DOI: 10.34220/2311-8873-2025-60-81

УДК 621.43

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТЕНДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И РЕЖИМОВ КАЧЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН

Гудков Виктор Владимирович,
к.т.н., доцент, доцент кафедры автомобильной подготовки ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж.

✉[1] **Сокол Павел Александрович,**
к.т.н., преподаватель кафедры автомобильной подготовки ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, e-mail: pavsokol@yandex.ru

Аннотация. В статье проанализированы способы и методы испытаний пневматических шин на стендах различной конструкции, рассмотрены их достоинства и недостатки. Приведены ограничения, влияющие на качество проведения испытаний шин и на их результаты. Рассмотрены характерные особенности проведения стендовых испытаний пневматических шин, а также возможность прогнозирования их надежности и предполагаемой нормы наработки в реальных условиях эксплуатации автомобилей. Проанализирован выбор режимов проведения испытаний, оказывающий существенное влияние на полученные результаты при оценке их надежности, возможной степени влияния на безопасность дорожного движения и норму наработки пневматических шин.

Ключевые слова: ПНЕВМАТИЧЕКСКАЯ ШИНА, ИСПЫТАНИЯ, БАРАБАН, СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ, НАГРУЗКИ, СТЕНДОВЫЕ, НАТУРНЫЕ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

[1] *Автор для ведения переписки*

UDC 621.43

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF STANDS FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS AND ROLLING MODES OF PNEUMATIC TIRES

Gudkov Viktor Vladimirovich,
candidate of technical sciences, associate professor, associate of department of automotive training, Military Education and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the RF, Voronezh.

✉[1] **Sokol Pavel Alexandrovich,**
candidate of technical sciences, lecturer of department of automotive training, Military Education and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the RF, Voronezh, e-mail: pavsokol@yandex.ru

Annotation. The article analyzes the methods and methods of testing pneumatic tires on stands of various designs, their advantages and disadvantages are considered. The limitations affecting the quality of tire testing and their results are given. The characteristic features of bench testing of pneumatic tires are considered, as well as the possibility of predicting their reliability and the expected operating time in real-world vehicle operating conditions. The choice of test modes is analyzed, which has a significant impact on the results obtained in assessing their reliability, the possible degree of impact on road safety and the operating rate of pneumatic tires.

Keywords: PNEUMATIC TIRE, TESTING, DRUM, ROLLING RESISTANCE, LOADS, BENCH, FULL-SCALE, SIMULATION.

1 Актуальность, постановка вопроса, план исследования (обзора)

Качение пневматических шин по различным опорным поверхностям (ОП) сопровождается их деформацией в тангенциальном, радиальном и боковом направлении, величина которой зависит от их жесткостных и упругих характеристик, определяющих их технические и экономические показатели, и, соответственно, эксплуатационные показатели автомобилей. При этом, особенности конструкции пневматических шин фактически определяют управляемость и устойчивость автомобиля, его топливную экономичность, динамические, тормозные и сцепные показатели, проходимость, шумность и плавность хода.

Преобразование крутящего момента, подводимого к колесному движителю через узлы и агрегаты трансмиссии от силового двигателя в силу тяги происходит за счет действия внешних сил трения, возникающих в области их контакта с ОП (при сдвиге грунта) элементами протектора пневматических шин. Тяговые показатели колесного движителя оцениваются по максимальной величине тягового КПД, тяговой мощности, силы тяги, удельному расходу топлива, а также от изменения перечисленных параметров от типа и состояния ОП, внутреннего давления воздуха в шине и т.д. При этом, колесный движитель оказывается конечным элементом в линейке "двигатель – трансмиссия – движитель – опорная поверхность", а его характеристики будут определять показатель эффективности применения автомобилей в целом. Перспективное улучшение их технических и экономических характеристик неразрывно связано с усовершенствованием конструкции пневматических шин и повышением тяговых показателей колесного движителя, на которые влияют многообразие и сложность физических процессов, протекающих в области контакта пневматических шин с ОП при качении колеса в ведомом, свободном, нейтральном, тормозном и ведущем режимах.

Кроме того, из-за геометрических размеров области контакта пневматических шин с ОП, особенно автомобилей повышенной и высокой проходимости, необходимо корректно анализировать физические процессы в ней происходящие ввиду нелинейного изменения физических свойств пневматических шин, т. к. будет невозможно применять методы теории подобия для использования результатов, полученных при испытаниях шин меньшего диаметра.

Исходя из вышеизложенного, создание имитационных стендов для натурных испытаний пневматических шин, представляет собой сложную научно-практическую задачу, расширяющую область знаний и способствующую дальнейшему развитию и уточнению существующих теорий взаимодействия колесного движителя с ОП.

Одним из наиболее важных этапов в жизненном цикле пневматических шин, определяющих их долговечность, износостойкость и усталостную прочность, являются их натурные испытания как при создании новых моделей, так и в процессе их производства и совершенствования конструкций, что требует развития технических средств и методов испытаний [1]. Комплекс испытаний внедорожных шин включает в себя: монтажные, статические, динамические стендовые, гидростатические, трековые, лабораторно-дорожные и эксплуатационные испытания. Объем, режимы, а также методика анализа и оценки полученных результатов будут зависеть от цели и вида испытаний, которые определяются программой испытаний и реальными возможностями технических средств испытаний [2-4]. К преимуществам стендовых испытаний относятся оперативность, кратковременность проведения, а также обеспечение постоянства условий и хорошей воспроизводимости результатов. Однако, стендовые испытания не могут дать исчерпывающей информации об эксплуатационных показателях шин, поэтому их в дальнейшем подвергают трековым, дорожным и эксплуатационным испытаниям.

Существовавшие и ныне существующие стенды, предназначенные для испытаний пневматических шин, находящиеся на территории Российской Федерации, используются для испытаний разрабатываемых отечественных и закупаемых пневматических шин иностранных производителей для автомобилей различного назначения. Также, испытательные стенды находятся на шинных заводах и используются для определения относительной долговечности выпускаемых шин. По своей конструкции такие стенды делятся на два типа: барабанные и имитационные, причем, в некоторых случаях, требуется примерное равенство диаметров шины и

бегового барабана. При этом, существуют стенды двухбарабанного типа для работы с пневматическими шинами диаметром до 2 м. На некоторых шинных заводах для оценочных испытаний применяются стенды для шин диаметром до 3 м с нагрузкой на них более 20 т.

Специализированной имитационной базой для проведения испытаний шоссейных и внедорожных шин, по нашим данным, располагали:

1. Стенд для испытаний шин при прямолинейном движении, находящийся в Воронежском инженерно-строительном институте (ВИСИ), ныне – ВГТУ, в настоящее время не существует.

2. Стационарный стенд для испытаний строительных и дорожных машин (автогрейдеров) и исследования распределения сил и реакций ОП по колесам движителя при движении по горизонтальным и наклонным ОП, был создан в ВИСИ, в настоящее время не существует.

3. Круговой стенд для испытаний крупногабаритных шин диаметром до 2 м и нагрузкой до 15 т, или, балансира с диаметром колес до 1,5 м и нагрузкой на них до 7 т, с радиусом поворота 1,65…6,15 м и возможностью проведения испытаний на грунтовых, бетонных и песчаных ОП, был создан в ВИСИ. В настоящее время разукомплектован.

4. Круговой стенд для испытания крупногабаритных шин в Днепропетровском институте крупногабаритных шин (ГосНИИКГШ), Украина, разукомплектован.

5.Стенд для испытаний сельскохозяйственных шин (Ростовская обл., г. Зерноград) – сведений нет.

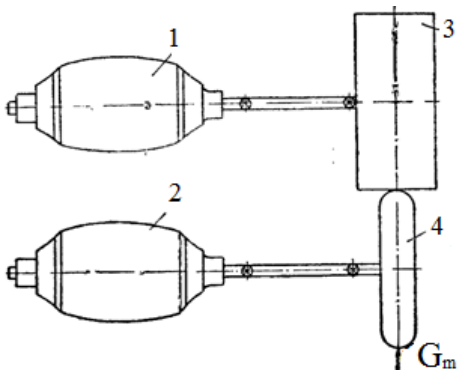
6. ОАО «Днепрошина», г. Днепропетровск, Украина – сведений нет.

7. БШК «Белшина» г. Бобруйск, Республика Беларусь – сведений нет.

В связи с отсутствием методики расчета ходимости пневматических шин в настоящее время не представляется возможным на стадии их проектирования корректно определить срок их службы (наработки) и оценить потери при замене и выбраковке шин, не выходивших установленный руководящими документами ресурс, или при снятии с эксплуатации шин, имеющих износ больше критического. Также, увеличение их стоимости, с одной стороны, и отсутствие методики определения их срока службы, с другой стороны, ведет к избыточным и непредвиденным затратам при эксплуатации автомобилей и не позволяет на стадии проектирования определить долговечность шины. Все это обусловливает актуальность разработки достоверных методик и средств исследований шин с различными размерными, физико-механическими параметрами и эксплуатационными характеристиками.

2 Анализ информационных источников

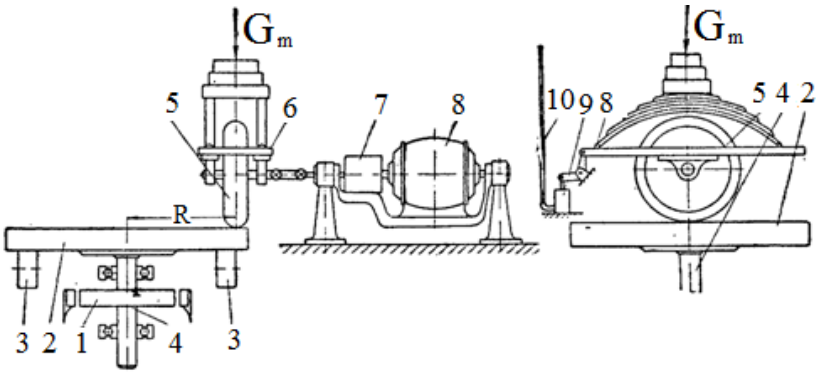
Одним из первых в нашей стране испытания пневматических шин начал проводить коллектив под руководством академика А. Е. Чудакова. Схемы стендов, на которых они происходили, представлены на рис. 1-5 [5, 6]. Испытания проводились на барабанных стендах простейших конструкций с малыми нагрузками на автомобильные шины.



1, 2 – электродвигатель; *3* – беговой барабан; *4* – колесо

Рисунок 1 – Схема барабанного стенда для испытания автомобильных шин

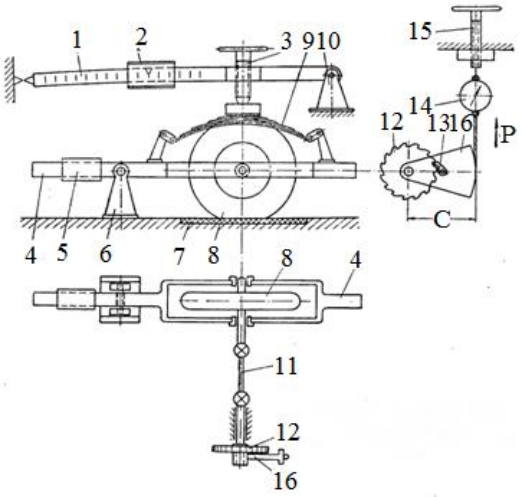
Недостатком стендов данного типа является отрицательная кривизна контактной области «шина – беговой барабан» и малый радиус испытуемых шин.



1 – механический тормоз; *2* – беговой диск; *3* – ролики; *4* – вал; *5* – ось колеса; *6* – подшипник рамы; *7* – редуктор; *8* – электродвигатель; *9* – гидравлический пресс

Рисунок 2 – Схема карусельного стенда для испытания автомобильных шин

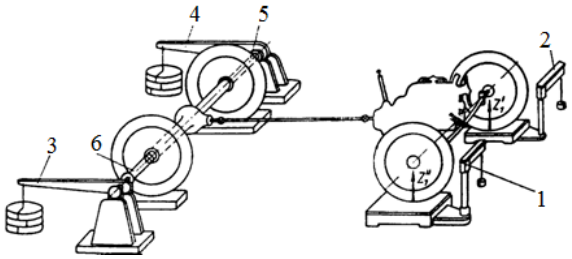
Недостатком карусельного стенда является малый радиус бегового диска, что резко ограничивает радиусы испытуемых шин и создает большие ошибки и погрешности при измерениях.



1, 4 – балка; *2* – передвижной груз; *3,15* – винт; *5* – груз; *6, 10* – кронштейн; *7* – поверхность; *8* – колесо; *9* – рессора; *11* – карданный вал; *12* – храповое колесо; *13* – собачка; *14* – динамометр; *16* – сектор

Рисунок 3 – Схема установки для определения коэфициента сцепления и тангенциальной эластичности автомобильных шин

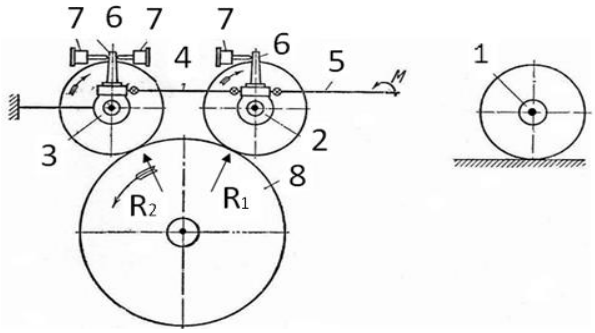
Стенд для определения коэфициента сцепления и тангенциальной эластичности автомобильных шин почти не учитывает деформацию шины при качении, т.к. силовой радиус имеет зависимость и от момента *M* и от вертикальной нагрузки *G*.



1, 2 – весы; *3, 4* – нагружающие рычаги; *5, 6* – карданные передачи

Рисунок 4 – Схема установки для определения зависимости радиальных реакций от момента, подведенного к задней ведущей оси автомобиля

Недостатки стенда для определения зависимости радиальных реакций от момента аналогичны схеме, показанной на рис. 3.

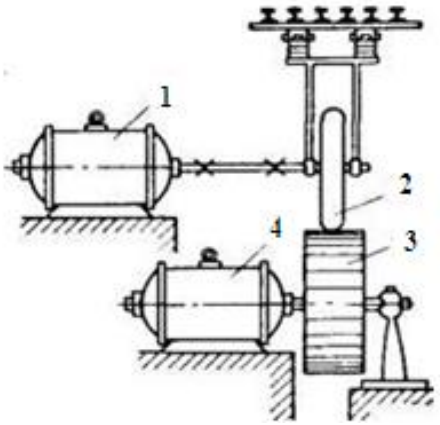


1, 2, 3 – ведущие оси; *4, 5* – карданный вал; *6* – рычаг; *7* – динамометр; *8* – барабан; R_1, R_2 – реакции, действующие на шины

Рисунок 5 – Схема установки по определению радиусов качения шин

Недостатком стенда, показанного на рис. 5, является отрицательная кривизна в области контакта, неточная имитация ОП, при этом замер нагрузок по вертикали затруднен, т. к. горизонтальные реакции ОП в области контакта разнонаправлены в соответствии с кривизной барабана. Практически всегда будет наблюдаться перераспределение нагрузок из-за циркуляции мощности, даже в свободном режиме.

Стенд, показанный на рис. 6, предназначен для сравнительных испытаний шин на долговечность в целях определения их ресурса при движении по различным типам ОП. Сравнение результатов происходит по относительному пробегу (больше – мешьше), т.к. имитация нагрузки на шину не соответствует реальным условиям эксплуатации.

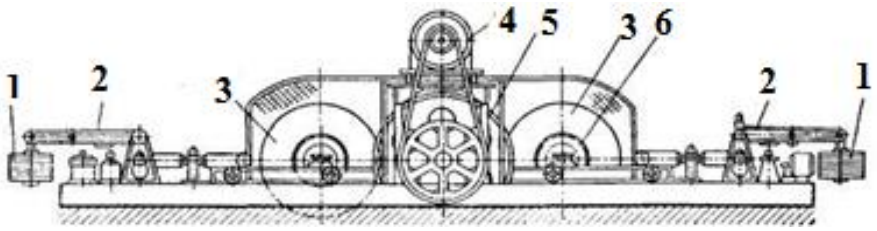


1, 4 – электродвигатель; *2* – колесо; *4* – беговой барабан

Рисунок 6 – Стенд для определения долговечности шин

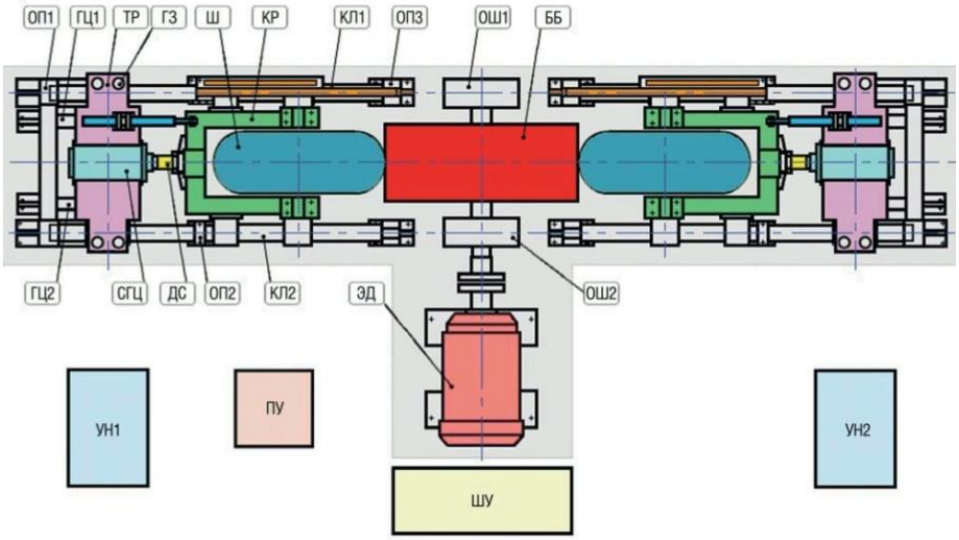
Шинообкатный станок с механическим догружением, показанный на рис. 7, используется для обкатки шин с целью выявления усталостной долговечности протектора, корда и брекера шины при длительном качении.

Стенд для динамических испытаний пневматических шин с автоматизированной системой управления СО2–100 (рис. 8) представляет собой усовершенствованный вариант стенда, показанного на рис. 7, в котором для поддержания заданной нагрузки на пневматические шины использован электрогидравлический привод вместо механического [7].



1 – груз; *2* –угловой рычаг; *3* – пневматическая шина; *4* – электродвигатель; *5* – беговой барабан; *6* – каретка установочная

Рисунок 7 – Шинообкатный станок



ОП1-ОП3 – первая, вторая и третья опоры; ГЦ1, ГЦ2 – первый и второй гидроцилиндры; ТР – траверса; ГЗ – гидравлический зажим; Ш – шина; КР – каретка; КЛ1, КЛ2 – первая и вторая колонны; ОШ1, ОШ2 – первая и вторая шарикоподшипниковые опоры; ББ –беговой барабан; СГЦ – силовой гидроцилиндр; ДС – датчик силы; ЭД –электродвигатель; УН1, УН2 – первая и вторая насосные установки; ПУ – пульт управления; ШУ – шкаф управления

Рисунок 8 – Схема стенда СО2–100

Основой стенда, общий вид которого приведен на рис. 9, а схема – на рис. 10, служит установленная на фундаменте жесткая рама, на которой смонтированы все элементы стенда с возможностью перемещения испытуемого колеса по высоте и в осевом направлении. Нормальное нагружение колеса задается вертикальным перемещением промежуточной плиты, при этом обеспечивается боковое нагружение шины [8].

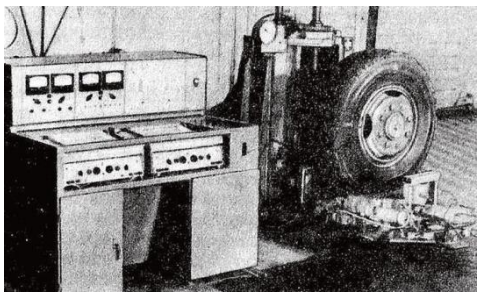
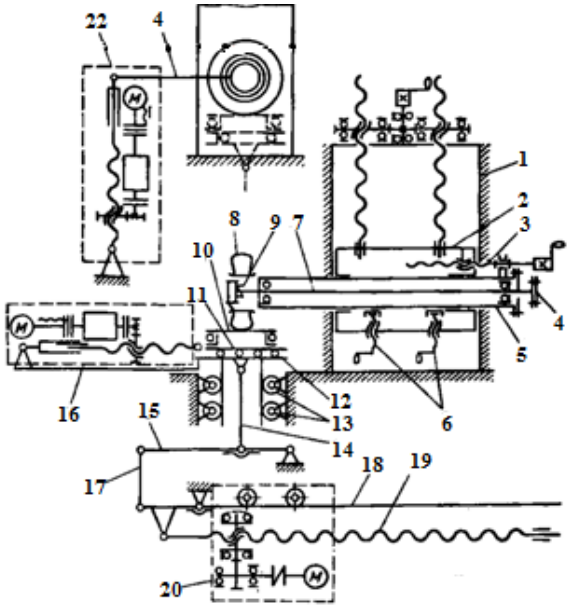


Рисунок 9 – Общий вид стенда



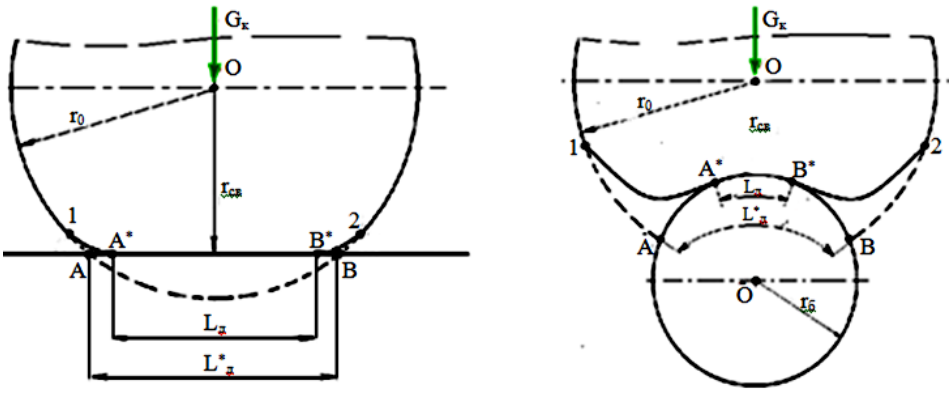
1 – несущая стойка; *2* – ползун; *3, 6* – винты, *4, 15, 18* – рычаги; *5* – толстостенная труба–консоль; *7* – вал; *8* – колесо; *9* – ступица; *10* – опорная верхняя площадка; *11* – вертикальное перемещение промежуточной плиты; *12* – промежуточная опорная плита; *13* – роликовые направляющие; *14* – шатун; *16, 22* – электромеханизмы типа АПС-4МД; *17* – тяга: *19* – ходовой винт; *20* – тележка

Рисунок 10 – Схема универсального стенда для определения жесткостных характеристик шин

Диагностику и проверку тормозных систем, оценку работоспособности амортизаторов, экспресс-диагностику углов установки колес и сопротивление качению колеса позволяют проводить роликовые стенды, основное преимущество которых – возможность реализации продолжительных по временным параметрам стабильных режимов вращения колес в установившемся режиме. Роликовый стенд Иркутского национального исследовательского технического университета для испытания шин легковых автомобилей представлен на рис. 11.

Рисунок 11 – Стенд для испытаний пневматических шин

Одним из основных недостатков стендов роликового типа является некорректное нагружение шины, т.к. образуется поверхность отрицательной кривизны на беговой дорожке протектора в области контакта шина – ролик (рис. 12, *б*). При этом, ошибка в случае определения нормы наработки до списания (ресурса) шины будет достигать 3-5-кратной, из-за чего стенды такого типа применяются только как оценочные. В конструкции барабанных стендов применяются барабаны с различным покрытием (бетон, мелкая абразивная шкурка, стальное рифление). В результате возникновения рассогласования скоростей вращения испытуемого колеса и барабана происходит проскальзывание пневматической шины по поверхности барабана. Также, процессы взаимодействия колеса с ОП при реальной эксплуатации автомобилей значительно отличаются от процесса взаимодействия колеса с роликами барабанного стенда (отсутствуют закономерности изменения тяговых усилий, определяющих характер движения автомобиля).



а) *б*)

а – на дороге; *б* – на беговом барабане;
$L_д$ – фактическая длина области контакта; $L^*_д$ – геометрическая длина области контакта

Рисунок 12 – Схема окружной деформации шины неподвижного колеса

Область контакта пневматической шины на недеформируемой ОП имеет эллипсовидную форму и вытянута в продольном направлении, а на ролике барабанного стенда – в поперечном. При этом, величина расхождения в площадях областей контакта шины с ОП и с беговым роликом будет зависеть от размеров роликов и от их числа: при контакте с двумя роликами погрешность будет значительно уменьшаться, а при контакте с одни роликом – увеличиваться. Однако роликовые стенды нашли широкое применение при исследованиях температурных полей в случае нагрева шин в оценке их долговечности. При пересчете и корректировке результатов испытаний пневматических шин на барабанном стенде необходимо учитывать влияние на нее кривизны барабана, для чего произвести корректировку внутреннего давления воздуха в шине, используя один из приведенных способов [9]:

– при обжатии шины на барабане под нагрузкой подобрать в ней такое внутреннее давление воздуха, которое сможет обеспечить прогиб шины, эквивалентный ее прогибу при нахождении на ровной ОП с установленным заводом изготовителем внутренним давлением воздуха при действии номинальной нагрузки;

– скорректировать внутреннее давление воздуха в шине с помощью коэффициента пересчета (отношение внутреннего давления воздуха в шине при испытании на барабане к внутреннему давлению воздуха при нахождении шины на ровной ОП), определенного графически, равного отношению внутреннего давления при испытании к внутреннему давлению на плоскости.

При аналитическом определении радиуса качения шины в процессе ее испытаний на барабанном стенде используется формула, в которой он представлен в виде расстояния, пройденного шиной по беговой поверхности барабана за определенное число оборотов его обода.

Некоторое снижение погрешности при испытаниях на барабанных стендах может быть достигнуто при значительном увеличении диаметра барабана относительно диаметра испытуемого колеса. Примером такого похода может служить стенд НАМИ–354 (рис. 13), позволяющий испытывать шины легковых автомобилей под различной нагрузкой и при разных скоростях качения.

Условия качения пневматических шин на стендах с беговыми барабанами отличаются от реальных условий их эксплуатации, где изменяется коэффициент сопротивления качению колес, а также условия их качения по ОП, форма деформации шин, процессы распределения удельных напряжений в области их контакта с ОП. При этом достаточно сложно сравнить результаты измерений, полученные на стендах с разным диаметром беговых барабанов.

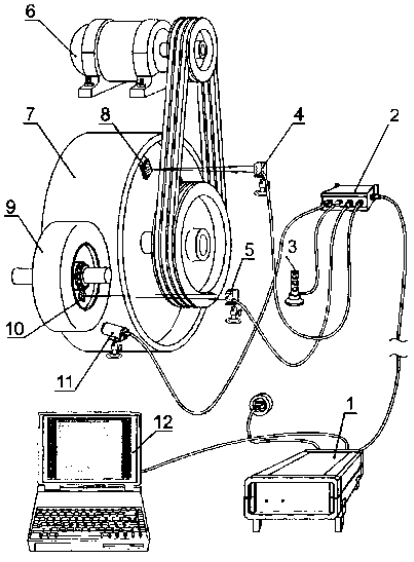
Рисунок 13 – Шиноиспытательный стенд НАМИ–354

В работе [10] автор предложил принимать в общем случае движения подобие условий качения колес по ОП и на барабанных стендах, принимая за основу принцип подобия упругих систем, т.е. зависимость деформации шин от удельной на них нагрузки. При этом, для оптимального выбора диаметра бегового барабана необходимо знать величину потерь, связанных со сжатием и нагревом воздуха в шине, величину деформации шины и потери на ее проскальзывание по беговой дорожке барабана [11].

При опоре испытуемого колеса на два беговых барабана стенда уменьшится до 30 % площадь их области контакта и на 25…35 % ее сопротивление качению. Пока нет единого мнения, как определять действующие нагрузки на трансмиссию автомобилей, определяемые их конструкцией и конструкцией стенда, а также, как определять характер распределения внешних сил, реакций и моментов, действующих на ведущие мосты, потери полезной мощности при качении колес автомобиля по барабанам стенда.

В процессе испытаний автомобиля на барабанном стенде наблюдается повышенное сопротивление качению колес ввиду больших тепловых потерь в материале шины (из-за ее значительной радиальной деформации), а также повышенное проскальзывание элементов ее протектора по поверхности барабана. А в случае создания дополнительного тормозного момента на барабанах стенда в целях имитации условий, эквивалентных реальному движению автомобиля по дороге, происходит изменение кинематических и силовых характеристик его колес.

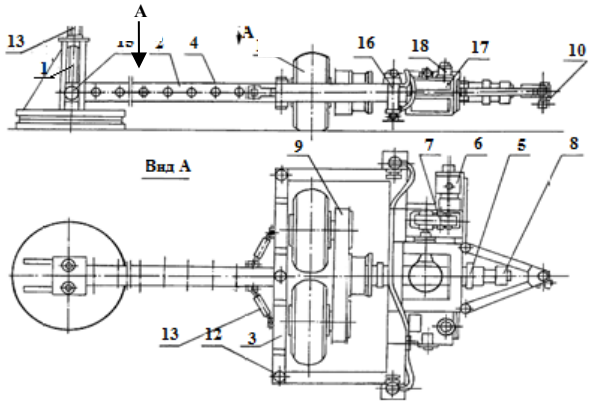
Рекомендуемая схема размещения измерительной аппаратуры на беговом барабане приведена на рис. 14 [12].



1 – регистрирующий блок; *2* – коллектор; *3* – датчик температуры окружающего воздуха; *4* – датчик оборотов барабана; *5* – датчик оборотов шины; *6* – электродвигатель; *7* – барабан; *8* – световозвращатель барабана; *9* – шина; *10* – световозвращатель шины; *11* – датчик температуры шины; *12* – компьютер

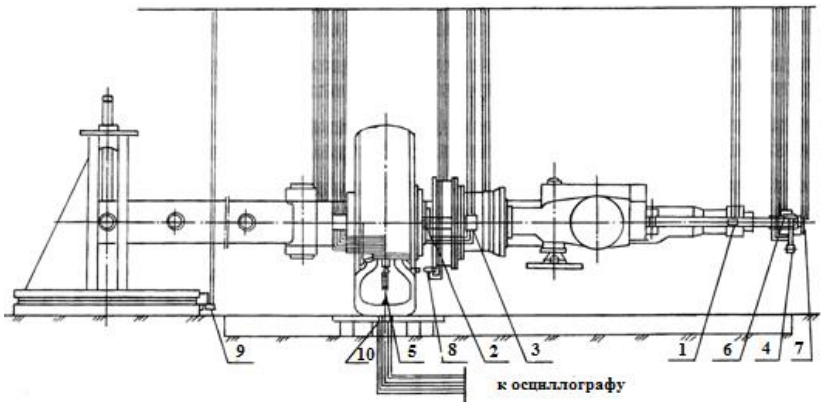
Рисунок 14 – Рекомендуемая схема размещения измерительной аппаратуры на беговом барабане

Имитационные стенды для проведения испытаний пневматических шин представляют собой, в основном, круговую площадку с диаметром, большим чем минимальный радиус поворота автомобиля (10 … 20 м) с твердым покрытием [13]. На момент разработки наиболее технически совершенным был стенд, созданный в ВИСИ, который предназначался для проведения испытаний крупногабаритных шин на всех возможных режимах их качения. Его конструкция позволяла изменять радиус и режим качения, конструкцию привода, нагрузку на колесо (рис. 15, 16). Стенд мог работать в ручном или полуавтоматическом режиме, позволяя регулировать тормозную силу, вплоть до полной остановки испытуемого колесного движителя.



1 – опорно-поворотное устройство; *2* – водило; *3* – рама; *4* – втулки; *5* – ведущий мост; *6* – электродвигатель; *7, 9* – редуктор; *8* – стопор; *10* – выходные ступицы; *11* – колеса; *12* – шарнир; *13* – винтовые тяги; *14* – винт; *15* – шарнир;*16* – гидроцилиндр; *17* – насосная станция Г 48-22Н; *18*– насосная станция

Рисунок 15 – Стенд для исследования работы двухосного движителя при криволинейном движении



1 – датчик момента редуктора; *2* – датчик момента колеса; *3* – датчик оборотов колеса; *4* – датчик силы тяги; *5* – 3-х координатный датчик деформации колеса; *5* – токосъемник *3*-х-координатного датчика; *6* – датчик вертикального поворота вектора силы тяги; *7* – датчик горизонтального поворота вектора силы тяги; *8* – силовой токосъемник привода стенда; *9* – датчик – счетчик оборотов стенда; *10* – датчик-счетчик оборотов колеса

Рисунок 16 – Схема размещения датчиков на стенде для испытаний двухосного движителя

Считается, что основным достоинством имитационных стендов является именно имитация реального режима качения колес по ОП. Однако в научных исследованиях дополнительным положительным фактором является масштаб (габариты) стенда. Так, работа с крупногабаритными шинами сразу позволила выделить процессы распределения горизонтальных и вертикальных реакций ОП и различные режимы качения колеса в области их контакта с ОП и

их изменение в соответствии с режимами качения, деформацию колеса и форму траектории проскальзывания в области контакта шины с ОП.

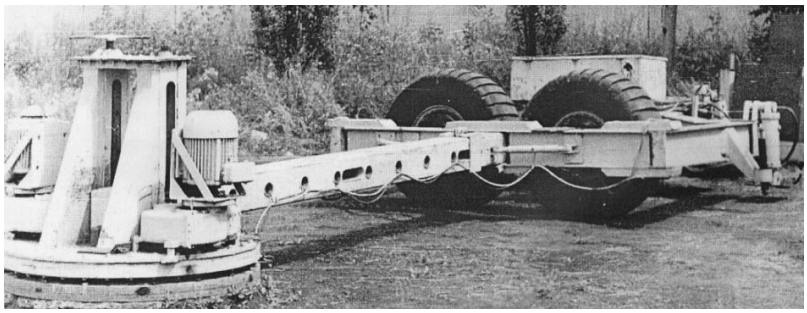


Рисунок 15 – Стенд для исследований двухосного движителя с блокированным приводом

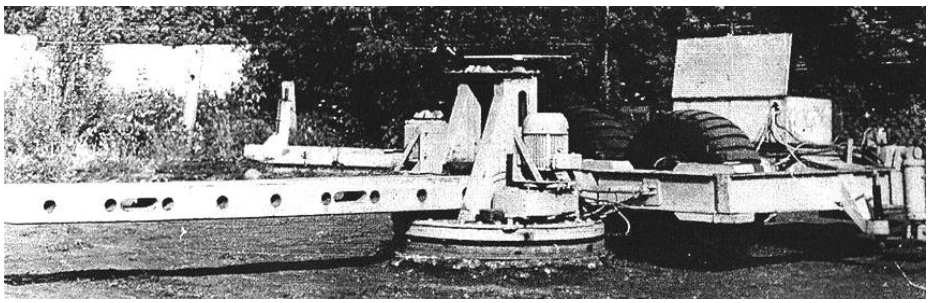
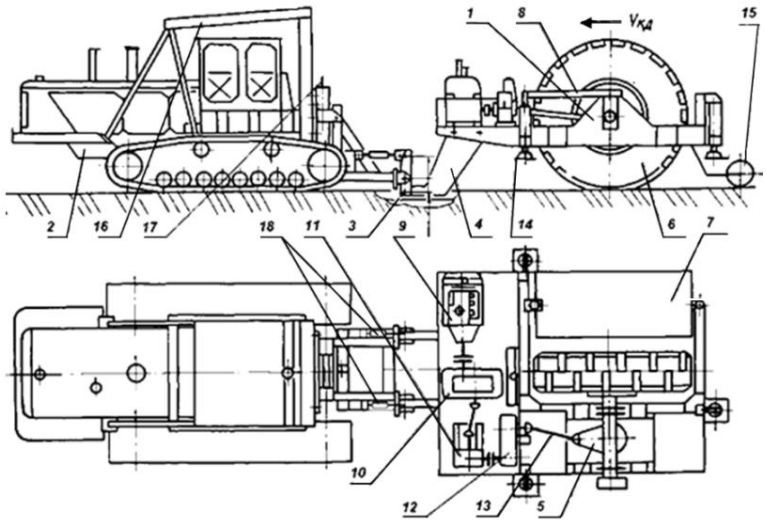


Рисунок 16 – Испытания двухосного движителя при движении по заданному радиусу

Также, в ВИСИ (г. Воронеж) для проведения исследований применялся стенд, позволявший проводить испытания одиночного колеса с крупногабаритной шиной при прямолинейном движении тормозного агрегата и в нескольких режимах ее качения, на деформируемых опорных ОП, в условиях, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации транспортных средств. Соотношения основных конструктивных параметров стенда были выбраны с учетом задач исследований и результатов анализа методической погрешности. Общий вид стенда для испытаний колесного движителя с крупногабаритной шиной представлен на рис. 17, а его схема – на рис. 18.

Рисунок 17 – Стенд для испытания одиночного колесного движителя
с крупногабаритной шиной



1 – прицепной агрегат; *2* – тормозной агрегат; *3* – рычаг; *4* – промежуточный кронштейн; *5* – ведущий мост; *6* – колесо; *7* – поворотная площадка для балласта; *8* –съемная площадка для балласта; *9* – двигатель внутреннего сгорания; 10 – вариатор; *11* – реверсивный конический редуктор; 12 – редуктор; *13* – карданная передача; *14* – гидравлический домкрат; *15* – мерное колесо; *16* – сцепное устройство; *17* – винтовые стойки

Рисунок 18 – Схема стенда для испытания одиночного колесного движителя при прямолинейном движении

Измерение динамического радиуса колеса в процессе качения в заданном режиме может осуществляться с помощью специального оборудования, смонтированного на раме, размещенной непосредственно на колесе [14, 15] (рис. 19). Измерение динамического радиуса колеса в процессе его качения является очень сложной проблемой, особенно, на высоких скоростях движения. При этом, на результаты измерений оказывают влияние температура окружающего воздуха и температура, а также давление воздуха в шине. Однако, дальномер закреплен раме стенда, и все вертикальные колебания колеса и самого стенда будут им фиксироваться, при этом, корректно определить динамический радиус колеса будет очень проблематично.

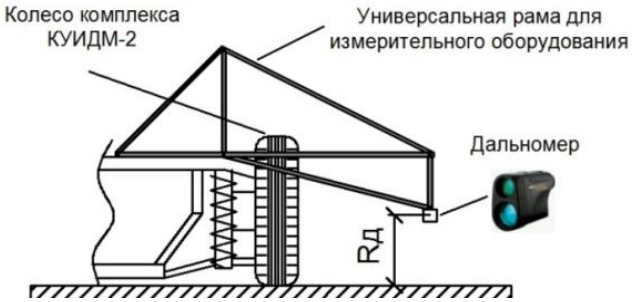
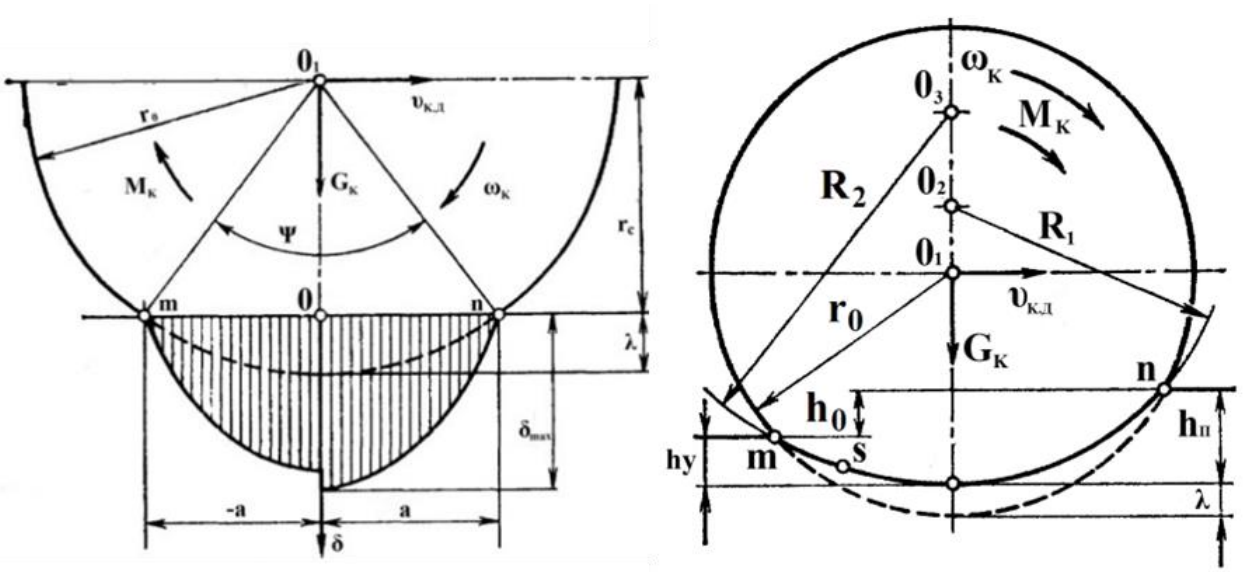


Рисунок 19 – Схема размещения оборудования для проведения измерений динамического радиуса колеса

3 Обобщение результатов исследований

При рассмотрении силового взаимодействия колеса и ОП в форме задачи классической механики, колесо возможно представить как деформируемую балку, закрепленную с одного конца и нагруженную моментом и нагрузкой на колесо. От взаимодействия колеса и ОП возникает сила тяги, двигающая колесо и автомобиль. При этом модель взаимодействия, приведенная на рис. 20, выглядит классически: в ней область контакта колеса и ОП представлена как состоящая из двух цилиндров с радиусами R_1 и R_2, что приводит к неравномерному распределению нормальных напряжений по области контакта в точке, находящейся под центром колеса.



а) *б*)

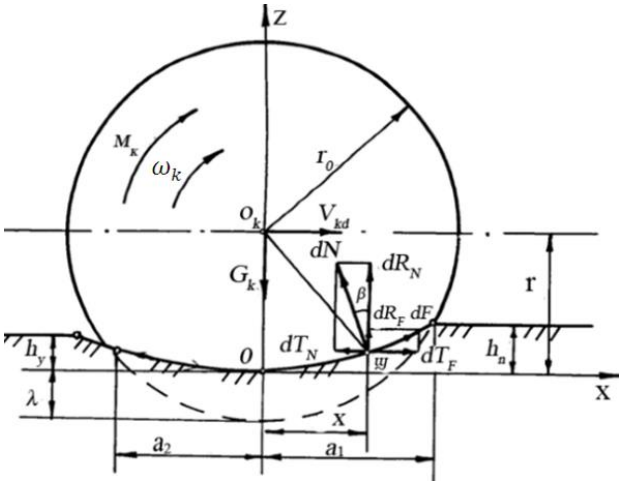
О – центральная опорная точка; O_1 – ось вращения колеса; Ψ – угол контакта колеса и опорной поверхности; $G_К$ – нагрузка на колесо; $\omega_К$ – угловая скорость колеса; *m* – точка выхода колеса из контакта с опорной поверхностью; λ – полная деформация колеса; δ_{max} – нормальное напряжение в центральной опорной точке; $M_К$ – момент на колесе; r_0 - радиус не деформированного колеса; $\upsilon_{КД}$ – линейная скорость колеса; $r_с$ – силовой радиус колеса; *a* – величина зоны загрузки и разгрузки; O_3 – центр радиуса разгрузки; $h_у$ – величина упругой деформации грунта; h_0 – величина пластической деформации грунта; *S* – точка равенства упругой деформации колеса и грунта; $h_П$ – величина полной деформации грунта; O_2 – центр радиуса загрузки; R_1 – радиус загрузки; R_2 – радиус разгрузки; *n* – точка входа колеса в контакт

Рисунок 20 – Схема сил, действующих на ведущее колесо в соответствии с теорией Н. А. Ульянова

Усовершенствуя модель взаимодействия, приведенную на рис. 20, автор, в работе [16] рассмотрел взаимодействие элементов пневматической шины с ОП как непрерывный процесс с распределением сил и контактных напряжений по области контакта (рис. 21).

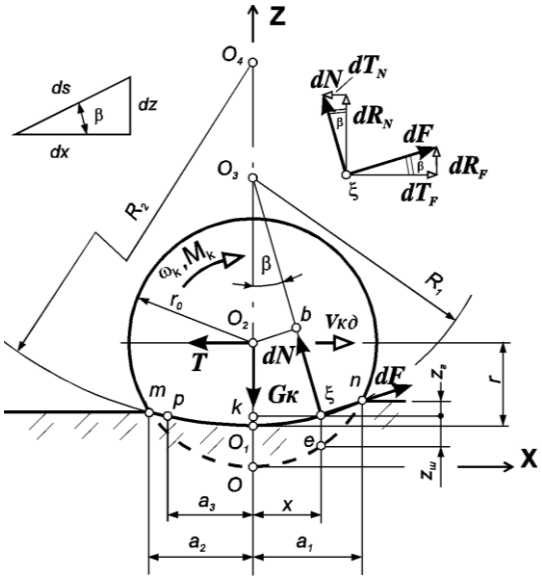
Отличительной особенностью модели взаимодействия пневматической шины и ОП, представленной на рис. 22, является более точное представление механизма деформации шины в произвольной точке в направлении по радиусу к центру колеса, что более точно учитывает процессы кинематики движения точки в контакте с ОП.

В работах [7] и [18] используется понятие динамического радиуса колеса как плеча приращения толкающей силы (он же силовой радиус). Этот параметр используется без скольжения и только при упругой деформации колеса (его закручивании). В ведущем режиме качения колеса есть проскальзывание (буксование) в области его контакта с ОП. Эластичность пневматической шины ограничена, поэтому упругое проскальзывание возможно только в ведомом режиме качения, которое в дальнейшем переходит в буксование с уменьшением фактически пройденного пути колесом. Для его характеристики используют кинематический радиус, который при 100 % буксовании будет равен нулю. Но, при этом, значение силового радиуса будет неизвестно, и его можно определить только аналитически, а деформация пневматической шины, как упругого элемента, будет скошенной (показана пунктиром на рис. 23).



G_k – вертикальная нагрузка, действующая на шину; dF – сила вертикальной реакции; a_1 – зона загрузки; a_2 – зона разгрузки; r_0 – радиус шины; B_n – ширина протектора; G_k – вертикальная нагрузка; ω_k – угловая скорость; h_n – полная деформации грунта; h_y – упругая деформация грунта; λ – значение нормальной деформации шины; V_{kd} – действительная скорость горизонтального перемещения шины; dN – нормальная сила, действующая в области контакта; dR_N – вертикальная составляющая нормальной реакции; dR_F – вертикальная составляющая элементарной силы трения dF; Dt_N – горизонтальная составляющая; M_k – крутящийся момент шины; r – силовой радиус колеса; x – координата точки ξ на горизонтальной оси X

Рисунок 21 – Схема взаимодействия пневматической шины с опорной поверхностью



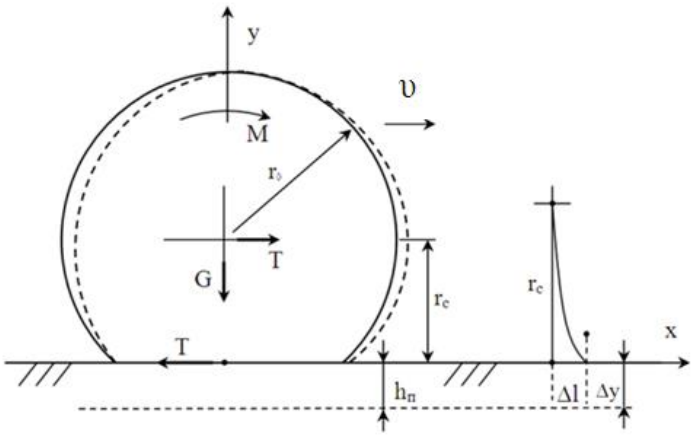
m, n – граница области контакта; r_o – радиус недеформированного; λ – нормальная деформация шины; R_1, R_2 – радиусы сопряженных цилиндров; $Z_г$ – вертикальная деформация грунта в точке ξ; a_1,a_2 – расстояние от центра колеса до границы области контакта; R- силовой радиус колеса; O_1-центральная опорная точка; O_2 – центр колеса; O_3 – центр окружности загрузки; O_4 – центр окружности загрузки; k – радиус произвольной точки ξ; O – центр недеформированного колеса; x-координата точки ξ; $Z_ш$ – вертикальная деформация шины в точке ξ; $V_{кд}$ – линейная скорость; $M_{кд}$ – крутящий момент; $G_{кд}$ –нагрузка на колесо;$\omega_к$–угловая скорость; T – сила тяжести; dS – элементарный путь точки контакта; ξ-выбранная точка; dN – вектор элементарной силы нормального давления; dF – вектор элементарной силы давления; a_1 – длина зоны загрузки; a_2 – длина зоны загрузки шины; a_2 – длина зоны загрузки грунта

Рисунок 22 – Схема взаимодействия колесного движителя с деформирующейся опорной поверхностью без учета грунтозацепов

Кинематическая схема взаимодействия колесного движителя и ОП, предложенная автором в работе [17], представляет собой следующее: точка ξ принадлежит колесу и ОП, и если скорости оси колеса и ОП равны, то проскальзывания колеса по ОП нет, а если разные, то в этой точке будет проскальзывание (юз или буксование) колеса по ОП. Пневматическая шина деформируется по радиусу и скользит по касательной (рис. 24), ОП деформируется по вертикали и горизонтали (по горизонтали со скоростью $V_{кд}$), и, рассматривая эти две скорости (ОП – колесо), можно получить закон проскальзывания и определить зоны юза и буксования колеса.

Проскальзывание в области контакта пневматической шины и ОП будет определять работоспособность колеса при его качении в ведущем режиме, а его величина будет определять степень износа протектора пневматической шины и величину буксования колеса. Но если по разнице в пройденном пути можно определить общее буксование (с деформацией шины и проскальзыванием), то величину реального скольжения (проскальзывания) в области контакта можно определить только опытным путем (проведением замеров).

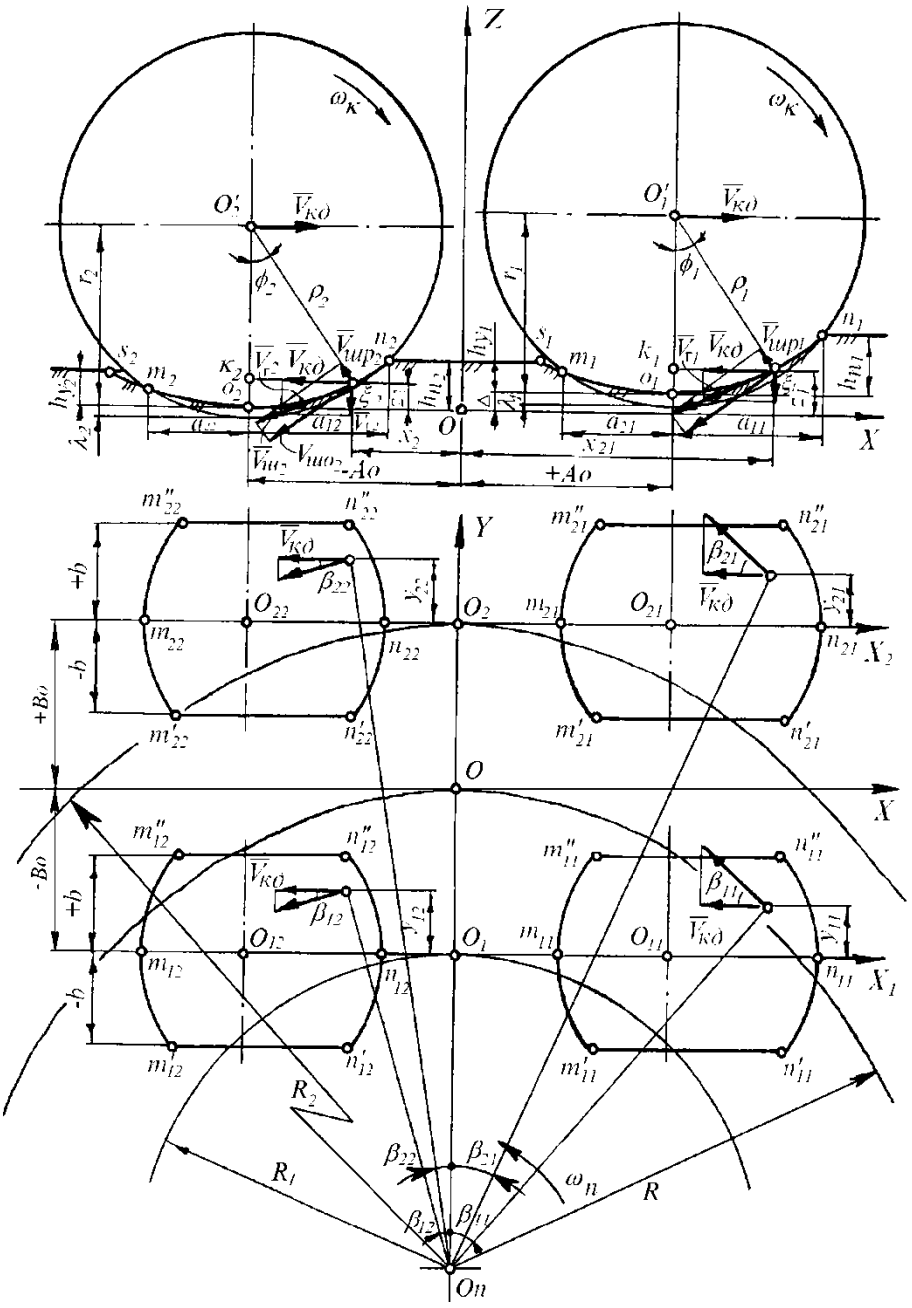
Дополнительно стенд МАДИ, схема которого приведена в работе [18], вращается, что дает еще и боковое проскальзывание, а значит и дополнительное скольжение с потерей сцепления колеса с ОП, а это, в свою очередь, дает возможность определения входа в контакт с ОП элементов протектора с большим радиусом при увеличении динамического радиуса. Также в работе [14] упоминается термин «подскакивание» колеса, который объясняется наличием микропрофиля ОП и который может проявляться вплоть до полного отрыва колеса от нее.



$h_п$ – полная деформация колеса; Δy – деформация колеса по оси y; Δl – деформация колеса по оси x; υ – скорость движения; M – момент на колесе: G – нагрузка на колесо; r_0 – радиус ненагруженного колеса; r_c – силовой радиус колеса; T – сила трения в области контакта

Рисунок 23 – Схема деформации шины при качении колеса

Поэтому учитывая сложный характер нагружения колеса (сжатие от вертикальных сил и от момента), наличие процессов проскальзывания шины по ОП, ограниченных сцеплением элементов протектора шины с ней, величина проскальзывания будет изменяться по области контакта, поэтому необходимо выделить именно эту часть области контакта как для ведомого режиме качения, так и более важного, ведущего.



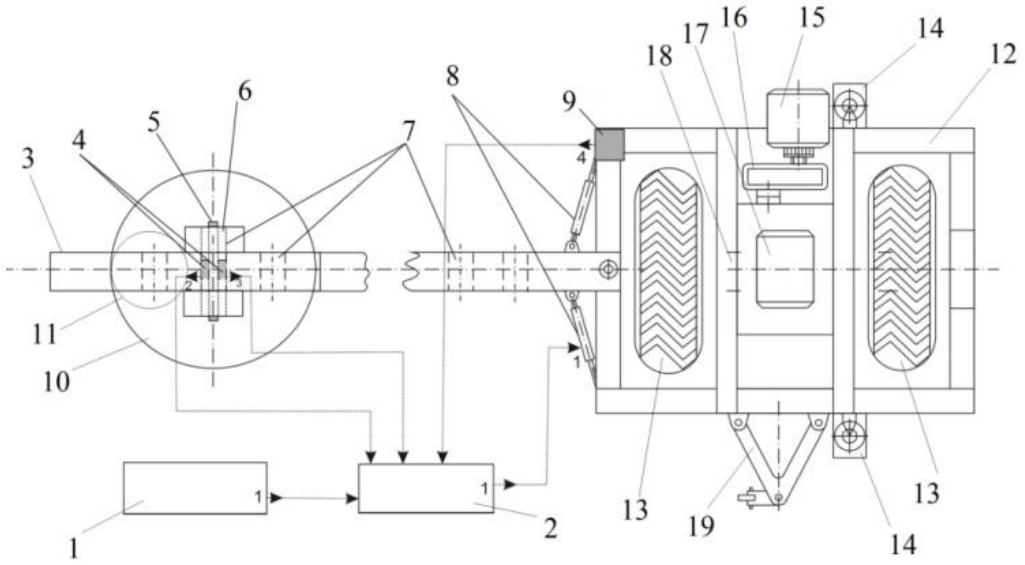
$V_{кд}$ – скорость качения движителя; $\omega_к$ – угловая скорость вращения колеса; r_1, r_2 – силовой радиус колес; φ_1, φ_2 – угол поворота колес; h_{n1}, h_{n2} – полная деформация поверхности под колесом; h_{y1}, h_{y2} – упругая деформация поверхности под колесом; a_{1i} – зона загрузки i-го колеса (длина); a_{2i} – зона разгрузки i-го колеса; A_0 – база балансира; λ_i – деформация шины в области контакта; ρ_1, ρ_2 – радиус качения произвольной точки ξ; $\nabla_{шр}$ – радиальная скорость деформации i-го колеса (радиальная составляющая); $\nabla_{ш0}$ – окружная скорость i-го колеса (окружная – касательная составляющая); $\nabla_{ши}$ – скорость точки ξ принадлежащей колесу; ∇_i – скорость точки ξ, принадлежащей опорной поверхности; x_{ij} – координаты i-й точки колес по оси X; y_{ij} –координаты i-й точки колес по оси Y; B0 – база автомобиля; b – ширина профиля шины; Δ – невосстановимая (пластическая) деформация опорной поверхности; ω_n – угловая скорость поворота; β_{ij} – угол между касательной скоростью в точке ξ и скоростью $V_{КД}$; R – радиус поворота; R_{ij} - радиус поворота каждого из колес

Рисунок 24 – Кинематика взаимодействия пневматических шин двухосного движителя

4 Формулирование научно–технического проблемного вопроса дальнейших исследований (проблемы), концепции и задачи исследования

Таким образом, основным недостатком существующих роликовых и барабанных стендов для испытаний пневматических шин является их ограниченная функциональность, обусловленная невозможностью проведения исследований влияния действующих на колеса боковых сил на тяговые показатели колесного движителя, а также на его траекторию при криволинейном движении. А приведенные выше схемы взаимодействия колесного движителя и ОП показывают сложность и многогранность этого процесса, который необходимо исследовать без введения существенных допущений и упрощений, максимально приближая испытания пневматических шин к реальным эксплуатационным условиям.

Авторы данной статьи разработали конструкцию имитационного стенда, которая позволит проводить испытания крупногабаритных шин различных моделей, установленных на одной оси при всех допустимых заводом-изготовителем шин режимах ее нагружения (рис. 25) [19]. В соответствии с методами и условиями испытаний конструкция стенда позволит изменять величину вертикальной и тормозной нагрузки на колесный движитель и корректно оценивать степень влияния внешних факторов на величину боковой силы, действующей на колеса при криволинейном движении по различным типам ОП.



1 – пульт ввода данных; *2* – блок управления; *3* – водило; *4* – датчики силы; *5* – палец; *6* – измеритель силы; *7* – втулки; *8* – механизм поворота рамы; *9* – датчик угла поворота рамы; *10* – опорно-поворотное устройство; *11* – механизм привода опорно-поворотного устройства; *12* – рама; *13* – колеса с крупногабаритными пневматическими шинами; *14* – механизм снятия вертикальной нагрузки; *15* – механизм привода движителя; *16* – редуктор; *17* – специальное загружающее устройство; *18* – ведущий мост; *19* – тензометрическая тяга

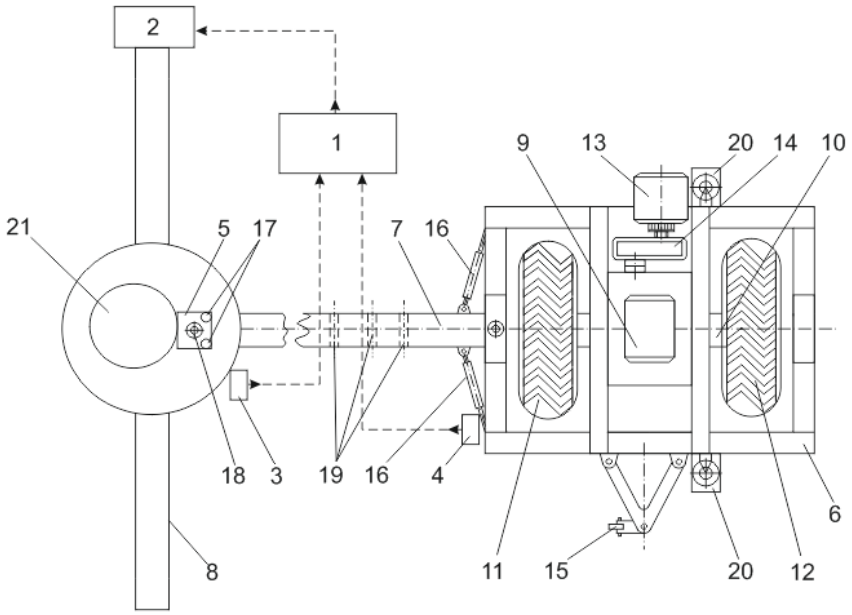
Рисунок 25 – Схема стенда для исследования влияния боковой силы на тяговые показатели колесного движителя

Такая конструкция стенда позволит определять степень влияния боковых сил на тяговые показатели колесного движителя при его криволинейном движении. Это возможно выполнить при измерении величин боковых сил в результате действия на колеса тяговой или тормозной сил, что позволит проводить испытания одноосного колесного движителя с крупногабаритными шинами различных моделей при заданных режимах нагружения по криволинейной траектории с различными радиусами движения. В процессе проведения испытаний

возможно изменять величины тяговой силы, вертикальной и тормозной нагрузки, действующих на одноосный, двухколесный колесный движитель и движитель со сдвоенными колесами, позволяя корректно и объективно оценивать влияние внешних факторов на величину боковой силы, действующей на крупногабаритные шины при их взаимодействии с различными типами ОП. В ведущем режиме качения привод колесного движителя осуществляется электродвигателем, установленным на раме стенда, который через редуктор и ведущий мост передает крутящий момент на колеса.

В ведомом режиме качения привод опорно-поворотного устройства по криволинейной траектории (по кругу) осуществляется механизмом привода опорно-поворотного устройства, представляющим собой электродвигатель с регулятором оборотов. Привод колесного движителя происходит через опорно-поворотное устройство, соединенное с рамой и водилом, при этом опорно-поворотное устройство жестко фиксируется к ОП.

Коллектив также разработал имитационный испытательный стенд с расширенными функциональными возможностями за счет дополнительного обеспечения прямолинейного движения для испытуемого одноосного колесного движителя (рис. 26) [20]. Конструкция имитационного стенда позволит осуществить перемещения опорно-поворотного устройства по прямолинейной траектории при согласовании линейных скоростей рамы и опорно-поворотного устройства с колесным движителем и проводить испытания одноосного колесного движителя с крупногабаритными шинами различных моделей при определенных режимах нагружения по прямолинейной и криволинейной траекториям. При этом опорно-поворотное устройство установлено на ОП с возможностью осуществления перемещений по прямолинейной траектории, которая перпендикулярна оси вращения.



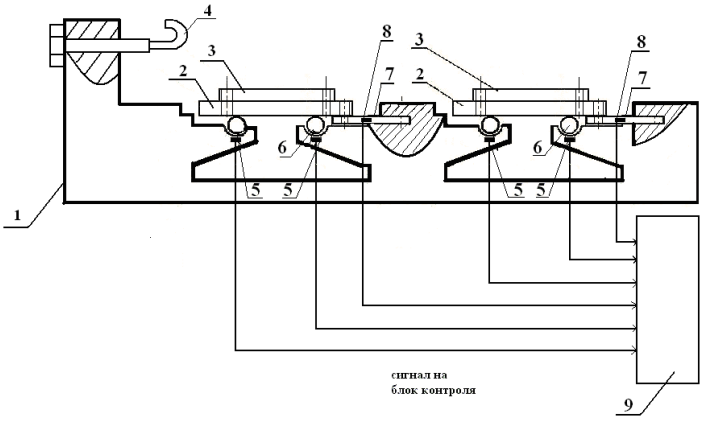
1 – блок управления; *2* – механизм привода опорно-поворотного устройства для прямолинейного движения; *3* – датчик линейной скорости опорно-поворотного устройства; *4* – датчик линейной скорости рамы; *5* – опорно-поворотное устройство; *6* – рама; *7* – водило; *8* – рельсовая опорная поверхность; *9* – специальное загружающие устройство; *10* – ведущий мост; *11, 12* – крупного габаритные пневматические шины; *13* – механизм привода движителя; *14* – редуктор; *15* – тензометрическая тяга; *16* – винтовые тяги; *17* – винты; *18* – шарниры; *19* – втулки; *20* – механизм снятия вертикальной нагрузки; *21* – механизм привода опорно-поворотного устройства для криволинейного движения

Рисунок 26 – Схема стенда для испытания одноосного колесного движителя с крупногабаритными пневматическими шинами

Конструкция имитационного стенда была дополнена блоком управления, датчиком линейной скорости опорно-поворотного устройства и датчиком линейной скорости рамы. Испытания колесного движителя возможно проводить на свободном, ведущем и ведомом режимах. В свободном и ведущем режимах привод колесного движителя осуществляется электродвигателем, размещенным на раме стенда с передачей крутящего момента через механический редуктор и ведущий мост на испытуемые колеса. В ведомом режиме привод колесного движителя осуществляется от опорно-поворотного устройства, соединенного с рамой и водилом.

В процессе испытаний есть возможность изменения величин вертикальных и тормозных нагрузок, действующих на колесный движитель, позволяющая объективно оценивать степень влияния внешних факторов на тяговые показатели колесного движителя при его взаимодействии с различными типами ОП при прямолинейном и криволинейном движении.

Для проведения натурных тяговых испытаний колесных транспортных средств с имитацией различных ОП, имеющих неодинаковые коэффициенты скольжения, был разработан стенд, показанный на рис. 27, 28 [21]. Стенд позволяет измерять силу тяги, развиваемую колесным движителем, величину крутящего момента на ведущих колесах, а также величину горизонтальных и вертикальных реакций ОП, действующих на каждое из ведущих колес. При этом разборка агрегатов привода колесного движителя не требуется, и существует возможность контроля измеряемых величин с высокой степенью точности при имитациии деформируемых и недеформируемых ОП сменными имитаторами с различными коэффициентами сцепления, с применением внешней системы контроля тяговых показателей, которая размещена на элементах стенда.



1 – рама; *2* – опорные площадки по числу ведущих колес землеройно-транспортной машины; *3* – сменные имитаторы опорной поверхности; *4* – стопорное устройство; *5* – датчики опорных реакций; *6* – опорные элементы; *7* – упругие элементы; *8* – датчики горизонтальных реакций; *9* – блок контроля параметров испытаний

Рисунок 27 – Стенд для проведения тяговых испытаний колесных землеройно-транспортных машин

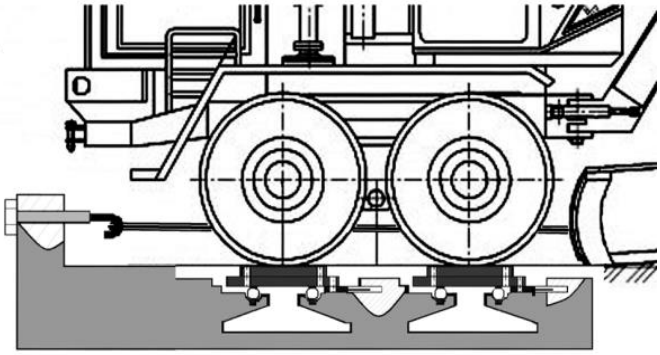


Рисунок 28 – Размещение транспортного средства на стенде

Таким образом, имитационные стенды являются наиболее приемлемыми и перспективными для проведения испытаний пневматических шин любой размерности в связи со сложным процессом взаимодействия колесного движителя и ОП с возможностью создания естественной неблагоприятной для движения дорожной обстановки при воздействии на них низких и высоких температур окружающего воздуха и других природно-климатических особенностей региона проведения испытаний, существенно влияющих на характер их качения по ОП. В качестве приоритетных направлений дальнейшего развития и усовершенствования имитационных стендов для испытаний пневматических шин можно выделить: создание стендов с возможностью проведения испытаний на всех режимах качения пневматических шин и всех типах ОП с различной нагрузкой на колесный движитель.

Список литературы

1 Тютин В.А., Вербас В.В., Смирнов А.Г., Варивода В.И. Внедорожные шины мировых лидеров / В.А. Тютин, В.В. Вербас, А.Г. Смирнов, В.И. Варивода. // УкО ИМА – Пресс, 1999. – 304 с.

2 ГОСТ Р 51893–2024. Шины пневматические. Общие технические требования безопасности. М.: Российский институт стандартизации. – 2024. – 8 с.

3 ГОСТ Р 52900–2007. Шины пневматические для легковых автомобилей и прицепов к ним. Технические условия. М.: Стандартинформ. – 2008. – 23 с.

4 ГОСТ 28169–89. Шины пневматические. Методы определения износостойкости шин при дорожных испытаниях. М.: Государственный стандарт СССР. – 1990 (ограничение по сроку действия снято). – 12 с.

5 Чудаков Е.А. Качение автомобильного колеса. Выпуск 9. Автомобильная лаборатория института машиноведения / Е.А. Чудаков. – М.: Издательство академии наук СССР, 1948. – 51 с.

6 Чудаков Е.А. Теория автомобиля. Избранные труды, том I / Е.А. Чудаков. – М.: Издательство академии наук СССР, 1961. – 104с.

7 Роженцев В. С., Прокопенко Ю. Д., и др. Автоматизированная система управления стендом для динамических испытаний пневматических шин // Разработки. Контрольно–измерительные системы. СТА. 2009. – С. 36–43. [Электронный ресурс]– http://www.cta.ru. (дата обращения 19.03.2025.)

8 Балабин И.В., Куров Б.А., Лаптев С.А. Испытание автомобилей / И.В. Балабин, Б.А. Куров. – М.: Машиностроение. – 1988. – 192 с.

9 ГОСТ Р ИСО 28580:2018 Шины легковых и грузовых автомобилей и автобусов. Методы измерения сопротивления качению. Одноточечное испытание и корреляция результатов измерения. М.: Госстандарт России. – 2018. – 40 с.

10 Серов, А.В. Современные станции диагностики автомобилей /А.В. Серов. – М.: НИИавтопром, 1971. – 40 с.

11 Балабина Т.А., Карелина М.Ю., Мамаев А.Н. Теоретические основы испытаний шин и трехосных полноприводных автомобилей на барабанных стендах / Т.А. Балабина, М.Ю. Карелина, А.Н. Мамаев. – М.: МАДИ.– 2020. – 76 с.

12 ГОСТ Р 52102 –2003. Шины пневматические. Определение сопротивления качению методом выбега. М.: Госстандарт России. – 2003. – 12 с.

13 Василенко А.В. Методика расчета тяговых качеств колесного движителя с крупногабаритными пневматическими шинами землеройно-транспортных машин. Дисс... канд. техн. наук: 05.05.04 / А.В. Василенко. – Воронеж, 2000. – 227 с.

14 Желтышев, А.В. Определение радиуса качения колеса автомобиля при движении по неровной дороге / А.В. Желтышев, А.А. Енаев // Естественные и инженерные науки – развитию регионов: Материалы межрегиональной научно-технической конференции. – Братск: БрГТУ, 2004. – 188 с.

15 Штефан Ю. В., Васильев Ю. Э., Беляков А. Б., Панарин Г. А. Модернизация кольцевого стенда «КУИДМ-2» для расширения спектра измеряемых параметров и ускорения испытаний // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013 – №6 (19). С. 1-16 Режим -доступа: http://naukovedenie.ru/PDF/108TVN613.pdf. (дата обращения 19.03.2025)

16 Гильмутдинов В.И. Математическая модель и методика расчета тяговых качеств колесных движителей землеройно–транспортных машин. Дисс... канд. техн. наук: 05.05.04 / В.И. Гильмутдинов. – Воронеж, 1988. – 210 с.

17 Гудков В.В. Разработка методики расчета ходимости пневматических шин землеройно-транспортных машин: Автореферат дисс... канд. техн. наук: 05.05.04 / В.В. Гудков. – Воронеж, 1997. – 20 с.

18 Васильев Ю.Э., Братищев И.С., Столетов И.О. Проведение экспериментальных работ по замеру динамического радиуса колеса при различных режимах вращения стенда Интернет – журнал «Науковедение» Выпуск 1, январь–февраль 2014 ИГУПИТ [Электронный ресурс], дата обращения 01.03.2025. http:// publ.naukovedenie.ru.

19 Патент № 2744344, МПК G01M 17/02 (2006.01). Стенд для исследования влияния боковой силы на тяговые качества одноосного колесного движителя / В.В. Гудков, А.А. Колтаков, П.А. Сокол, Р.В. Могутнов, А.В. Василенко; заявитель и патентообладатель ВУНЦ ВВС «ВВА». – № 2020130596; заявл. 16.09.2020; опубл. 05.03.2021, Бюл. № 7. – 7 с.

20 Патент № 2744276, МПК G01M 17/02 (2006.01). Стенд для испытания одноосного колесного движителя с крупногабаритными пневматическими шинами / А.В. Василенко, А.А. Колтаков, П.А. Сокол, Р.В. Могутнов, С.Д. Винокуров; заявитель и патентообладатель ВУНЦ ВВС «ВВА». – № 2020128605; заявл. 27.08.2020; опубл. 04.03. 2021, Бюл. № 7. – 7 с.

21 Патент № 2591541, МПК G01L5/13 (2006.01). Стенд для проведения тяговых испытаний колесных землеройно–транспортных машин / В.В. Гудков, П.А. Сокол; заявитель и патентообладатель ВУНЦ ВВС «ВВА». – № 2014151331; заявл. 17.12.2014; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20. – 5 с.

References

1 Tyutin V.A., Verbas V.V., Smirnov A.G., Varivoda V.I. Off-road tires of world leaders / V.A. Tyutin, V.V. Verbas, A.G. Smirnov, V.I. Varivoda. –UKO IMA – Press, 1999 – 304 p.

2 GOST R 51893-2024. The tires are pneumatic. General technical safety requirements. Moscow: Russian Institute of Standardization. - 2024. – 8 p.

3 GOST R 52900-2007. Pneumatic tires for passenger cars and trailers. Technical specifications. Moscow: Standartinform, 2008, 23 p.

4 GOST 28169-89. The tires are pneumatic. Methods for determining tire wear resistance during road tests. Moscow: USSR State Standard, 1990 (expiration date removed). – 12 p .

5 Chudakov E.A. Rolling of an automobile wheel. Issue 9. Automobile Laboratory of the Institute of Machine Science / E.A. Chudakov. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1948 – 51s.

6 Chudakov E.A. Theory of the car. Selected Works, volume I / E.A. Chudakov. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1961 – 104 p.

7 Rozhentsev V. S., Prokopenko Yu. D., and others. Automated control system for dynamic testing of pneumatic tires // Developments. Control and measuring systems. STA. 2009. – pp. 36-43. [electronic resource]. − Access mode: – http://www.cta.ru . (accessed 19.03.2025).

8 Balabin I.V., Kurov B.A., Laptev S.A. Automobile testing / I.V. Balabin, B.A. Kurov. – M.: Mashinostroenie.-1988.-192 p.

9 GOST R ISO 28580:2018 Tires for passenger cars, trucks and buses. Methods for measuring rolling resistance. Single-point testing and correlation of measurement results. Moscow: Gosstandart of Russia. - 2018. 40 40 p.

10 Serov, A.V. Modern car diagnostic stations / A.V. Serov. Moscow: NIIavtoprom, 1971. 40 p.

11 Balabina T.A., Karelina M.Yu., Mamaev A.N. Theoretical foundations of testing tires and three-axle four-wheel drive vehicles on drum stands / T.A.Balabina, M.Yu.Karelina, A.N. Mamaev. – M.: MADI.- 2020. – 76 p.

12 GOST R 52102 -2003. The tires are pneumatic. Determination of rolling resistance by the run-out method. Moscow: Gosstandart of Russia. - 2003. – 12 p.

13 Vasilenko A.V. Methodology for calculating the traction qualities of a wheeled propulsion system with large-sized pneumatic tires of earthmoving and transport vehicles. Diss... Candidate of Technical Sciences: 05.05.04 / A.V. Vasilenko. –Voronezh, 2000. –227s.

14 Zheltyshev, A.V. Determination of the rolling radius of a car wheel when driving on an uneven road / A.V. Zheltyshev, A.A. Enaev // Natural and engineering sciences for the development of regions: Proceedings of the interregional scientific and technical conference. Bratsk: BrGTU, 2004. 188 p.

15 Stefan Yu. V., Vasiliev Yu. E., Belyakov A. B., Panarin G. A. Modernization of the KUIDM-2 ring stand to expand the range of measured parameters and accelerate testing // Online magazine "Naukovedenie". 2013 No. 6 (19) [Electronic resource]. Moscow, 2013. – Access mode: http://naukovedenie.ru/PDF/108TVN613.pdf . (accessed 19.03.2025).

16 Gilmutdinov V.I. Mathematical model and methodology for calculating the traction qualities of wheeled propellers of earthmoving and transport vehicles. Diss... Candidate of Technical Sciences: 05.05.04 / V.I. Gilmutdinov. – Voronezh, 1988. –210 p.

17 Gudkov V.V. Development of a methodology for calculating the walking capacity of pneumatic tires of earthmoving and transport vehicles: Abstract of the dissertation... Candidate of Technical Sciences: 05.05.04 / V.V. Gudkov. – Voronezh, 1997. – 20 p.

18 Vasiliev Yu.E., Bratishchev I.S., Stoletov I.O. Carrying out experimental work on measuring the dynamic radius of the wheel under various modes of rotation of the stand Online journal "Naukovedenie" Issue 1, January–February 2014 IGUPIT [Electronic resource]. Access mode: − http:// publ.naukovedenie.ru . (accessed 03/01/2025).

19 Patent No. 2744344, IPC G01M 17/02 (2006.01). A stand for studying the effect of lateral force on the traction qualities of a single-axle wheeled propulsion system / V.V. Gudkov, A.A. Koltakov, P.A. Sokol, R.V. Mogutnov, A.V. Vasilenko; applicant and patent holder of the VUNTS VVS "VVA". – No. 2020130596; application dated 09/16/2020; published on 03/05/2021, Byul. no. 7. – 7 p.

20 Patent No. 2744276, IPC G01M 17/02 (2006.01). A.V. Vasilenko, A.A. Koltakov, P.A. Sokol, R.V. Mogutnov, S.D. Vinokurov, test bench for a single-axle wheeled propulsion system with oversized pneumatic tires; applicant and patent holder of the VUNTS VVS "VVA". – No. 2020128605; application dated 08/27/2020; published on 03/04/2021, Byul. no. 7. – 7 p.

21 Patent No. 2591541, IPC G01L5/13 (2006.01). Stand for traction tests of wheeled earthmoving and transport vehicles / V.V. Gudkov, P.A. Sokol; applicant and patent holder of the VUNTS VVS "VVA". – No. 2014151331; application no. 17.12.2014; publ. 20.07.2016, Bul. no. 20. – 5 p.

© Гудков В. В., Сокол П. А., 2025