

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ С ГРУНТОМ

Д.Т.Н. Вольская Н.С., К.Т.Н. Захаров А.Ю., Анисимов М.М.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,

zakharov-al@mail.ru

При проектировании полноприводной колесной машины важной задачей является прогнозирование ее тяговых свойств и ожидаемых параметров проходимости. Для решения такой задачи необходимо иметь адекватную расчетную модель взаимодействия колесного движителя и деформируемого опорного основания. Рассмотрены задачи, связанные с разработкой конструкции стенда, позволяющего проводить тонкие эксперименты в механической системе «активное колесо – грунт» в лабораторных условиях. Основными задачами при проведении экспериментов на этом стенде являются: имитация силового и кинематического взаимодействия реальной пневматической шины (автомобильного колеса) с деформируемой грунтовой поверхностью, механическое состояние которой можно варьировать; измерение силовых и кинематических параметров взаимодействия в системе «шина – грунт»; визуализация процесса неустановившегося взаимодействия шины и грунта в пятне их контакта при разгоне, буксовании и торможении; разработка и создание измерительного комплекса по оценке физико-механического состояния грунтового массива. Проведен обзор существующих конструкций аналогичных стендов и установок для определения параметров взаимодействия колеса с опорным основанием. Рассмотрены задачи, которые необходимо решить в процессе проведения экспериментов, а именно: имитация силового и кинематического взаимодействия реальной пневматической шины (автомобильного колеса) с деформируемой грунтовой поверхностью, механическое состояние которой можно варьировать; измерение силовых и кинематических параметров взаимодействия в системе «шина – грунт»; разработка и создание измерительного комплекса по оценке физико-механического состояния грунтового массива. Представлен комплект измерительного оборудования, с помощью которого оценивается физико-механическое состояние грунтовых условий во время проводимых испытаний. Исследования и эксперименты позволят уточнить физику процессов, происходящих в пятне их контакта, как со стороны шины, так и грунта.

Ключевые слова: грунтовой канал, активное колесо, шина-грунт, деформируемое опорное основание, независимые параметры грунта, сертификация измерительного комплекса.

Введение

Важной задачей при проектировании полноприводной колесной машины (КМ) является прогнозирование ее тяговых свойств и ожидаемых параметров проходимости. Для решения такой задачи необходимо иметь адекватную расчетную модель взаимодействия колесного движителя и деформируемого опорного основания (ДОП). В дальнейшем эту систему будем упоминать как механическую систему «шина – грунт». Доказать адекватность и подтвердить многие параметры в этой системе можно с помощью специального экспериментального комплекса типа «Грунтовой канал – активное колесо». Главной целью создания такого ком-

плекса является разработка стенда для проведения научных исследований с возможностью проведения тонких экспериментов в системе «шина – грунт» (и оценкой их взаимовлияния), проведение лабораторных работ по учебным дисциплинам «Теория движения колесных машин», «Физика грунтов», «Проймодимость колесных машин», «Исследования и испытания наземных транспортно-технологических комплексов».

Основными задачами при проведении экспериментов на этом стенде являются:

- имитация силового и кинематического взаимодействия реальной пневматической шины (автомобильного колеса) с де-

формируемой грунтовой поверхностью, механическое состояние которой можно варьировать;

- измерение силовых и кинематических параметров взаимодействия в системе «шина – грунт»;
- визуализация процесса неустановившегося взаимодействия шины и грунта в пятне их контакта при разгоне, буксовании и торможении;
- разработка и создание измерительного комплекса по оценке физико-механического состояния грунтового массива.

Цель исследования

Целью исследования является разработка экспериментально-исследовательского комплекса по определению показателей взаимодействия пневматической шины с грунтом.

Анализ конструкций грунтовых каналов

Специалистами в области изучения процессов взаимодействия шины с грунтом в зависимости от целей исследований создавались варианты экспериментальных комплексов как для чисто лабораторных исследований, так и полевых. В качестве примеров можно привести ссылки на патенты и полезные модели, созданные во МГИУ [1] (вид установки приведен на рис. 1) и СКБ ЗИЛ [2] (вид конструкции приведен на рис. 2). Разработка таких серьезных комплексов и их реальное воплощение в виде исследовательских научных работ направлены на решение проблемы выбора оптимальной

конструкции и параметров движителя колесных машин (КМ), эксплуатирующихся в условиях внедорожного движения.

Устройство для исследования тягово-сцепных качеств движителей в полевых условиях (рис. 2) предназначено для исследования тягово-сцепных качеств как колес с пневматическими шинами большого диаметра, так и гусеничных движителей различных размеров.

Испытуемый движитель установлен на оси с возможностью вращения относительно нее, ось выполнена в виде тензобалки, снабженной на торцах грузовым устройством, а приводной двигатель связан силовой передачей с ободом колеса.

Основные результаты экспериментальных исследований, которые проводились на стенде МГИУ в лабораторных условиях:

- определение взаимных деформаций шины и грунта при изменении вертикальной нагрузки и давления воздуха;
- оценка влияния цикличности нагружения (т.е. количества проходов колеса по фиксированной колее) на изменение глубины колеи;
- оценка влияния угла увода управляемого колеса на реализуемый крутящий момент при варьировании вертикальной нагрузки и физического состояния грунтового массива по влажности и плотности.

Основные результаты экспериментальных исследований, которые проводились на стенде СКБ ЗИЛ в полевых условиях:

- определение тягового и тормозного моментов в ведущем или тормозном режимах на испытуемом колесном или гусе-

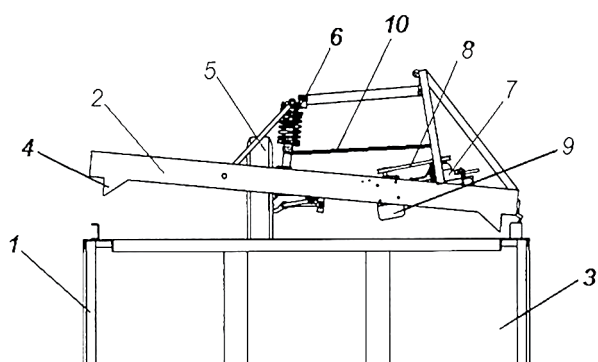


Рис. 1. Конструкция стенда модели МГИУ [1]:

- 1 – грунтовой канал; 2 – тележка; 3 – грунт;
- 4 – балка; 5 – колесо; 6 – подвеска;
- 7 – гидротрансмиссия; 8 – ременная передача;
- 9 – электродвигатель; 10 – рулевая тяга

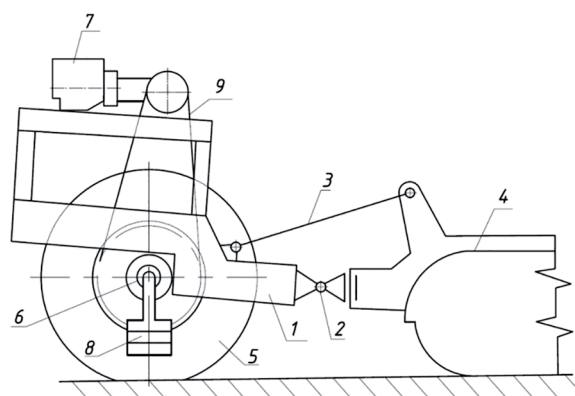


Рис. 2. Конструкция стенда СКБ ЗИЛ [2]:

- 1 – рама; 2 – шарнир; 3 – замыкающее звено;
- 4 – тягач; 5 – испытуемое колесо; 6 – ось (выполнена в виде тензобалки); 7 – приводной двигатель; 8 – грузы; 9 – тяговая цепь

ничном двигателе на различных типах грунтов;

- определение параметров колеи при различных скоростях движения экспериментального комплекса на различных типах грунтов.

Таким образом, разрабатываемый стенд призван помочь решать задачи актуальные в области проектирования колесного двигателя внедорожных машин и обеспечить проведение лабораторного практикума студентов, магистров и аспирантов кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Особые характеристики разрабатываемого грунтового канала

Свободная площадь лаборатории позволяет выделить под грунтовой канал прямоугольный участок длиной 7 м и шириной 2,6 м. Высота грунтового массива в металлической ванне 1,2 м. Одним из основных требований к рабочей части грунтового канала является его максимальная длина при максимально большой размерности шины, позволяющей обеспечить имитацию реальных условий взаимодействия колеса и грунта. В качестве объекта испытаний выбрана шина 215/65 R16 98H. Свободный радиус этой шины в сборе с активным колесом 0,34 м. По длине канала колесо при движении может совершить 3 полных оборота без учета его возможного буксования. Поэтому для обеспечения равномерного движения необходимо предусмотреть специальную конструкцию опорной площадки, с которой обеспечивается старт колеса без потери времени на его разгон. Предполагается, что в экспериментах будет оцениваться влияние давления воздуха в шинах p_w (при его варьировании в интервале 0,1...0,25 МПа) на колесобразование. Вес модуля колеса с редуктором составляет 150 кг, дополнительно предполагается варьирование вертикальной нагрузки на колесо P_z до 300 кг.

В качестве грунтового массива используется просеянный песок, который в большей части экспериментов представляет собой деформирующуюся опорную поверхность (ДОП) в виде несвязанного грунта [3]. Его влажность в сухом состоянии не должна превышать $W_{отн} = 5\%$. Имитация ДОП в виде связанного грунта будет производиться путем увлажнения песка до $W_{отн} = 20\%$. Известно, что песок во влажном состоянии проявляет сцепные

свойства (как в грунтовой массиве, так и при контакте с шиной) как связанный грунт [3]. Плотность грунта регулируется специальным рыхлением, предполагается разработать приспособление для механизации этого трудоемкого процесса.

Выбор схемы активного модуля стенда

В качестве активного модуля разрабатываемого стенда в грунтовой канал предполагается установить рамную конструкцию с колесом в центре. На рис. 3 представлена принципиальная 3D модель этого ключевого узла комплекса. В движение модуль приводит электромотор-редуктор, установленный на одном валу с колесом. Внутренняя рамка с колесом имеет возможность поворачиваться относительно вертикальной оси модуля на фиксированные углы с задаваемым шагом. Таким образом, появляется возможность имитировать криволинейное движение пневматического колеса на деформируемом грунте. В качестве измерительного звена разрабатывается конструкция тензоступицы, шарнирно соединенной с ободом колеса. В конструкции модуля также учитывается возможность изменения вертикальной нагрузки на колесо и давления воздуха в шине.

Для исследования несущей способности грунта на раме устанавливается задавливающее устройство с регистрирующей аппаратурой, позволяющей оценивать физико-механическое состояние грунта на базе диаграммы $q = f(z)$, где q – давление в пятне контакта штампа с грунтом, z – вертикальная координата штампа [4]. Для исследования несущей способности грунта на раме устанавливается задавливающее устройство, состоящее из пневмо-(гидро) цилиндра, к штоку которого через регистрирующую аппаратуру крепится пята, по площади соответствующая пятну контакта реального колеса. На рис. 3 приведена 3D модель проектируемого стенда.

Обеспечение скоростного и силового режимов эффективного движения активного колеса

Выбор номинальной мощности асинхронного двигателя, который активизирует движение активного модуля можно провести на базе анализа уравнения мощностного баланса колеса. Как уже выше упоминалось, в отличие от известных стендов, разрабатываемый комплекс призван решать задачи, связанные с внутрен-

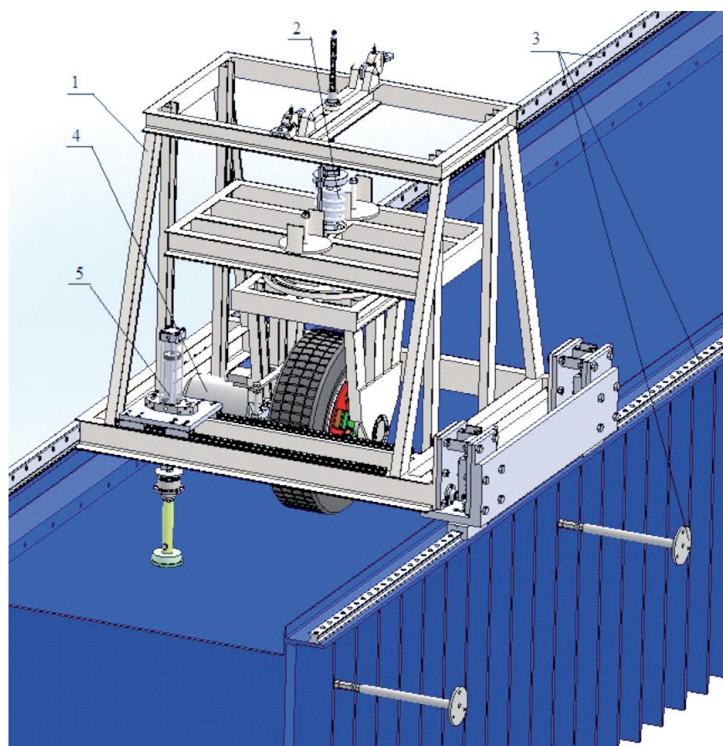


Рис. 3. Конструкция основного модуля стенда «Грунтовой канал»: 1 – рама модуля «активное колесо»; 2 – нагружающее устройство; 3 – направляющие и опоры модуля; 4 – электродвигатель; 5 – задавливающее устройство для регистрации деформативных свойств грунта

ней механикой системы «шина – грунт». Поэтому, прогнозируя основные составляющие потерь на сопротивление качению активного колеса, в расчетах выделим составляющие на сопротивление шины и грунта качению, буксование колеса при максимальном его значении и сопротивление боковому уводу. Так как движение колеса будет имитировать и прямолинейное и криволинейное движения при скорости около 0,7 м/с в тяжелых ДГУ (глубокий сухой неплотный песок, влажный песок при максимальной весовой нагрузке P_z), уравнение будет иметь следующий упрощенный вид:

$$N_{\text{дв}} \eta_{\text{тр}} = N_{\text{фш}} + N_{\text{гр}} + N_s + N_j + N_y,$$

где $N_{\text{фш}} = 0,1$ кВт – сопротивление шины качению; $N_{\text{гр}} = 1$ кВт – сопротивление грунта качению (при максимальном значении силы P_z); $N_s = 1$ кВт – буксование (экстремальные значения); $N_j = 0,2$ кВт – на разгон колеса; $N_y = 0,5$ кВт – на боковой увод.

Ожидаемые численные значения мощностных потерь на качение определены приблизительно по результатам исследований и расчетов других авторов [5].

Для решения задач, поставленных перед разрабатываемым стендом, выбирается асин-

хронный двигатель номинальной мощностью 3 кВт (АИР 90L2).

Паспортные данные: $n_1 = 300$ рад/с; $P_n = 3$ кВт; $n_n = 285$ рад/с; $\eta = 83,4 \%$; $\cos \varphi = 0,86$; $M_{\text{max}}/M_n = 2,3$.

Для сравнения результатов экспериментов и расчетного моделирования в контактных задачах «шина – грунт» необходимо предварительно провести расчет механической характеристики электродвигателя [6].

В силовой модуль входят электродвигатель и редуктор. Для редуктора по задаваемой максимальной скорости движения активного колеса определяется передаточное число. Предполагается использование двухрядного планетарного редуктора с передаточным числом $i=25$.

Механическая характеристика электродвигателя

Номинальный крутящий момент двигателя:

$$M_n = 9,55 P_n / n_n; \quad M_n = 10,07 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Номинальное скольжение:

$$S_n = \frac{(n_1 - n_n)}{n_1}.$$

Критическое скольжение и крутящий момент:

$$S_k = S_n \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}); M_{кр} = \lambda \cdot M_n.$$

Крутящие моменты для заданных значений скольжений (зависимость $M = f(S)$) представлены на рис. 4).

$$M = \frac{2 M_{кр}}{\left(\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} \right)}.$$

Частота вращения: $n = n_1 (1 - S)$.

График механической характеристики электродвигателя $n = f(M)$ представлен на рис. 5.

Комплекс измерительного оборудования для оценки физико-механического состояния грунта

Отличительной чертой создаваемого грунтового канала является создание комплекса измерительного оборудования, с помощью ко-

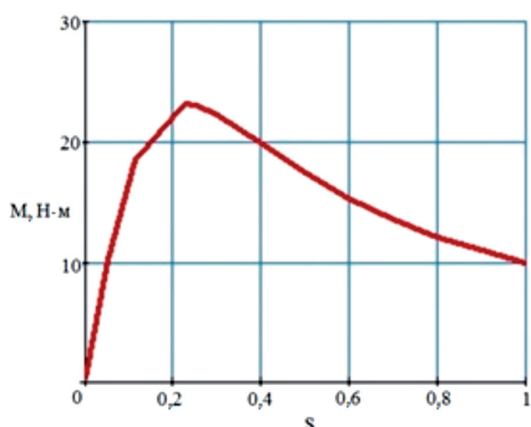


Рис. 4. Зависимость крутящего момента на валу электродвигателя от магнитного скольжения $M = f(S)$

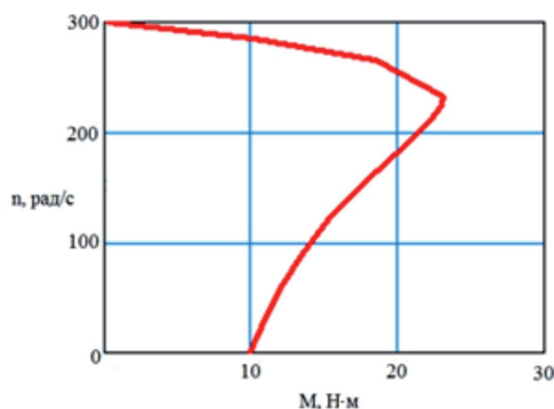


Рис. 5. Механическая характеристика электродвигателя

торого предполагается контролировать состояние грунтового массива и обеспечивать его задаваемые деформативные свойства.

Известно [4], что физическое состояние грунта определяется его плотностью и влажностью. Поэтому для оценки этих параметров используется плотномер-влажномер Ковалева (рис. 6).

Для определения модуля деформации грунта используется модернизированная оригинальная конструкция ручного пенетromетра МГИУ с набором штампов (рис. 7).

Угол внутреннего трения и внутреннего сцепления в грунте, коэффициент сопротивления движению и удельное сопротивление

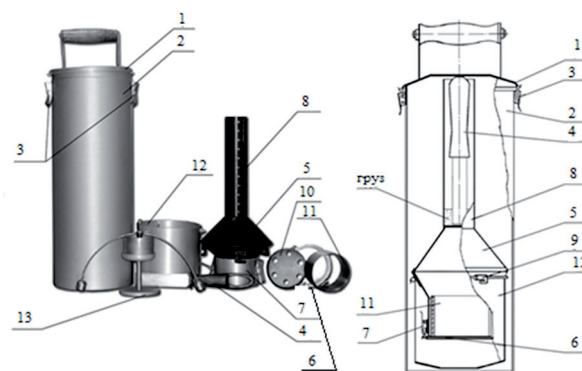


Рис. 6. Плотномер-влажномер Ковалева:

- 1 – крышка; 2 – футляр-ведро; 3 – зажимы;
- 4 – нож-шпатель; 5 – поплавки; 6 – дно; 7 – зажимы;
- 8 – мерная трубка; 9 – камера мерной трубки;
- 10 – крышка; 11 – режущее кольцо; 12 – подвесной сосуд; 13 – балансирующий конус Васильева



Рис. 7. Ручной пенетromетр

грунта срезу определялись с помощью универсального пенетromетра ВСЕГИНГЕО.

С помощью этих приборов по известным методикам определяются конкретные значения независимых параметров грунта: E – модуль деформации; МПа, φ_0 – угол внутреннего трения, град; c_0 – внутреннее сцепление в грунте, МПа [3].

Выводы

1. Разрабатываемый комплекс «грунтовой канал – активное колесо» позволит эффективно решать задачи лабораторного практикума, связанные с учебным процессом по целому ряду дисциплин и научным исследованиям специальности 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины.

2. Использование принципа работы стенда – проведение научных исследований на основе одновременной оценки силового нагружения активного колеса и изменения его эксплуатационных параметров при измерительном контроле состояния грунта. Этот принцип позволит уточнить теорию прогнозирования параметров проходимости колесных машин на стадии их проектирования.

3. Появилась возможность сертифицировать процесс оценки взаимовлияния эксплуатационных параметров автомобильного колеса (нормальная нагрузка, крутящий момент, давление воздуха в шине, режим движения) и физико-механического состояния грунта. Эта задача является самой трудной и практически нерешенной проблемой, объединяющей процессы: проектирования, моделирования и эксперимента в механической системе взаимодействия «шина – грунт».

Литература

1. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Стенд «Грунтовой канал»: патент на полезную модель № 98812. Российская Федерация. Опубликовано 2010 г.
2. Вольский С.Г., Терновский Б.И. Устройство для исследования тягово-сцепных качеств движителей в полевых условиях: авторское свидетельство № 670844. СССР. Опубликовано 30.06.79. Бюллетень 24.

3. Каган А.А. Расчетные показатели физико-механических свойств грунтов. Л.: Издательство литературы по строительству, 1973. 144 с.
4. Вольская Н.С. Оценка проходимости колесных машин при движении по неровной грунтовой поверхности. М.: МГИУ, 2007. 215 с.
5. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 391 с.
6. Построение механической характеристики асинхронного двигателя. Режим доступа: <http://electroandi.ru/elektricheskie-mashiny/postroenie-mekhanicheskoy-kharakteristiki-asinkhronnogo-dvigatelya.html> (Дата обращения: 29.10.2017).

References

1. Vol'skaya N.S., Ageykin Ya.S. i dr. *Stend «Gruntovoy kanal»* [“Ground channel” Stand]: patent na poleznuyu model' No 98812. Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 2010 g.
2. Vol'skiy S.G., Ternovskiy B.I. i dr. *Ustroystvo dlya issledovaniya tyagovostsepnnykh kachestv dvizhiteley v polevykh usloviyakh* [Device for research of traction-coupling qualities of propulsors in field conditions]: avtorskoe svidetel'stvo No 670844. SSSR. Opublikovano 30.06.79. Byulleten' No 24.
3. Kagan A.A. *Raschetnye pokazateli fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov* [Calculated parameters of physical and mechanical properties of grounds]. Leningrad: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu Publ., 1973. 144 p.
4. Vol'skaya N.S. *Otsenka prokhodimosti kolesnykh mashin pri dvizhenii po nerovnoy gruntovoy poverkhnosti* [Assessment of cross-country ability of wheeled vehicles when driving on uneven ground surface]. Moscow: MGIU Publ., 2007. 215 p.
5. Larin V.V. *Teoriya dvizheniya polnoprivodnykh kolesnykh mashin* [Theory of motion of all-wheel drive vehicles]. Moscow: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2010. 391 p.
6. *Postroenie mekhanicheskoy kharakteristiki asinkhronnogo dvigatelya* [Construction of mechanical characteristics of induction motor] (in Russ.). URL: <http://electroandi.ru/elektricheskie-mashiny/postroenie-mekhanicheskoy-kharakteristiki-asinkhronnogo-dvigatelya.html> (accessed: 29.10.2017).

DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL RESEARCH COMPLEX FOR DETERMINING PARAMETERS OF INTERACTION OF A PNEUMATIC TIRE WITH GROUND

Dr.Eng. **N.S. Vol'skaya**, Ph.D. **A.Yu. Zakharov**, **M.M. Anisimov**

Bauman MSTU, Moscow, Russia,
zakharov-al@mail.ru

When designing an all-wheel drive vehicle, an important task is to predict its traction properties and expected cross-country parameters. To solve such a problem it is necessary to have an adequate design model for interaction of a wheel propulsor and the deformable support base. The article deals with the problems associated with development of the test stand design, which allows to conduct fine experiments in the mechanical system "active wheel – ground" in a laboratory. The main tasks during the experiments on this stand are: simulation of the power and kinematic interaction of a real pneumatic tire (automobile wheel) with a deformable ground surface, the mechanical state of which can be varied; measurement of force and kinematic parameters of interaction in the system "tire – ground"; visualization of the process of unsteady interaction of the tire and the ground in the spot of their contact during acceleration, skidding and braking; development and creation of a measuring complex for assessing the physical and mechanical state of a ground massif. The authors reviewed the existing designs of similar stands and installations for determining the parameters of interaction of the wheel with the support base. Problems that need to be solved during the experiments are considered, namely: simulation of the power and kinematic interaction of a real pneumatic tire (automobile wheel) with a deformable ground surface, the mechanical state of which can be varied; measurement of force and kinematic parameters of interaction in the system "tire – ground"; development and creation of a measuring complex for assessing the physical and mechanical state of a ground massif. A set of measuring equipment is presented, with the help of which the physical and mechanical condition of ground conditions is evaluated during the tests. Investigations and experiments will make it possible to clarify the physics of the processes occurring in the spot of their contact, both from the tire side and from the ground.

Keywords: ground channel, active wheel, ground tire, deformable support base, independent ground parameters, certification of measuring complex.