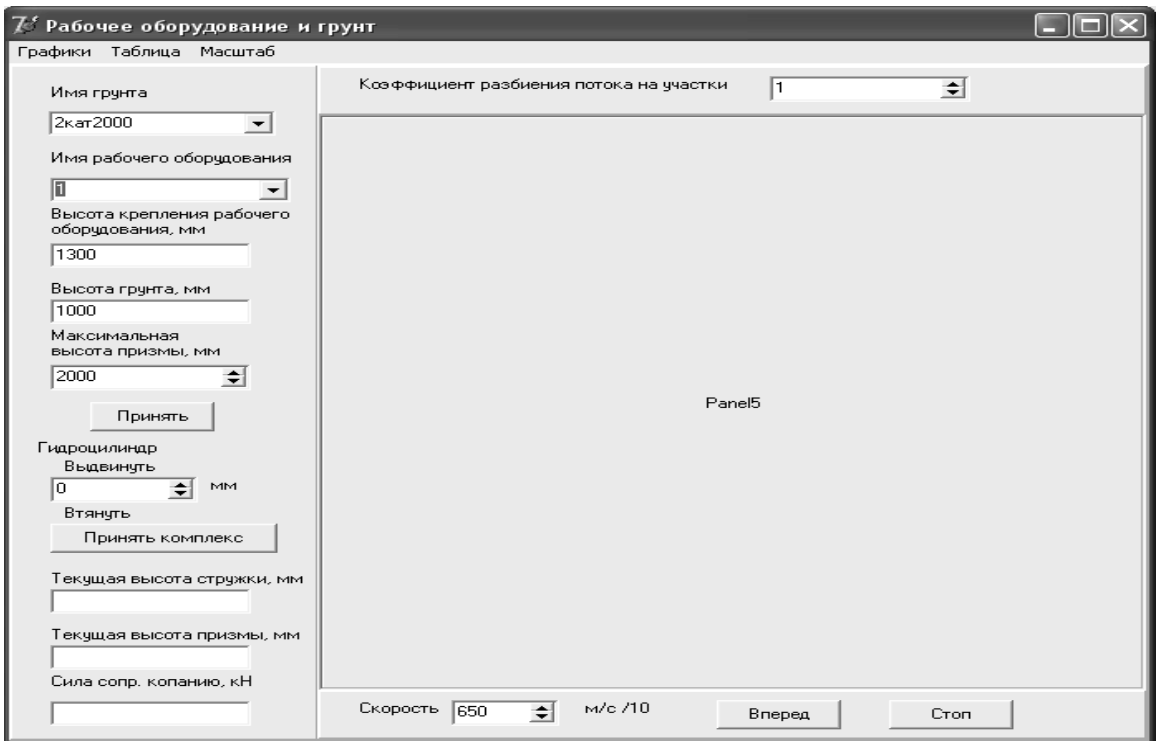

Рисунок 5.5 – Форма для расчета сил сопротивления копанию

Модель рабочего оборудования необходимо использовать для определения сил сопротивления копанию отвальным рабочим органом. Форма приложения представлена на рисунке 5.6. Определить усилия сопротивления копанию в зависимости от толщины стружки. Сравнить полученные результаты с результатами лабораторной работы № 1.

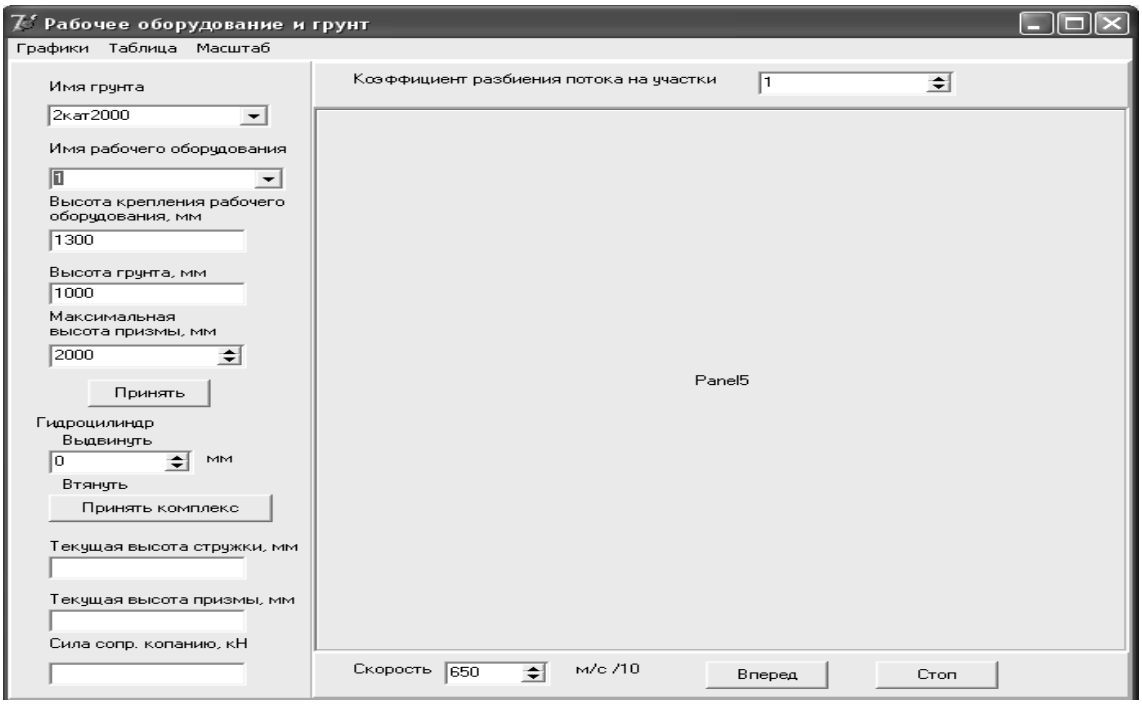

Рисунок 5.6 – Форма для расчета сил сопротивления копанию отвальным рабочим органом

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Контрольные вопросы

1 Как определить суммарные силы сопротивления копанию?
2 Как определить силу сопротивления резанию?
3 Какие параметры влияют на величину силы сопротивления резанию?
4 Как изменяется сила сопротивления копанию с ростом призмы волочения?
5 Как влияет толщина стружки на величину сил сопротивления копанию?
6 Как влияет скорость движения рабочего оборудования на величину сил сопротивления копанию?
7 Как влияет радиус кривизны отвала на величину сил сопротивления копанию?
8 Как влияет длина прямолинейной части отвала на величину сил сопротивления копанию?
9 Как влияет интенсивность заглубления отвала на величину и направление сил сопротивления копанию?
10 Какие условия необходимо учитывать при выборе параметров отвала?

6 Лабораторная работа № 6. Моделирование гусеничного бульдозера

Цель работы: приобрести навыки разработки электронных моделей расчета основных параметров рабочего оборудования с отвальным рабочим органом.

Техническое обеспечение

Персональная ЭВМ типа IBM.

Программное обеспечение

Операционная оболочка Windows XP.
Специализированные программные приложения, позволяющие производить математические расчеты с элементами выбора.

Постановка задачи

Ознакомиться с приложениями по выбору основных параметров бульдозера.
Разработать структуру данных для электронной модели бульдозера.
Определить численные значения исходных данных для электронной модели бульдозера.
Разработать электронную модель бульдозера, приняв за исходные данные результаты лабораторной работы № 1.
Определить перспективы модернизации гусеничного бульдозера на основании выбранных показателей качества.
Определить, каким образом выбранные параметры влияют на принятые показатели качества.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Заполнить соответствующий раздел отчетной ведомости по комплексу лабораторных работ.

Содержание отчета

Электронная модель определения основных параметров рабочего оборудования бульдозера.

Результаты расчетов основных параметров рабочего оборудования бульдозера.

6.1 Общие сведения

Для разработки электронной модели гусеничного бульдозера необходимо использовать электронные модели двигателя, трансмиссии, рабочего оборудования и гусеничного движителя, полученные при выполнении лабораторных работ № 1–5.

Электронная модель бульдозера собирается из электронных моделей в программном приложении «KOMASER.exe».

Первым этапом проверки работоспособности полученной электронной модели является возможность «сборки» модели бульдозера с помощью готовых моделей механизмов и систем. Для сборки итоговой электронной модели используется форма гусеничного бульдозера (рисунок 6.1).

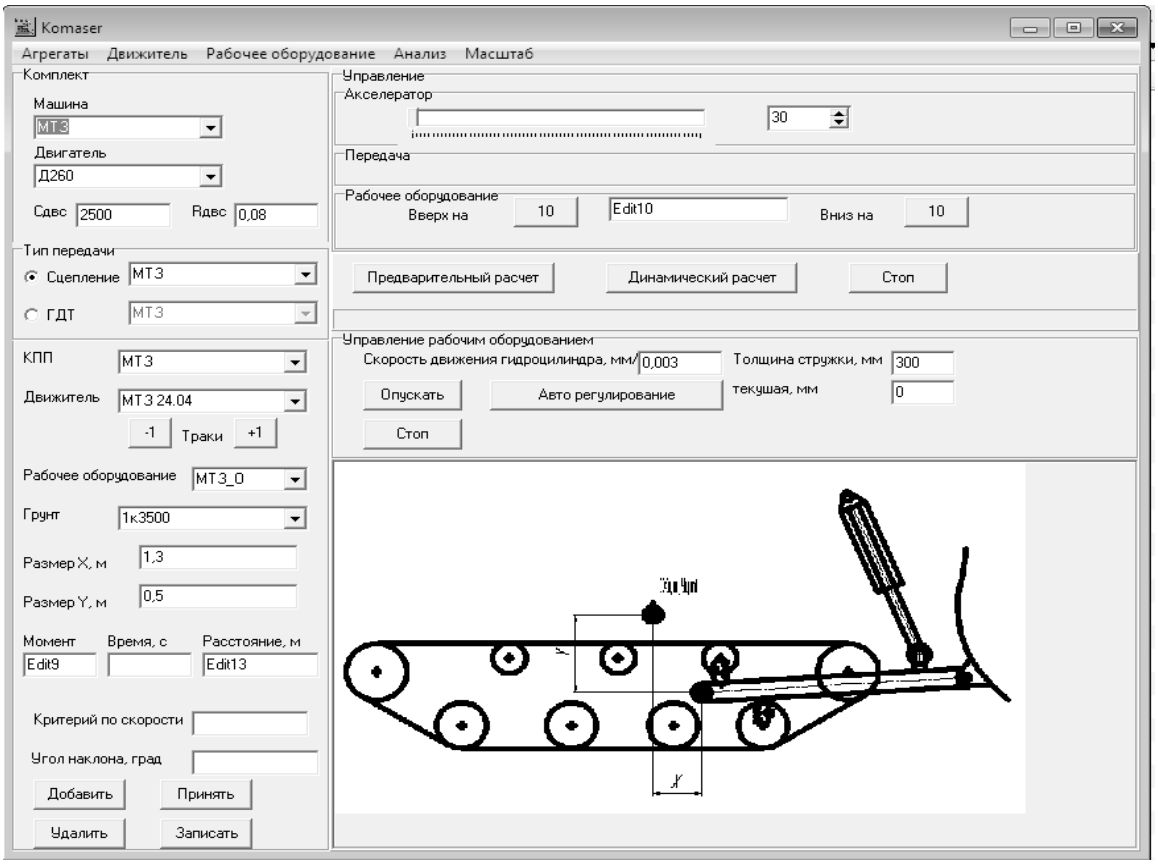

Рисунок 6.1 – Форма для сборки гусеничного бульдозера

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Для добавления в базу данных новой машины нужно использовать кнопку «Добавить», после её нажатия в поле ввода с меткой «Машина» появится надпись «Без имени», в это поле необходимо ввести имя новой машины.

В полях «Двигатель», «Сцепление», «ГДТ», «КПП», «Движитель», «Рабочее оборудование», «Грунт» необходимо выбрать из выпадающих списков имена элементов, электронные модели которых созданы на предыдущих лабораторных работах.

В поля «Сдвс», «Rдвс», «Размер X», «Размер Y» необходимо ввести значения коэффициентов жесткости и диссипативных сил, входного вала коробки передач, а также размеры, определяющие координаты крепления рабочего оборудования на раме бульдозера.

Проверка работоспособности электронной модели бульдозера определяется с помощью нажатия кнопки «Предварительный расчет».

Контрольные вопросы

1 Какие показатели качества установлены?

2 Какие факторы варьирования выбраны?

3 Как влияют выбранные факторы варьирования на выбранные показатели качества?

4 Каким образом установлено влияние выбранных факторов варьирования на определенные показатели качества?

Список литературы

1 **Довгяло, В. А.** Дорожно-строительные машины. Ч. 1 : Машины для земляных работ / В. А. Довгяло, Д. И. Бочкарев. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 250 с.

2 **Домбровский, Н. Г.** Строительные машины / Н. Г. Домбровский, М. И. Гальперин. – Москва : Высшая школа, 1985. – Ч. 2. – 312 с.

3 **Алексеева, Т. В.** Дорожные машины : учебник. Ч. 1 : Машины для земляных работ / Т. В. Алексеева, К. А. Артемьев, А. А. Бромберг. – Москва : Машиностроение, 1972. – 504 с.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Приложение А
(обязательное)

Таблица А.1 – Исходные данные по вариантам

Вариант	Тяговый класс гусеничной машины (номинальное тяговое усилие), кН	Вариант	Тяговый класс гусеничной машины (номинальное тяговое усилие), кН
1	60	11	160
2	70	12	170
3	80	13	180
4	90	14	190
5	100	15	200
6	110	16	210
7	120	17	220
8	130	18	230
9	140	19	250
10	150	20	260

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Приложение Б
(обязательное)

Отчетная ведомость по комплексу лабораторных работ

Таблица Б.1 – Параметры подвесок гусеничного движителя

Наименование	Единица измерения	Значение
Трак		
Имя	строка	
Длина	м	
Ширина	м	
Высота	м	
Масса	кг	
Коэффициент продольной жесткости	Н/м	
Коэффициент вертикальной жесткости	Н/м	
Коэффициент жесткости шарнира	Н/м	
Коэффициент продольного демпфирования	Н·м/с	
Коэффициент поперечного демпфирования	Н·м/с	
Коэффициент демпфирования шарнира	Н·м/с	
Колесо		
Имя	строка	
Диаметр	м	
Ширина	м	
Коэффициент радиальной жесткости	Н/м	
Коэффициент тангенциальной жесткости	Н·м/рад	
Коэффициент радиального демпфирования	Н·м/с	
Коэффициент тангенциального демпфирования	Н·м/(рад·с)	
Масса	кг	
Подвеска		
Имя	строка	
Имя колеса	строка	
Коэффициент жесткости пружины	Н/м	
Коэффициент демпфирования	Н·м/с	
Длина в сжатом состоянии	м	
Ход	м	
Длина в свободном состоянии	м	
Масса пружины	кг	

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

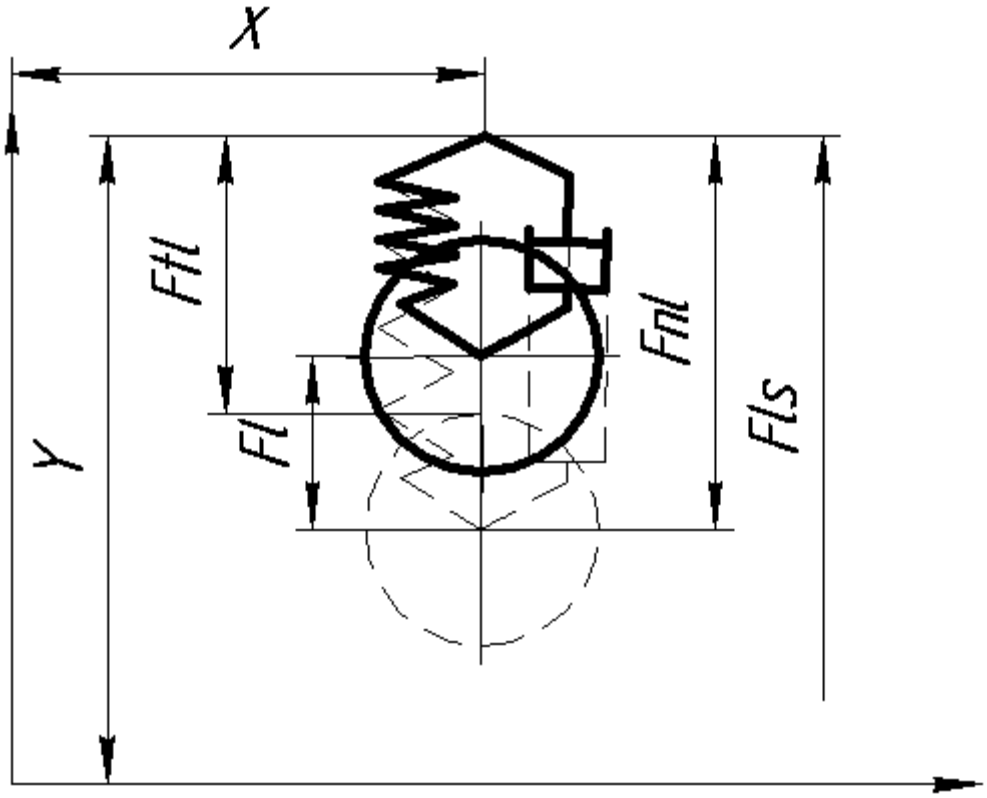

Рисунок Б.1 – Схема для определения параметров подвески

Таблица Б.2 – Параметры гусеничного движителя

Наименование	Единица измерения	Значение
$L1$	м	
$L2$	м	
$L3$	м	
L4	м	
$L_{цт}$	м	
$У1$	м	
$У2$	м	
$У4$	м	

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

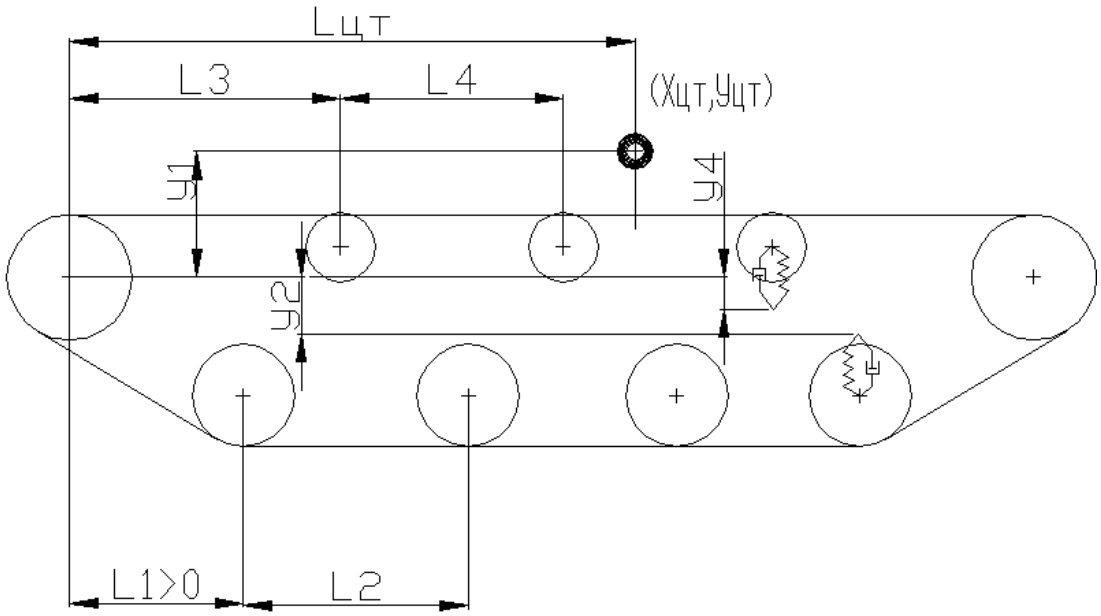

Рисунок Б.2 – Геометрические параметры гусеничного движителя

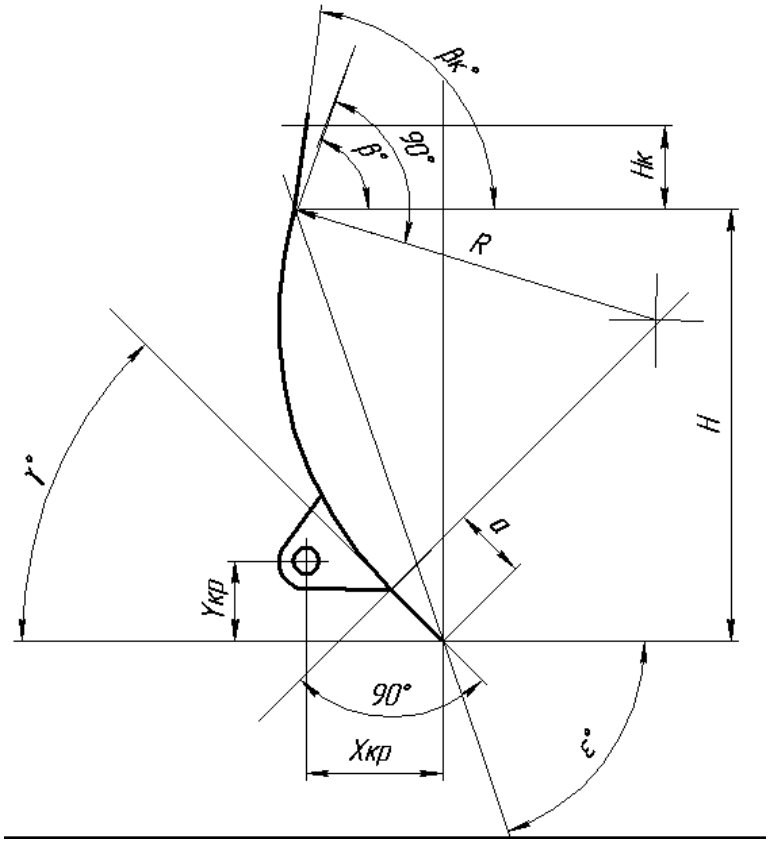

Рисунок Б.3 – Параметры отвала

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Таблица Б.3 – Параметры рабочего оборудования

Наименование	Единица измерения	Значение
Имя	строка	
Высота отвала *H*	м	
Высота козырька $H_к$	м	
Точка крепления $X_{кр}$	м	
Точка крепления $У_{кр}$	м	
Длина прямолинейной части отвала *a*	м	
Ширина отвала *B*	м	
Радиус кривизны отвала	м	
β	град	
$β_К$	град	
ε	град	
γ	град	
Гидроцилиндр		
Имя	строка	
Диаметр штока	мм	
Диаметр поршня	мм	
Минимальная длина	мм	
Максимальная длина	мм	
Давление	МПа	

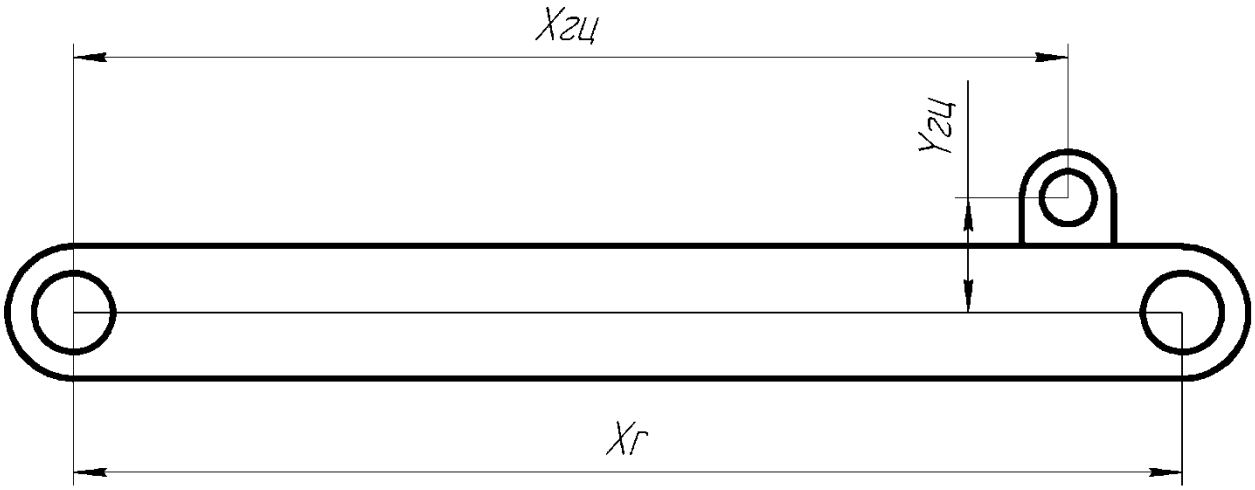

Рисунок Б.4 – Параметры толкающих брусьев

Таблица Б.4 – Параметры толкающих брусьев

Наименование	Единица измерения	Значение
$X_г$	мм	
$X_{гц}$	мм	
$У_{гц}$	мм	

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

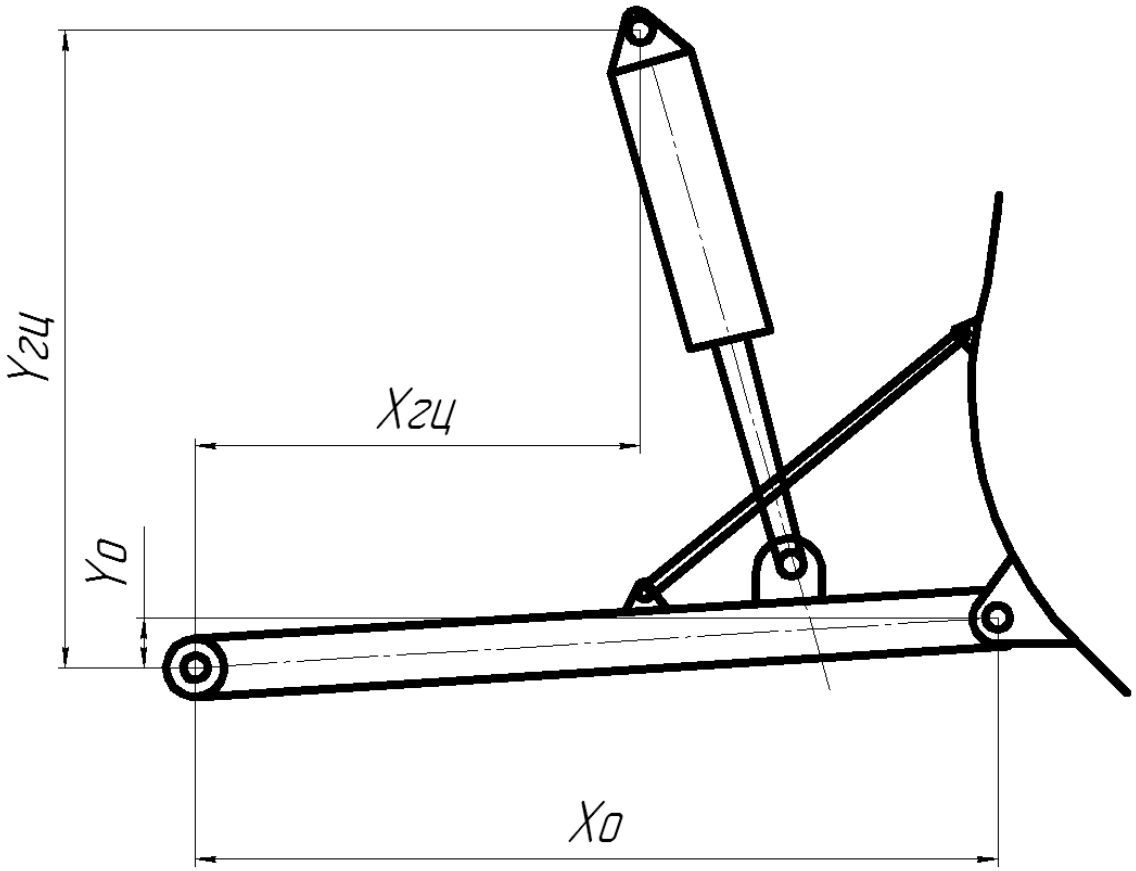

Рисунок Б.5 – Параметры рабочего оборудования

Таблица Б.5 – Параметры рабочего оборудования

Наименование	Единица измерения	Значение
$X_{гц}$	мм	
$Y_{гц}$	мм	

Таблица Б.6 – Параметры грунта

Наименование	Единица измерения	Значение
Имя	строка	
Угол внутреннего трения	град	
Угол трения грунта по металлу	град	
Угол наклона призмы волочения к горизонту	град	
Удельное сцепление грунта ненарушенной структуры	кПа	
Удельное сцепление грунта в призме волочения	кПа	
Плотность грунта на рабочем органе и в призме волочения	т/м^3	
Начальное значение угла сдвига	град	
Первоначальный шаг изменений угла сдвига	град	
Точность определения угла сдвига	град	
Коэффициент жесткости	кПа/м	

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/