

УДК 629.36

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_97

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОГО ПОЕЗДА. ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

К.Б. Евсеев

ORCID: 0000-0001-7193-487X e-mail: kb_evseev@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Верифицирована математическая модель двухзвенного гусеничного поезда с пассивным прицепом. Описаны основные технические характеристики и особенности конструктивно-компоновочных решений, состав используемого контрольно-измерительного оборудования и программно-аппаратного комплекса, предназначенных для записи и обработки данных. Программа экспериментальных исследований включает два этапа. Первый этап экспериментальных исследований представляет собой комплекс испытаний, направленных на определение параметров взаимодействия объектов исследования с опорным основанием. Рассматриваются два объекта испытаний: макетный образец гусеничной машины и трелевочный трактор ТБ-1. Второй этап представляет собой проведение испытаний гусеничного поезда при движении по траектории типа «змейка». При проведении экспериментальных исследований были получены осциллограммы записи данных с используемого контрольно-измерительного оборудования, которые сравнивались с зависимостями изменения параметров, полученными по результатам математического моделирования.

Ключевые слова: гусеничный поезд, экспериментальные исследования, математическая модель, испытания, имитационное математическое моделирование, взаимодействие с опорным основанием.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Евсеев, К.Б. Экспериментальное исследование движения гусеничного поезда. Верификация математической модели // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №1. 97-113.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_97

EXPERIMENTAL STUDY OF A TRACKED TRAIN MOTION. MATHEMATICAL MODEL VERIFICATION

K.B. Evseev

ORCID: 0000-0001-7193-487X e-mail: kb_evseev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. Mathematical model of a two-link tracked train with a passive trailer, is verified. Main technical characteristics and features of design-layout solutions, composition of the control and measuring equipment used, and the hardware-software complex designed for data recording and processing, are described. Experimental research program includes two stages. The first stage of experimental research is a set of tests aimed at determining of parameters of interaction of research objects with the support base. Two test objects are considered: a breadboard model of a tracked vehicle and a TB-1 skidding tractor. The second stage is the testing of a tracked train when moving along a trajectory of the «snake» type. During the experimental studies, oscillograms of data recordings from the used control and measuring equipment were obtained, which were compared with the dependences of parameter changes obtained as per mathematical modeling results.

Key words: tracked train, experimental studies, mathematical model, test operations, simulation mathematical modeling, interaction with a support base.

FOR CITATION: K.B. Evseev. Experimental study of a tracked train motion. mathematical model verification. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. C. 97-113. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_97

Введение

При проведении имитационного математического моделирования движения гусеничных машин необходимо в качестве исходных данных задавать параметры дорожно-грунтовых условий. Доступные исходные данные, приведенные в различных специализированных источниках, подходят для проведения теоретических исследований на этапах выполнения научно-исследовательских работ, когда используется верифицированная математическая модель транспортного средства. Когда разрабатывается новая математическая модель движения транспортного средства, новые законы управления движением или уточняются существующие подходы к математическому моделированию рабочих процессов, требуется верификация математической модели по результатам натурного эксперимента. В этом случае целесообразно перед проведением испытаний по верификации математической модели движения транспортного средства уточнить условия движения, а именно – определить параметры взаимодействия с опорным основанием, уточнив тем самым исходные данные. Распространенным подходом к учету взаимодействия движителя с опорным основанием является использование модели, основанной на понятии об «эллипсе трения», согласно которому сила взаимодействия с опорной поверхностью направлена противоположно скорости скольжения в плоскости опорного основания в точках контакта [1-3] (рис. 1).

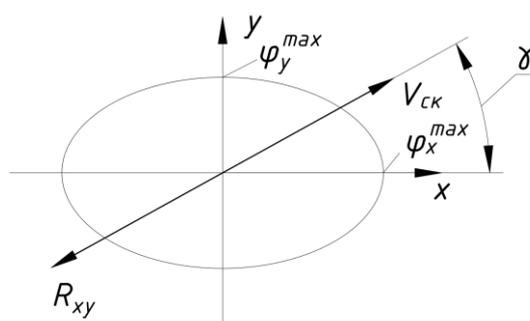


Рис. 1. «Эллипс трения»

Fig. 1. «Friction ellipse»

В таком случае коэффициент взаимодействия будет определяться по следующей зависимости (1):

$$\varphi^{max}(\gamma) = \frac{\varphi_x^{max} \varphi_y^{max}}{\sqrt{\varphi_x^{max^2} \sin^2(\gamma) + \varphi_y^{max^2} \cos^2(\gamma)}}, \quad (1)$$

где φ_x^{max} – коэффициент сцепления в продольном направлении;

φ_y^{max} – коэффициент сцепления в поперечном направлении;

γ – угол между вектором скорости скольжения $V_{СК}$ и осью x .

Будем считать, что для опорного основания типа «дернистый грунт» применима зависимость коэффициента взаимодействия от коэффициента скольжения, которая представлена на рис. 2 и описывается выражением [1, 4] (2):

$$\varphi(S) = \varphi^{max}(\gamma) \left(1 - e^{-\frac{S}{S_0}}\right), \quad (2)$$

где S – коэффициент скольжения активного участка гусеницы;

S_0 – константа, определяющая форму кривой $\varphi(S)$ (рис. 2).

Подобная модель взаимодействия движителя с опорным основанием широко используется и при моделировании движения гусеничных машин на плотном грунте [5-7]. Таким образом, для использования такого подхода необходимо в качестве исходных данных задавать коэффициенты сцепления в продольном φ_x^{max} и поперечном направлениях φ_y^{max} . Кроме того, в дифференциальные уравнения движения гусеничной машины входит коэффициент

сопротивления прямолинейному движению по горизонтальному основанию f , который тоже необходимо задавать в качестве исходных данных при проведении имитационного математического моделирования. Для «дернистого грунта» $S_0 = 0,1$ [5, 8].

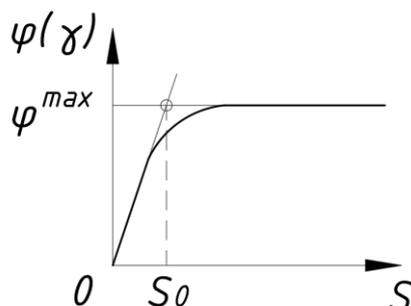


Рис. 2. Зависимость коэффициента взаимодействия от коэффициента скольжения

Fig. 2. Dependence of the interaction coefficient on the slip coefficient

В данной работе представлены результаты экспериментального определения коэффициента сопротивления движению гусеничной машины, коэффициента сцепления в продольном и поперечном направлениях. С учетом полученных коэффициентов, определенных в результате ряда экспериментов, были проведены экспериментальные исследования движения объекта испытаний для верификации разработанной математической модели движения гусеничного поезда [9]. Целью испытаний является верификация разработанной математической модели движения гусеничного поезда с учетом предварительного экспериментального определения параметров взаимодействия с опорным основанием (коэффициентов сопротивления движению, коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлениях).

Объекты испытаний

В качестве одного из объектов испытаний использовался макетный образец гусеничной машины (ГМ), разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана и ООО «ЗВМ» (г. Заволжье, Нижегородская обл.), внешний вид которой представлен на рис. 3.



Рис. 3. Макетный образец гусеничной машины, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана

Fig. 3. Breadboard model of a tracked vehicle developed at the Bauman Moscow State Technical University

Макетный образец ГМ оснащен механической трансмиссией, бензиновым двигателем ВАЗ 21126 и механизмом поворота типа «бортовой фрикцион». Особенностью конструкции является диагональное расположение ведущих колес (у правого борта заднее расположение ведущего колеса, а у левого – переднее) для обеспечения возможности использования различных вариантов трансмиссий: механической, электромеханической, гидрообъемной и т.д. Технические характеристики макетного образца ГМ представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Технические характеристики макетного образца ГМ

Table 1.

Technical characteristics of breadboard model of the TV

Параметр	Значение
Масса, кг	2905
База, м	2,98
Колея, м	1,67
Радиус ведущего колеса, м	0,22
Передаточное отношение бортового редуктора	3,012
Передаточное число главной передачи	1,9
Передаточное число главной передачи в коробке передач от ВАЗ 2181	3,7
Передаточные числа коробки передач	3,636; 1,95; 1,357; 0,941; 0,784
Максимальный крутящий момент двигателя, Нм	145 (при 4000 об/мин)
Максимальная мощность двигателя, кВт	72 (при 5600 об/мин)

Схема трансмиссии макетного образца ГМ представлена на рис. 4.

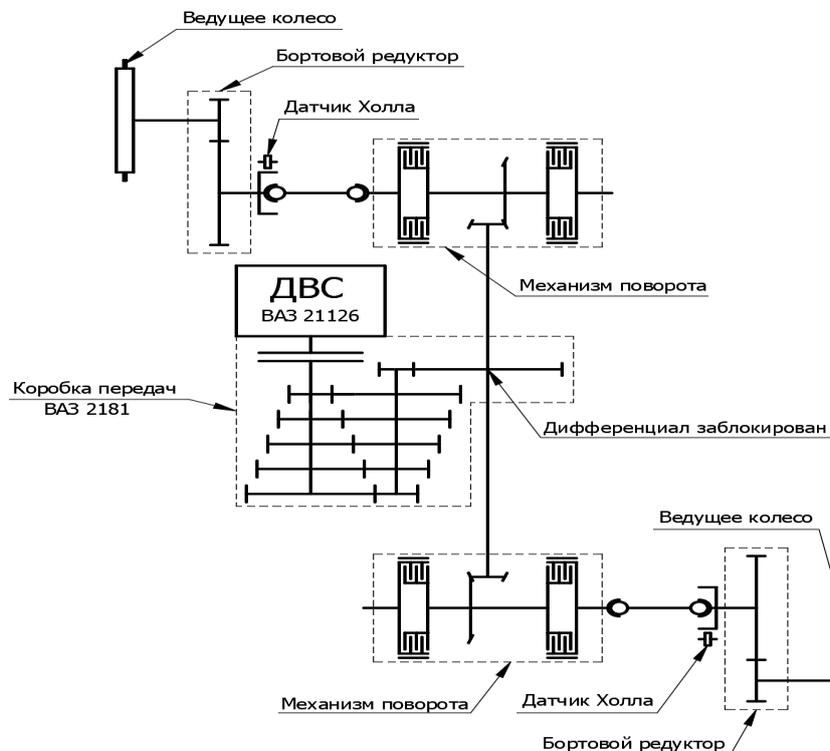


Рис. 4. Схема трансмиссии макетного образца гусеничной машины

Fig. 4. Transmission layout of a breadboard model of the TV

Другим объектом исследования является трелевочный трактор ТБ-1, используемый в качестве тягача при проведении испытаний для верификации математической модели гусеничного поезда. Внешний вид трелевочного трактора ТБ-1 представлен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид трелевочного трактора ТБ-1

Fig. 5. Appearance of TB-1 skidding tractor

Технические характеристики трелевочного трактора ТБ-1М представлены в табл. 2.

Технические характеристики трелевочного трактора ТБ-1М

Таблица 2.

Technical characteristics of TB-1M skidding tractor

Table 2.

Параметр	Значение
Снаряженная масса, кг	10800
База, м	2,31
Колея, м	1,69
Радиус ведущего колеса, м	0,2
Ширина гусеницы, м	0,44
Дорожный просвет, мм	555
Максимальный крутящий момент двигателя, Нм	360 (при 1300 об/мин)
Максимальная мощность двигателя, кВт	58,8 (при 1800 об/мин)
Габаритная высота, мм	2560
Габаритная ширина, мм	2357
Габаритная длина, мм	5850

Целью испытаний является верификация разработанной математической модели движения гусеничного поезда с учетом предварительного экспериментального определения параметров взаимодействия с опорным основанием (коэффициентов сопротивления движению, коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлениях). Для этого при проведении испытаний использовался двухзвенный гусеничный поезд, который представляет собой тягач (трелевочный трактор ТБ-1) и прицеп (макетный образец ГМ), связанные между собой шарнирно с помощью двух рычагов жесткой сцепки. В сцепном устройстве между машинами установлен s-образный тензодатчик для регистрации усилия в сцепке. Внешний вид объекта испытаний представлен на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид объекта испытаний

Fig. 6. Appearance of the test object

На рис. 7 представлена схема объекта испытаний с расположением контрольно-измерительной аппаратуры. Тягач (2) и прицеп (1) шарнирно соединены с помощью двух рычагов жесткой сцепки (8). Между двумя рычагами жесткой сцепки установлен s-образный тензодатчик (3) для регистрации усилия, возникающего в плоскости сцепки в процессе проведения эксперимента. S-образный тензодатчик имеет шарнирную связь с каждым из рычагов (по три вращательные степени свободы в каждом шарнире). С корпусом ГМ каждый из рычагов сцепки соединен с помощью шарниров, имеющих только одну вращательную степень свободы вокруг поперечной оси, таким образом, обеспечивается измерение усилия s-образным тензодатчиком непосредственно в плоскости сцепки. На тягаче установлены индуктивные датчики (4), которые измеряют частоту вращения ведущих колес левого и правого борта. На прицепе установлены такие же датчики (5), которые измеряют частоту вращения входного вала бортового редуктора левого и правого бортов. Регистрация траекторий и линейных скоростей движения тягача и прицепа осуществляется с использованием двух регистраторов данных Racelogic VBox, соединенных с GPS-приемниками (6), которые расположены на корпусе тягача и прицепа, на максимально возможном расстоянии друг от друга для обеспечения максимальной разницы координат записываемых траекторий.

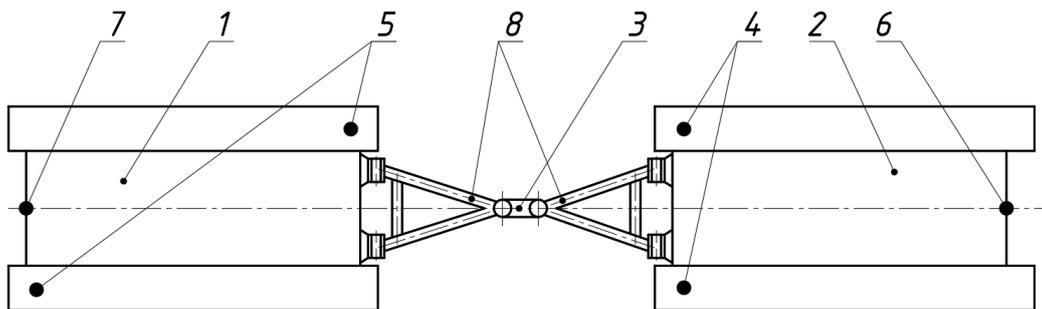


Рис. 7. Схема проведения испытаний

Fig. 7. Testing scheme

Испытания по определению параметров взаимодействия проводились на двух типах опорного основания: ровной асфальтобетонной площадке и ровном грунтовом основании типа «дернистый грунт» [10]. Параметры взаимодействия для трелевочного трактора ТБ-1 определялись только на ровном грунтовом основании типа «дернистый грунт», поскольку этот объект испытаний имеет развитые грунтозацепы, для этого в качестве тягача использовалось колесное трехосное шасси полной массой 25 т. Схема проведения испытаний представлена на рис. 8.

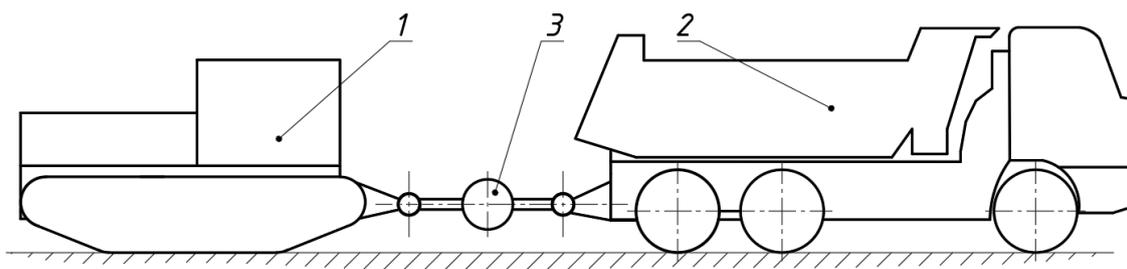


Рис. 8. Схема проведения испытаний для определения параметров взаимодействия для трелевочного трактора ТБ-1

Fig. 8. Testing scheme for determination of interaction parameters for TB-1 skidding tractor

Контрольно-измерительное оборудование

При проведении испытаний по определению параметров взаимодействия с опорным основанием и верификации математической модели использовалось контрольно-измерительное оборудование, представленное в табл. 3.

Таблица 3.

Контрольно-измерительное оборудование

Table 3.

Control and measuring equipment

Аппаратно-измерительный комплекс	Назначение
S-образный тензодатчик С2Н с максимальным измеряемым усилием 50кН	Регистрация усилия в сцепке
Датчики Omron e2a-m30ln30-wp-b1	Для регистрации частот вращения ведущих колес
Регистратор данных Racelogic Vbox	Для измерения скорости и положения движущегося транспортного средства на основе данных, получаемых GPS-приемником
Видеокамеры Racelogic	Для визуальной регистрации и записи (видеорегистрации) событий
Преобразователь ZET 7176	Преобразователь интерфейса CAN 2.0 – USB
Блок питания 24В	Для питания комплекта оборудования
Соединитель ZET 7001	Соединитель измерительной линии
Цифровой модуль ZET 7111	Для подключения S-образного тензодатчика и регистрации усилия в сцепке
Цифровой модуль ZET 7180-V	Для подключения датчиков вращения ведущих колес и регистрации частот вращения
USB ключ ZETKey	Для расширения функционала программного обеспечения ZETLAB
ЭВМ (ноутбук) с кабелем USB 2.0	Для обработки результатов эксперимента и соединения с контрольно-измерительным оборудованием
Программное обеспечение ZETLAB	Для контроля, обработки и записи результатов эксперимента

Комплект оборудования для контроля, обработки и записи данных эксперимента, предназначенный для определения параметров взаимодействия с опорным основанием и верификации математической модели движения гусеничного поезда, установленный на объекте испытаний, представлен на рис. 9.

Программа экспериментальных исследований

Определение коэффициента сопротивления прямолинейному движению f осуществлялось буксировкой тягачом испытываемой машины в продольном направлении. Схема испытаний по определению коэффициента f представлена на рис. 10 а). Коэффициент сопротивления движению был определен для ГМ с подключенной трансмиссией и с включенной нейтральной передачей в коробке передач и выключенными механизмами управления. Буксировка испытываемой машины происходит с постоянной скоростью около 5 км/ч в течение периода времени от 10 до 15 с. Перед проведением испытаний в сцепку между тягачом (2) и испытываемой ГМ (1) был установлен S-образный тензодатчик (3), с помощью которого будет фиксироваться значение усилия $P_{кр}$, требуемого для буксировки испытываемой машины. Непосредственно перед проведением испытаний тензодатчик был откалиброван.



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 9. Оборудование для контроля, обработки и записи данных эксперимента:

- а) комплект оборудования ZETLAB; б) ноутбук с установленным программным обеспечением ZETLAB и VBOXTools и с подключенным к нему контрольно-измерительным оборудованием ZETLAB, установленный на объекте испытаний; в) индуктивный датчик Omron e2a-m30ln30-wp-b1; г) S-образный тензодатчик C2H; д) регистратор данных Racelogic Vbox с комплектом видеокамер Racelogic и GPS-приемником

Fig. 9. Equipment for monitoring, processing and recording of experimental data:

- a) set of ZETLAB equipment; b) laptop with ZETLAB and VBOXTools software installed, and with ZETLAB control and measuring equipment connected to it, installed at the test object; c) Omron e2a-m30ln30-wp-b1 inductive sensor; d) S-shaped C2H strain sensor; e) RacelogicVbox data logger with a set of Racelogic video cameras and a GPS receiver

Определение коэффициента сцепления в продольном и поперечном направлениях φ_x^{max} и φ_y^{max} осуществлялось буксировкой тягачом испытуемой ГМ в продольном и поперечном направлениях с заторможенными бортовыми фрикционами. Схема испытаний по определению коэффициента сцепления в продольном и поперечном направлениях φ_x^{max} и φ_y^{max} представлена на рис. 10 б) и 10 в) соответственно. В сцепку между тягачом (2) и испытуемой ГМ (1) установлен тензодатчик (3), с помощью которого будет фиксироваться значение усилия $P_{кр\ x}^{max}$, требуемого для буксировки испытуемой машины в продольном направлении и $P_{кр\ y}^{max}$, требуемого для буксировки испытуемой машины в поперечном направлении.

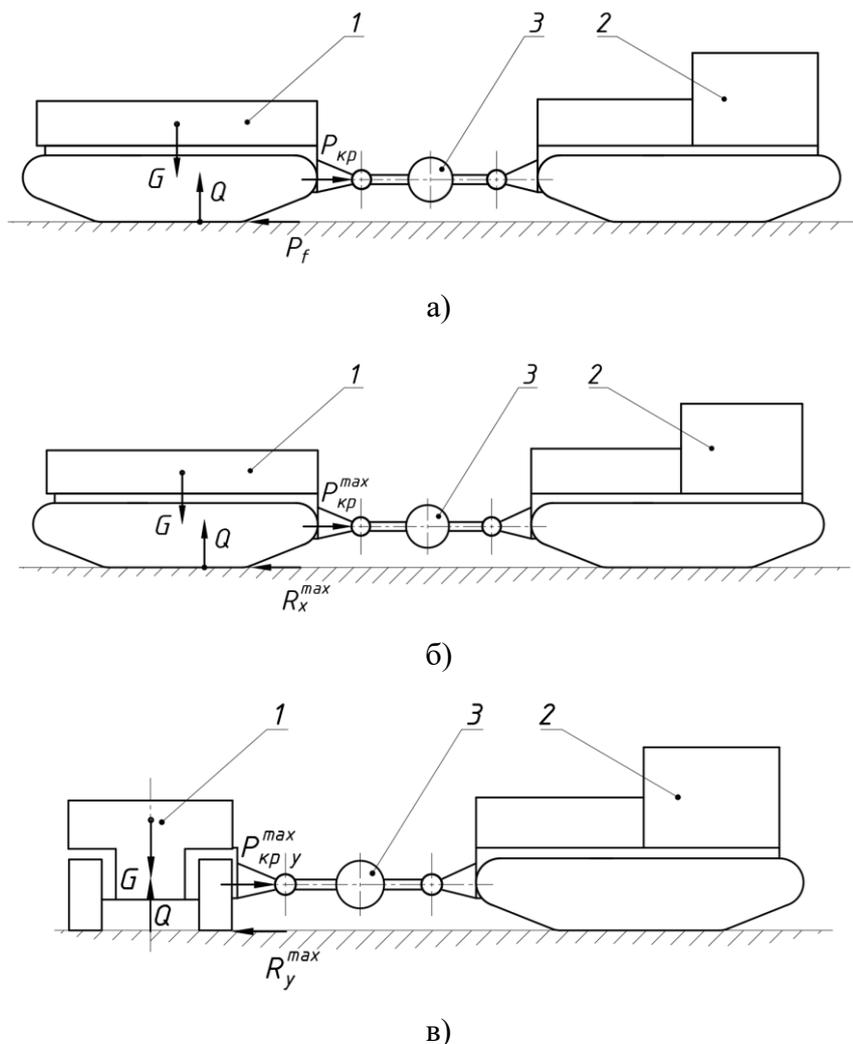


Рис. 10. Расчетные схемы для определения параметров взаимодействия с опорным основанием:
 а) – для определения коэффициента сопротивления движению, б) и в) – для определения коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлениях соответственно

Fig. 10. Calculation schemes for determination of parameters of interaction with the support base:
 а) – to determine the coefficient of resistance to movement, б) and c) – to determine the coefficients of adhesion in the longitudinal and transverse directions, respectively

На рис. 11 представлен макетный образец ГМ в процессе проведения испытаний по определению параметров взаимодействия на грунтовом опорном основании типа «дернистый грунт». После обработки экспериментальных данных должны быть получены значения параметров взаимодействия с опорным основанием, которые будут использоваться в качестве исходных данных при верификации разработанной математической модели движения гусеничного поезда.



а)

б)

Рис. 11. Макетный образец в процессе проведения различных испытаний:

- а) для определения коэффициента сопротивления движению и коэффициента сцепления в продольном направлении на «дернистом грунте»;
- б) для определения коэффициентов сцепления в поперечном направлении на «дернистом грунте»

Fig. 11. Breadboard model in the process of conducting of various tests:

- a) to determine the coefficient of resistance to movement and the coefficient of adhesion in the longitudinal direction on the «turfy soil»;
- b) to determine the coefficients of adhesion in the transverse direction on the «turfy soil»

Рассмотрим порядок проведения экспериментальных исследований для верификации математической модели движения гусеничного поезда. Движение гусеничного поезда вне дорог может осуществляться по траектории, которая может быть представлена в виде комбинации прямых участков и участков в виде дуг окружности различного радиуса, кроме этого, при объезде различных препятствий движение может осуществляться по более сложной траектории типа «змейка» или «синусоида» с переменной кривизной и постоянной сменой знака кривизны. Кроме этого, при движении гусеничных машин по траектории с постоянной сменой знака кривизны значительно меняется момент инерции машины, а, следовательно, значительно изменяются показатели нагруженности элементов трансмиссии [11]. Таким образом, движение по траектории типа «змейка» будем считать наиболее характерным для учета всех особенностей движения гусеничного поезда при проведении эксперимента для верификации разработанной математической модели.

По данным, приведенным в работах [12-14] при эксплуатации гусеничных машин наиболее часто встречаются повороты с кривизной $k = 0 \dots 0,1$ 1/м. С учетом этого для проведения испытаний предварительно была размечена траектория типа «змейка», были выбраны радиусы сопрягаемых дуг 10м. Траектория для выполнения маневра типа «змейка» представлена на рис. 12. При выполнении указанного маневра тягач (трелевочный трактор ТБ-1) двигался с включенной первой передачей в коробке передач с максимальной степенью нажатия на педаль подачи топлива. Для следования размеченной траектории тягач поворачивал за счет механизма поворота типа борт-фрикцион, при этом степень нажатия на педаль подачи топлива не менялась. В коробке передач прицепа (макетного образца ГМ) была включена нейтральная передача, таким образом, связь двигателя с коробкой передач отсутствовала и прицеп являлся пассивным, отдельно отметим, что с учетом особенностей конструкции трансмиссии макетного образца ГМ угловые скорости ведущих колес бортов были одинаковыми. По результатам эксперимента по определению параметров взаимодействия с опорным основанием были получены осциллограммы записи изменения напряжения s-образного тензодатчика. С использованием заранее определенных тарировочных коэффициентов были получены осциллограммы усилий, возникающих в процессе проведения испытаний, далее на осциллограммах были выбраны участки записи с установившимися значениями измеряемых параметров, для каждого из которых было определено математическое ожидание. Пример осциллограммы полученного усилия в процессе выполнения эксперимента по определению коэффициента сцепления в поперечном направлении приведен на рис. 14.

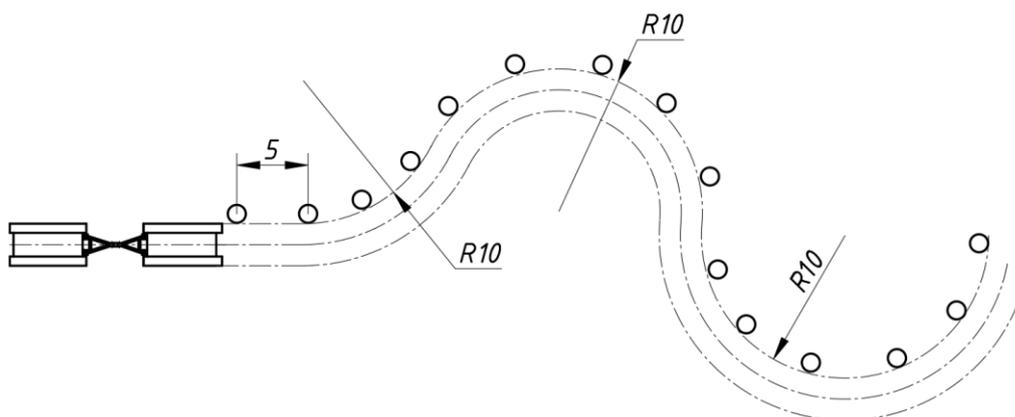


Рис. 12. Траектория для выполнения маневра типа «змейка»

Fig. 12. Trajectory for performing a «snake» type maneuver



Рис. 13. Гусеничный поезд в процессе выполнения маневра «змейка»

Fig. 13. Trajectory for performing a «snake» type maneuver

На рис. 13 изображен гусеничный поезд в процессе выполнения маневра «змейка» при проведении испытаний.

Определение параметров взаимодействия гусеничной машины с опорным основанием

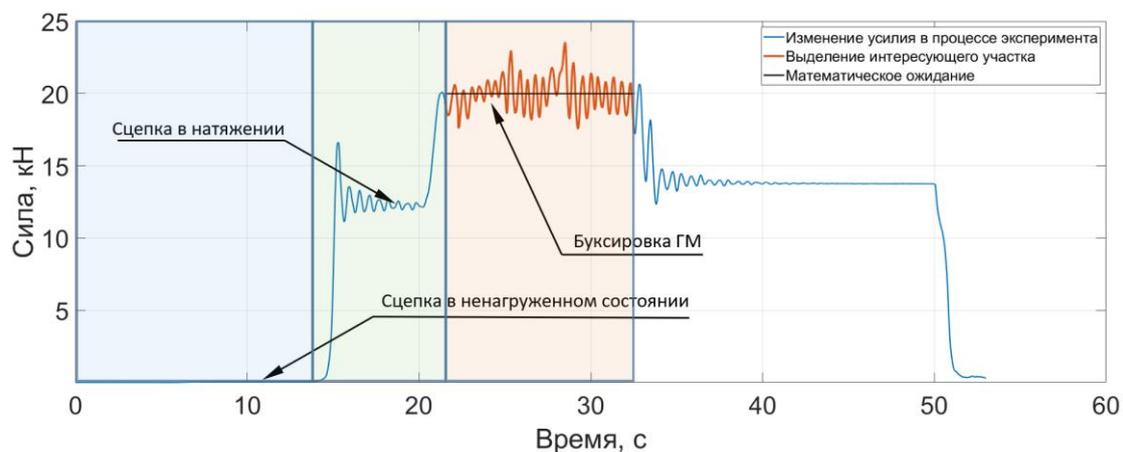


Рис. 14. Осциллограмма полученного усилия в процессе эксперимента

Fig. 14. Oscillogram of the received force during the experiment

Коэффициенты сцепления φ_x^{max} в продольном направлении и φ_y^{max} в поперечном направлении были определены по формулам соответственно:

$$\varphi_x^{max} = \frac{P_{крx}^{max}}{G}; \quad \varphi_y^{max} = \frac{P_{кpy}^{max}}{G}.$$

Коэффициент сопротивления движению определялся по следующей формуле:

$$f = \frac{P_{кр}}{G},$$

где G – вес испытуемого ТС; $P_{кр}$ – усилие, требуемое для буксировки испытуемой машины, полученное после обработки результатов эксперимента.

Для экспериментального определения каждого параметра взаимодействия с опорным основанием было проведено по 10 измерений (по 5 измерений при буксировке в прямом и обратном направлениях для учета влияния возможного уклона опорного основания). На основе полученной выборки необходимо определить величину доверительного интервала. При проведении испытаний были приняты величина доверительной вероятности – 95% и допустимая ширина доверительного интервала, равная $2S_x$, где S_x – выборочное среднеквадратичное отклонение.

Для определения достаточного числа экспериментов и, учитывая принятую допустимую ширину доверительного интервала, определим необходимое число измерений n , которое можно определить из следующего выражения [15]:

$$n \geq \frac{t_{\alpha,m}^2 \cdot S_x^2}{\delta^2},$$

где S_x – выборочное среднеквадратичное отклонение; $t_{\alpha,m}$ – коэффициент Стьюдента порядка $P_t = 1 - \alpha/2$; $P = 1 - \alpha$ – величина доверительной вероятности; $m = 1 - n$ – число степеней свободы; δ – половина ширины доверительного интервала, которая определяется выражением [15]:

$$\delta = \frac{t_{\alpha,m} \cdot S_x}{\sqrt{n}}.$$

На основе предварительной выборки проверяется выполняется ли необходимое число измерений для каждого параметра взаимодействия с опорным основанием. С учетом полученных результатов и с учетом принятых значений ширины доверительного интервала $\delta = 0,016$ и доверительной вероятности $P = 95\%$ необходимое число измерений будет равно $n \geq 7$, таким образом требование по необходимому числу измерений выполняется. Окончательно, коэффициент сцепления в продольном направлении на опорном основании типа «дернистый грунт» с учетом доверительного интервала будет равен $\varphi_x^{max} = 0,75 \pm 0,016$.

Аналогичным образом вычисляются остальные коэффициенты сопротивления движению и коэффициенты сцепления в продольном и поперечном направлении для ровной асфальтобетонной площадке и ровного грунтового основания типа «дернистый грунт» с учетом ширины доверительного интервала при заданной величине доверительной вероятности. Для трелевочного трактора ТБ-1 параметры взаимодействия на грунте были определены аналогичным образом, но при его буксировке использовался колесное трехосное шасси. Результаты определения параметров взаимодействия с опорным основанием приведены в табл. 4. Для каждой группы измерений было выполнено необходимое число измерений для доверительной вероятности $P = 95\%$. Допустимая ширина доверительного интервала не превышает значения $2S_x$.

Верификация математической модели движения гусеничного поезда

Параметры взаимодействия с опорным основанием, которые были получены при проведении экспериментов на «дернистом грунте», использовались в имитационной математической модели гусеничного поезда при ее верификации. Исходные данные разработанной

математической модели движения гусеничного поезда [9] были уточнены с учетом геометрии и расположения шарнирных точек сцепки, полученных параметров взаимодействия с опорным основанием и технических характеристик тягача и прицепа.

Таблица 4.

Результаты определения параметров взаимодействия с опорным основанием

Table 4.

Results of determination of parameters of interaction with the support base

	Асфальтобетонная площадка	«Дернистый грунт»
Коэффициент сопротивления движению (с подключенной трансмиссией) (макетный образец ГМ)	$f = 0,1 \pm 0,001$	$f = 0,124 \pm 0,028$
Коэффициент сцепления в продольном направлении (макетный образец ГМ)	$\varphi_x^{max} = 0,699 \pm 0,019$	$\varphi_x^{max} = 0,75 \pm 0,016$
Коэффициент сцепления в поперечном направлении (макетный образец ГМ)	$\varphi_y^{max} = 0,711 \pm 0,008$	$\varphi_y^{max} = 0,823 \pm 0,007$
Коэффициент сопротивления движению (с подключенной трансмиссией) (трелевочный трактор ТБ-1)	не проводилось	$f = 0,11 \pm 0,019$
Коэффициент сцепления в продольном направлении (трелевочный трактор ТБ-1)	не проводилось	$\varphi_x^{max} = 0,77 \pm 0,018$
Коэффициент сцепления в поперечном направлении (трелевочный трактор ТБ-1)	не проводилось	$\varphi_y^{max} = 0,79 \pm 0,021$

В результате выполнения маневра типа «змейка» при проведении экспериментальных исследований были получены осциллограммы записи частот вращения ведущих колес левого и правого бортов тягача, которые являлись входными (заданными) параметрами для проведения имитационного математического моделирования. При известных параметрах взаимодействия с опорным основанием модели взаимодействия активных участков гусеничного движителя с опорным основанием типа «дернистый грунт» и при известных (входных) частотах вращения ведущих колес были определены силовые факторы в сцепке по результатам математического моделирования движения гусеничного поезда. Кроме этого, в результате имитационного математического моделирования были определены зависимости следующих параметров от времени: частоты вращения входных валов бортовых редукторов левого и правого бортов прицепа, линейные скорости движения тягача и прицепа и траектории движения корпуса тягача и прицепа в местах, соответствующих расположению GPS-приемников. Для верификации математической модели движения гусеничного поезда сравним результаты, полученные при проведении эксперимента и моделировании. На рис. 15 представлены траектории движения тягача и прицепа при проведении эксперимента и по результатам математического моделирования. Максимальная величина отклонения траекторий, полученных при проведении эксперимента и по результатам математического моделирования, не превышает 1,82 м (для соответствующих моментов времени), что находится в рамках максимальной погрешности 1-2 м [16] при определении координат точек корпуса тягача и прицепа с помощью регистратора данных Racelogic Vbox и GPS-приемника.

Рассмотрим зависимости изменения частоты вращения ведущих колес прицепа, усилия в сцепке и линейной скорости движения тягача, полученные по результатам моделирования, и сравним эти зависимости с осциллограммами регистрации соответствующих параметров в процессе проведения эксперимента. На рис. 16 представлены результаты, полученные при проведении эксперимента и при проведении математического моделирования для следующих параметров: частота вращения ведущих колес прицепа (а), усилие в сцепке (б), линейная скорость движения тягача (в).

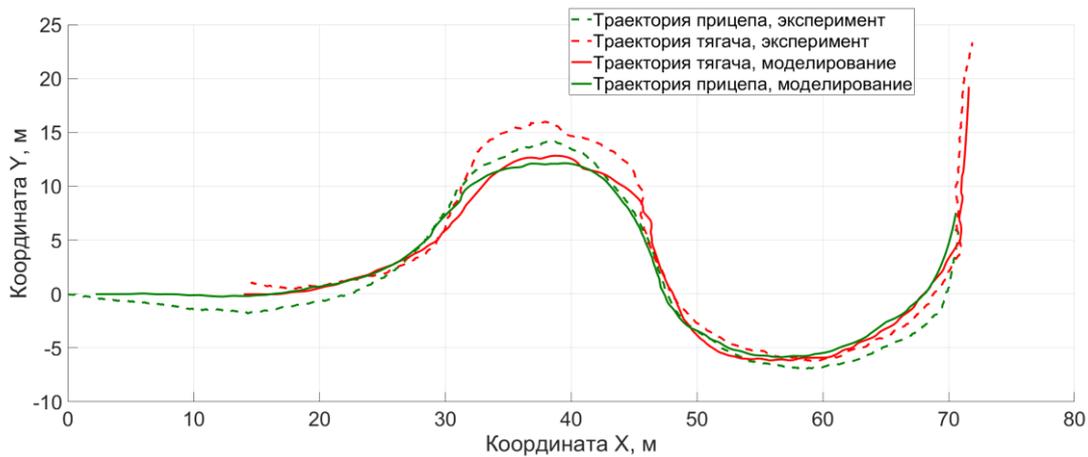


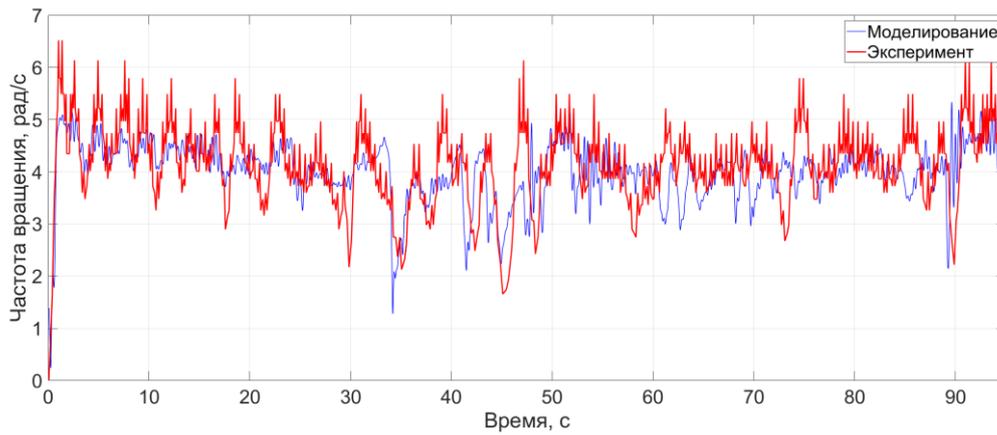
Рис. 15. Сравнение траекторий движения, полученных при проведении эксперимента и по результатам математического моделирования

Fig. 15. Comparison of motion trajectories obtained during the experiment and as per the results of mathematical modeling

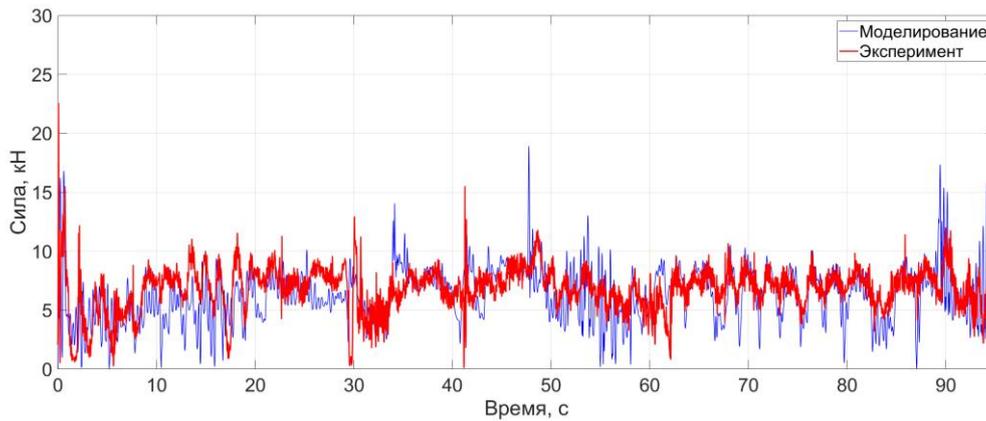
На рис. 16(а) представлен график изменения частоты вращения ведущих колес прицепа, полученный в результате эксперимента с учетом передаточного отношения бортового редуктора. График изменения частоты вращения ведущих колес прицепа носит ярко выраженный высокочастотный характер, что связано с малым количеством меток на один оборот входного вала бортового редуктора, используемых при измерении индукционным датчиком. Кроме этого, с учетом того, что движение гусеничного поезда происходит по криволинейной траектории типа «змейка», полученные результаты носят характер нестационарного процесса. Анализировать такой процесс путем вычисления средних по времени характеристик, как это делается в случае стационарных (эргодических) процессов приводит к сильно искаженным оценкам. Поэтому для оценки нестационарного среднего требуется проведение преобразования, эквивалентного фильтрации низких частот [17]. Такую операцию можно осуществить путем применения вейвлет-анализа [18]. Для вейвлет-фильтрации полученных значений воспользуемся вейвлет-преобразованием с использованием вейвлета Добеши 5-го порядка [19] (рис. 17). В результате максимальное (пиковое) значение относительного отклонения данных эксперимента и моделирования составляет 1,54 рад/с, а среднеквадратическое отклонение не превышает 0,11 рад/с на протяжении всего времени эксперимента, что не превышает погрешности 3 % относительно среднего значения угловой скорости ведущего колеса прицепа за время проведения эксперимента.

Аналогичным образом проанализируем результаты, приведенные на рис. 16(б). Максимальное (пиковое) значение относительного отклонения усилия в сцепке составляет 6 кН, а среднеквадратическое отклонение не превышает 0,65 кН на протяжении всего времени эксперимента, что не превышает погрешности 11% относительно среднего значения усилия в сцепке за время проведения эксперимента. Для линейной скорости (рис. 16(в)) максимальное (пиковое) относительного отклонения составляет 1,58 км/ч, а среднеквадратическое отклонение не превышает 0,24 км/ч, что не превышает погрешности 7 % относительно среднего значения линейной скорости движения тягача за время проведения эксперимента.

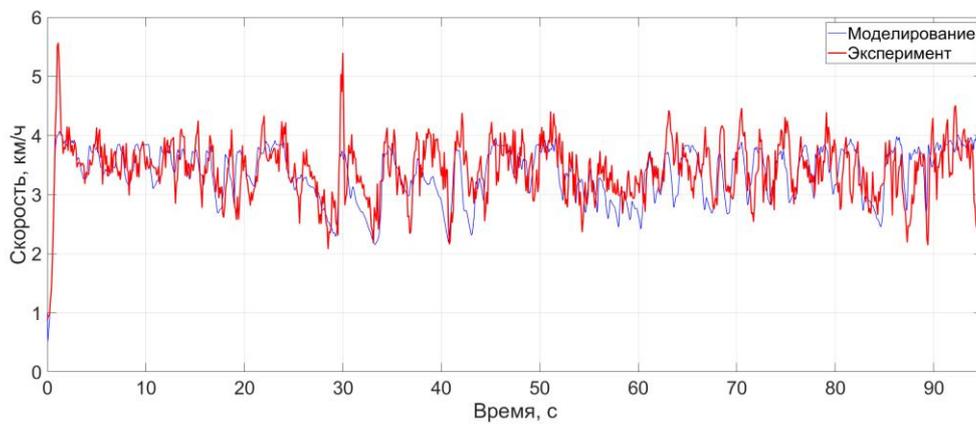
Таким образом, в результате сравнения полученных результатов и в силу небольших отклонений параметров, измеряемых в ходе эксперимента, и параметров, полученных по результатам имитационного математического моделирования, можно считать разработанную модель движения гусеничного поезда [9] верифицированной.



а)



б)



в)

Рис. 16. Сравнение результатов, полученных при проведении эксперимента и при проведении математического моделирования: а) – частота вращения ведущих колес прицепа; б) – усилие в сцепке; в) – линейная скорость движения тягача

Fig. 16. Comparison of results obtained during the experiment and during mathematical modeling: а) – revolutions per minute of the trailer driving wheels; б) – force in coupling; в) – linear speed of the tractor motion

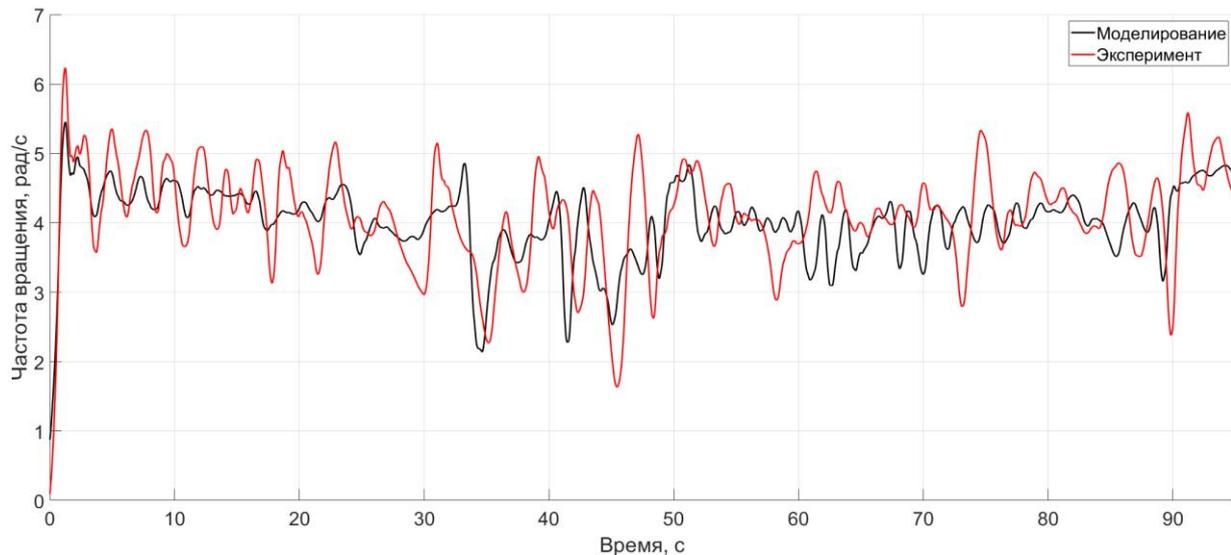


Рис. 17. Частота вращения ведущего колеса левого борта прицепа

Fig. 17. Revolutions per minute of the trailer left side drive wheel

Заключение

Проведены экспериментальные исследования на двух опорных основаниях: на асфальтобетонном основании и на грунтовом опорном основании типа «дернистый грунт». Получены значения коэффициента сцепления φ_x^{max} в продольном направлении, значения коэффициента сцепления φ_y^{max} в поперечном направлении и коэффициента сопротивления движению ГМ f при движении на асфальтобетонном основании и на «дернистом грунте» с учетом принятого значения доверительной вероятности $P = 95\%$ и допустимого значения ширины доверительного интервала, которая не превышает значения $2S_x$. Полученные параметры взаимодействия с опорным основанием были использованы в качестве исходных данных при проведении имитационного математического моделирования движения гусеничного поезда.

В результате сравнения данных, полученных при имитационном математическом моделировании движения гусеничного поезда, с результатами, полученными в ходе проведения экспериментальных исследований, была верифицирована математическая модель двухзвенного гусеничного поезда с пассивным прицепом.

Библиографический список

1. **Рождественский, Ю.Л.** О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основанию / Ю.Л. Рождественский, К.Ю. Машков // Труды МВТУ. 1982. № 390. С. 56-64.
2. **Эллис, Д.Р.** Управляемость автомобиля / Д.Р. Эллис. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
3. **Дик, А.Б.** Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего колеса при движении с уводом. Диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03 / САДИ. Омск, 1988. – 224 с.
4. **Наумов, В.Н.** Оценка конструкций и компоновок военных гусеничных машин с помощью метода анализа иерархий: Учебное пособие / В.Н. Наумов, Ю.Л. Рождественский, В.Г. Брекалов. – М.: Изд-во НГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 64 с.
5. **Стадухин, А.А.** Научные методы определения рациональных параметров электромеханических трансмиссий высокоподвижных гусеничных машин. Диссертация ... доктора технических наук: 05.05.03. Москва, 2021. 317 с.
6. **Горелов, В.А.** Метод определения характеристик индивидуального тягового электропривода двухзвенной гусеничной машины на этапе проектирования / В.А. Горелов, Б.Б. Косицын, А.В. Мирошниченков и др. // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2019. № 3(126). С. 120-134.

7. **Котиев, Г.О.** Теоретические исследования подвижности быстроходных гусеничных машин с электротрансмиссиями Г.О. Котиев, Б.В. Падалкин, А.В. Мирошниченко [и др.] // Материалы международной научно-практической конференции: под редакцией И.А. Каляева, Ф.Л. Черноусько, В.М. Приходько. – 2018. С. 27-36.
8. **Марохин, С.М.** Прогнозирование характеристик подвижности спецавтомобиля, оснащенного системами активной безопасности. Диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03. Москва, 2005. 147 с.
9. **Евсеев, К.Б.** Математическая модель движения гусеничного поезда для внедорожных контейнерных перевозок / К.Б. Евсеев // Тракторы и сельхозмашины. 2001. № 5.
10. **Исаков, П.П.** Теория и конструкция танка. Трансмиссии военных гусеничных машин / П.П. Исаков. Т. 5. М.: Машиностроение, 1985. – 367 с.
11. **Бекетов, С.А.** Теория управляемого движения гусеничных машин / С.А. Бекетов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 125 с.
12. **Фаробин, Я.Е.** Теория поворота транспортных машин / Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
13. **Волков, А.А.** Изменение скорости движения в повороте быстроходной гусеничной маны на основе совершенствования алгоритмов управления движением. Диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03. Круган, 2018. – 180 с.
14. **Шапкин, А.Н.** Методика оценки управляемости гусеничных машин / А.Н. Шапкин // Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». – 2012. С. 243-252.
15. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебное пособие / Спирин Н. А., Лавров В. В., Зайнуллин Л. А. [и др.]; под. ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с.
16. RACELOGIC – Experts in positioning, data logging and video. – URL: <https://www.racelogic.co.uk/index.php/en/> (дата обращения: 15.11.2021).
17. **Бендат, Д.** Прикладной анализ случайных данных / Д. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
18. **Абдель, Р.** Исследование нестационарных динамических процессов при помощи вейвлет-анализа / Р. Абдель, А.В. Урожаев // Строительство: наука и образование. – 2012. № 4.
19. **Дремин, И.М.** Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. № 5. С. 465-501.

*Дата поступления
в редакцию: 24.11.2021*