

УДК 629.33

DOI:10.46960/62045_2021_4_4

К.Е. Бяков, В.В. Иваненков, В.Б. Холоденко, О.И. Чудаков
ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ СОВРЕМЕННЫХ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКИХ
СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Представлен обзор и анализ основных конструктивных решений современных динамометрических стендов: схем передачи усилия, применяемых типов нагрузочных устройств и особенностей контрольно-измерительного комплекса. Рассмотрены достоинства и недостатки различных схем, рекомендованы сферы применения. Актуальность исследования определена тем, что в настоящее время динамометрические стенды широко применяются для проведения различных видов испытаний колесных транспортных средств. При этом в лабораторных условиях моделируется процесс движения транспортного средства в различных эксплуатационных режимах. В зависимости от конструктивных особенностей стенда и его рабочих характеристик он может применяться в разных по назначению, видам и этапам разработки испытаниях: исследовательских, контрольных, сертификационных и т.д. с целью определения тягово-скоростных, топливно-экономичных и экологических эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: динамометрический стенд, беговые барабаны, нагрузочное устройство, крутящий момент, мощность, транспортное средство, испытания.

Введение

В настоящее время выпуск нового образца колесного транспортного средства (ТС) или его модернизацию невозможно представить без всесторонних испытаний его заявленных характеристик, а также без проверки его на соответствие нормам и требованиям множества стандартов. Для проведения испытаний требуется специальное оборудование, применение которого позволяет получить достаточно точные характеристики транспортного колесного средства [1]. Особенностью стендовых испытаний автомобильной техники на динамометрических стендах является широкая возможность управления сочетаниями тяговых нагрузок, скоростных режимов и условий внешнего воздействия [2]. При этом установившийся режим может быть реализован длительное время, что позволяет обеспечить выполнение всех необходимых измерений. Еще одним достоинством стендовых испытаний является независимость от сезонно-климатических условий. Основным ограничением проводимых стендовых испытаний является недостаточная достоверность воспроизведения реальных условий эксплуатации. Испытательные стенды никогда точно не отражают условия эксплуатации реального автомобиля. При их проведении приходится учитывать заранее установленные отклонения от реальных условий. Например, это касается параметров взаимодействия колес с опорной поверхностью (ОП) и способа крепления автомобиля на стенде, который нарушает работу подвески [3].

Целью данной работы является изучение динамометрических стендов, их типов, принципа работы и ситуаций их применения, а также обзор их современных конструкций.

Назначение и типы динамометрических стендов

Область применения динамометрических стендов в современной промышленности достаточно велика. Самым распространенным вариантом использования, пожалуй, является установка их на специальных станциях для производства замеров мощности после модерни-

зации или ремонта различных транспортных средств или при проведении профилактического и периодического обслуживания. Широко применяют подобные стенды и в научно-исследовательской сфере: замеры вновь разработанных или модернизированных силовых установок, установленных в автомобилях, контроль и оптимизация экологических параметров (выбросов) при различных ездовых циклах, оптимизация топливной эффективности, проведение ресурсных испытаний предсерийных и опытных образцов колесной техники и т.д.

Любой динамометрический стенд включает в себя устройство нагружения, динамометр, устройства регистрации показателей, а также обслуживающие системы (система охлаждения, электропитания и т.п.). Классификация динамометрических стендов по способу передачи усилия и по типу нагрузочного устройства приведена на рис. 1 [4].

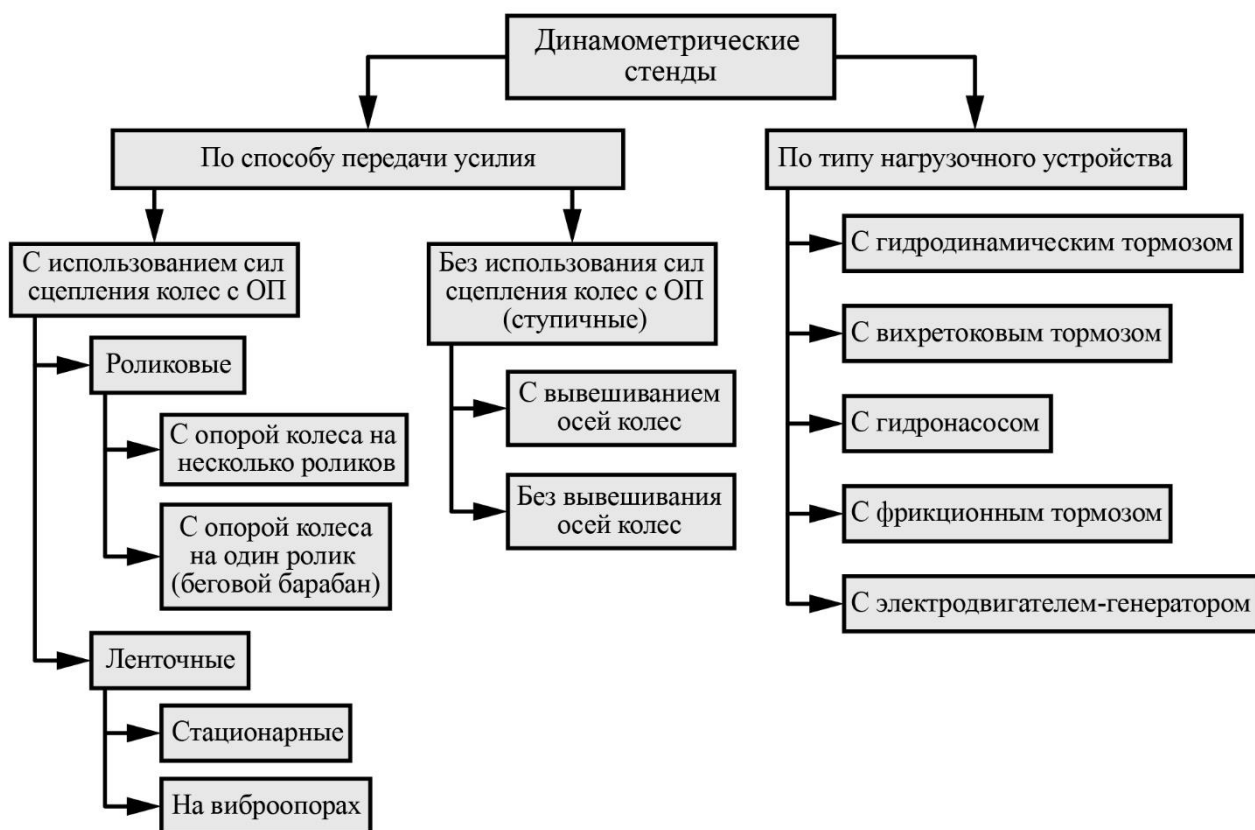


Рис. 1. Классификация динамометрических стендов

Основное назначение динамометрических стендов – имитация нагрузок на автомобиль во всем диапазоне его тяговых и скоростных режимов. Для этого все они оснащаются нагрузочными устройствами, и от того, насколько правильно будет подобрано тормозное устройство, зависит объем проводимых испытаний и класс автомобилей. На рис. 2 приведены основные типы нагрузочных устройств [3].

Гидродинамический тормоз (рис. 2, а) представляет из себя статор из алюминиевого сплава, внутри которого вращается ротор, создающий движение воды. В зависимости от количества подаваемой воды и объема ее выхода меняется нагрузка, создаваемая ротором. Вода при этом нагревается, при этом важно избежать накипи внутри нагрузочного устройства. Объем подаваемой воды должен быть достаточно большим, а температура – низкой, чтобы избежать кавитацию и поломку насоса. Использование такого нагрузочного устройства целесообразно при наличии в помещении воды и канализации, а также отсутствия отрицательных температур воздуха. Нагрузка на стенды с гидронасосом (рис. 2, б) выполняется с помощью гидравлического масляного насоса. Данные стенды более устойчивы к перегреву, чем стенды

с водяными насосами. Фрикционный тормоз (рис. 2, в) чаще всего представляет собой обычные дисковые или барабанные тормоза от грузового автомобиля. Колодочные тормоза характеризуются нестабильной величиной крутящего момента ввиду изменчивости условия трения на различных нагрузочно-скоростных режимах, а также склонностью к перегреву. В случае необходимости или особых условий использования изготавливаются специальные фрикционные муфты, пример которой представлен на рис. 2, в. Фрикционные тормоза практически не применяются в современных стендах.

Вихретоковый (индукторный) тормоз (рис. 2, г) представляет из себя два больших тормозных диска и несколько электромагнитов между ними. В зависимости от подаваемого тока на катушки изменяется сопротивление вращению диска. Охлаждение диска обычно воздушное, за счет вентилируемых перегородок внутри него. Напряжение питания стенда находится в диапазоне 220-380 вольт.

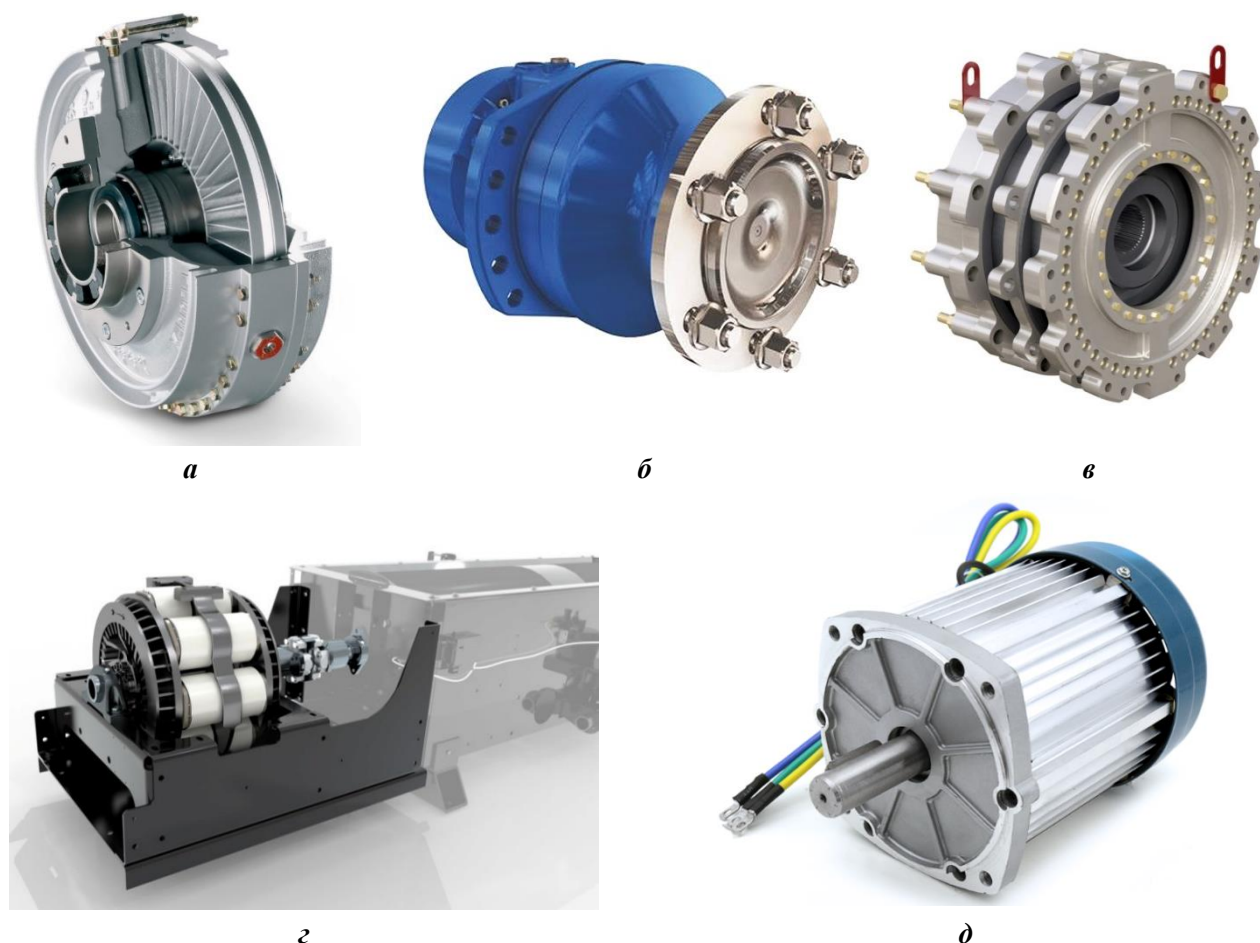


Рис. 2. Нагрузочные устройства:

a – гидродинамический тормоз; *б* – гидронасос; *в* – фрикционный тормоз;
г – вихретоковый тормоз; *д* – электродвигатель-генератор

Роль нагрузочного устройства для мощного стенда с электродвигателем-генератором (рис. 2, д) выполняют электрические машины переменного или постоянного тока. Синхронные и асинхронные электрические машины переменного тока с фазовым ротором имеют аналогичную между собой конструкцию, но различаются схемами коммутации. Преимущества асинхронных тормозных устройств – простота конструкции, автоматический пе-

реход из двигательного режима в тормозной при преодолении синхронной частоты вращения ротора. Основные недостатки асинхронных машин – относительно узкие диапазоны регулирования по частоте вращения как в двигательном, так и в тормозном режиме. Это накладывает определенные ограничения на эксплуатацию таких стендов без редукторов с изменяемым передаточным соотношением. Синхронные машины, при прочих равных, в тормозном режиме имеют вдвое больший рабочий диапазон, но при этом обладают практически вдвое меньшим тормозным моментом [5]. Электрические машины постоянного тока отличаются относительно высокой стоимостью и меньшим ресурсом, однако имеют хорошую плавность хода и широкие пределы регулирования. Эти машины находят широкое применение для исследовательских целей.

Наиболее распространенными являются стенды барабанного и ленточного типов [2]. На барабан или ленту устанавливается колесный ход ТС. Возможные схемы установки показаны на рис. 3.

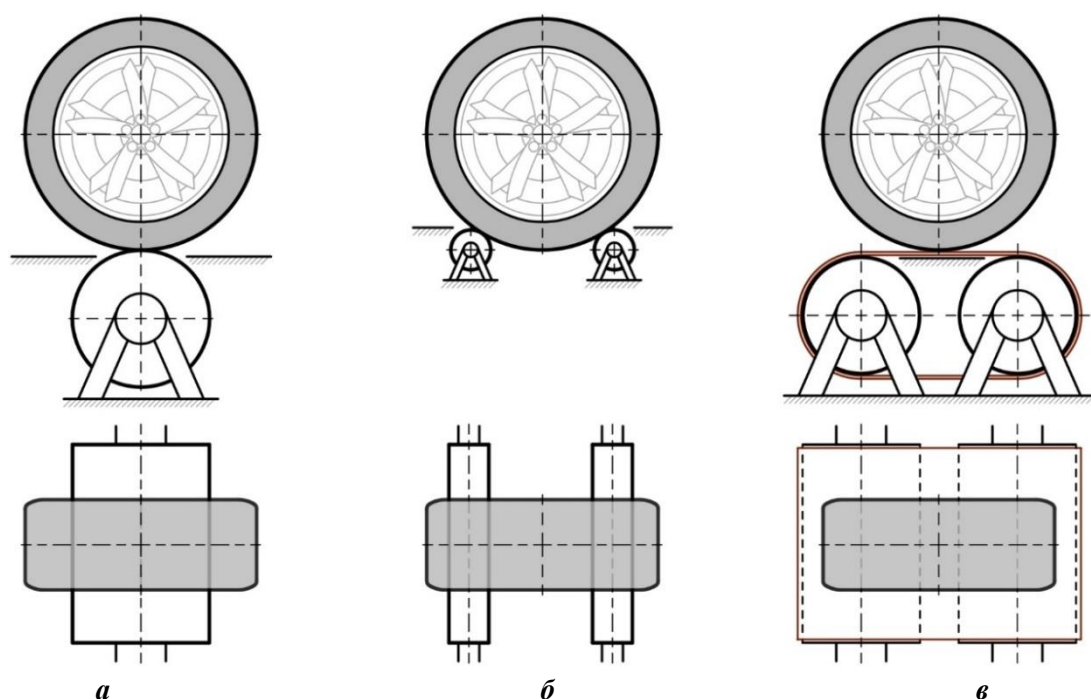


Рис. 3. Схемы передачи усилия:

а – однобарабанная; *б* – двухроликовая; *в* – ленточная

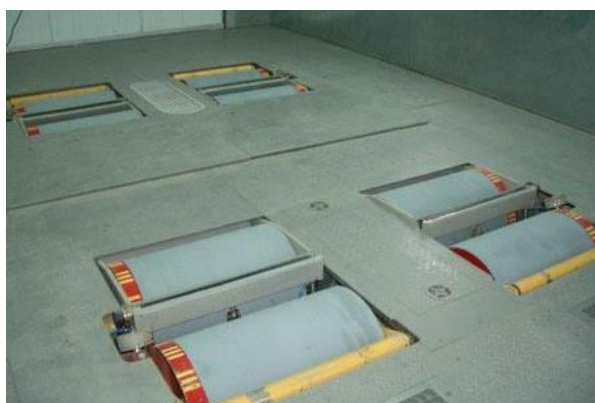
Стенды с опорой колеса на один беговой барабан (рис. 3, а). Такая схема содержит меньшее количество подвижных элементов, а также характеризуется сниженными потерями в пятне контакта шины с барабаном [6]. Большая инерционная мощность такого конструктивного решения является одновременно его преимуществом и недостатком (это зависит от режимных параметров выполняемых испытаний).

Стенды с опорой колеса на два ролика (рис. 3, б) относительно рассмотренных ранее имеют меньшую металлоемкость и характеризуются большой устойчивостью испытуемого автомобиля. Однако режим испытаний на таком стенде сопровождается повышенной деформацией шин (из-за того, что за один оборот колесо деформируется два раза), что приводит к их более интенсивному нагреву и износу.

Ленточные стенды (рис. 3, в) представляют собой четыре (по числу колес автомобиля) одинаковые секции, каждая из которых состоит из двух роликов и бесконечной прорезиненной ленты, верхняя ветвь которой опирается на поддерживающую площадку. Ленточные

стенды создают более приближенные к дороге условия качения и торможения колес автомобиля, чем роликовые и барабанные.

Наибольшее распространение в данном сегменте оборудования получили роликовые мощностные стенды (рис. 4). Основные технические характеристики стендов приведены в табл. 1 [7].



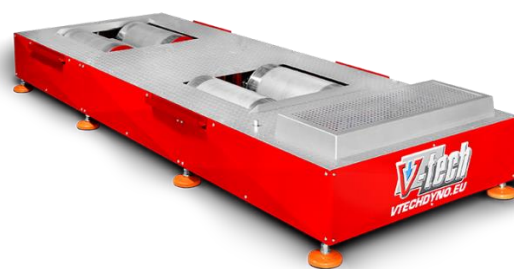
а



б



в



г

Рис. 4. Роликовые динамометрические стенды:

а – МЕТА СДМ 2-3500.200 (Россия); б – DYNOMAX 4000 AWD BR (Эстония);

в – МАНА MSR 1000 (Германия); г – V-Tech VT-2/B1 (Польша)

Таблица 1.

Технические характеристики динамометрических стендов компании Taylor Dynamometer

Параметр	МЕТА СДМ 2-3500.200	DYNOMAX 4000 AWD BR	МАНА MSR 1000	V-Tech VT-2/ B1
Габариты, мм	8320×4800	5500×3800	4400×5400	2400×3300
Диаметр роликов, мм	500	250	762	250
Максимальная нагрузка на ось, кг	200	3000	2400	3000
Количество ведущих осей	2	2	2	1
Тип нагрузочного устройства	Электро-двигатель	Вихретоковый тормоз	Электро-двигатель	Вихретоковый тормоз
Максимальная скорость испытуемого ТС, км/ч	200	250	320	300
Точность изменения мощности	± 1 %	± 2 %	± 2 %	± 1 %

Ленточные стенды отличаются более сложной конструкцией, однако позволяют наиболее точно имитировать взаимодействие колесного движителя с опорной поверхностью. Ленточный узел состоит из двух роликов, соединенных стальным ремнем. Передний ролик оснащен встроенным приводом, задний ролик используется для натяжения и стабилизации ленты. Примеры ленточных стендов различных производителей представлены на рис. 5.

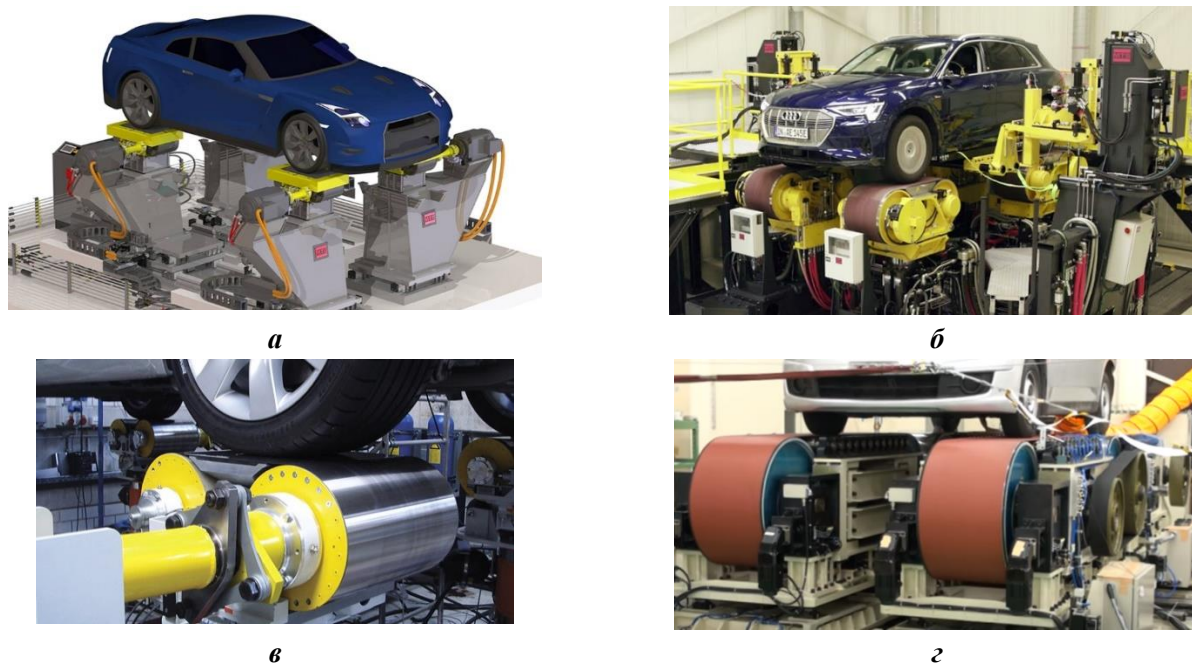


Рис. 5. Динамометрические ленточные стенды:
а – MTS Systems (США); *б* – MTS Systems совместно с FKFS (Германия);
в – AIP Automotive (Германия); *г* – Kokusai (Япония)

Особый интерес представляет стенд, разработанный компанией MTS Systems совместно с Штутгартским научно-исследовательским институтом автомобильной техники и двигателей (FKFS), представленный на рис. 5, *б*. Каждая ленточная опора установлена на гидравлическую стойку, которые позволяют создать вертикальные перемещения шин ТС величиной до ± 75 мм при ускорениях до 9 g и частотах до 30 Гц. Кроме того, ленточные опоры могут поворачиваться вокруг вертикальной оси на угол до 15° для имитации криволинейного движения.

Особенностью динамометрических стендов с использованием сил сцепления колес с ОП является необходимость фиксации ТС от смещения. Схема фиксации (рис. 6) варьируется в зависимости от типа привода ТС (моноприводный или полноприводный образец) и объектов фиксации на самом образце (крепежные отверстия, привертные проушины и т.д.) [8].

Красная линия и красные точки показывают точки фиксации и метод надлежащего крепления автомобиля к фундаменту с помощью анкерных болтов, ремней и храповиков натяжителей ремней. Пунктирная синяя линия – другой возможный способ крепления транспортного средства (фиксация). Зеленая линия – дополнительная точка фиксации для лучшей устойчивости автомобиля. Ремень должен быть привязан, и зафиксирован для предотвращения движения автомобиля на роликах во время измерения. Также необходимо помнить, что слишком сильное затягивание ремня может привести к увеличению потерь мощности во время замеров.

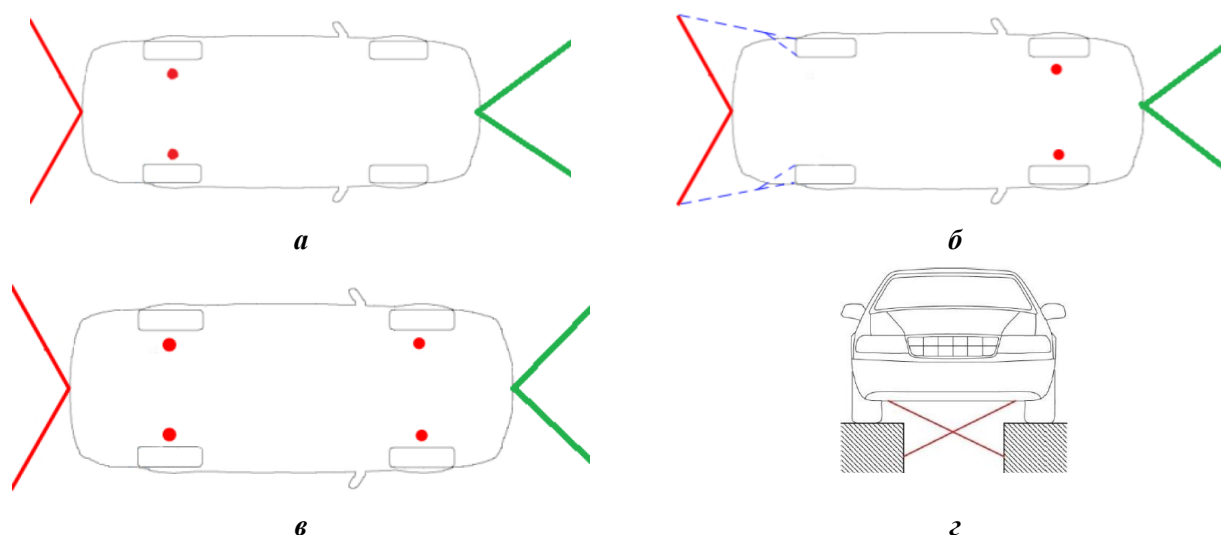


Рис. 6. Варианты креплений образцов колесной техники на стендах: а – заднеприводной КМ; б – переднеприводной КМ; в – полноприводной КМ; г – крепление КМ на стенде – вид спереди

Динамометрические стенды без использования сил сцепления колеса с ОП (рис. 7) работают по следующему принципу. На ступицы ТС с помощью штатного крепежа и специальных шайб крепятся переходники-адаптеры, которые затем шлицевым соединением связываются с нагружающими устройствами. В нагружающих устройствах установлены гидравлические или электрические машины, которые управляются микропроцессором и создают требуемое сопротивление вращению осей. Ниже приведены основные преимущества ступичных стендов по сравнению с роликовыми и ленточными.

Благодаря отсутствию взаимодействия колес с ОП достигается высокая повторяемость результатов. При испытаниях не возникает бокового увода шины, нет сопротивления качению и буксования колеса. Температура шины, давление, коэффициент сцепления и т.д. являются переменными, причем они могут изменяться не только от испытания к испытанию, но и во время них. С учетом этих неизвестных переменных данные роликовых и ленточных стендов имеют высокий предел погрешности.

Простота подготовки к испытаниям и использования. Нет риска, что машина сойдет со стенда на высокой скорости, т.е. не требуется растяжек для сохранения неподвижности автомобиля, которые также могут влиять на результаты измерений.

Высокая чувствительность. Колеса и ролики, вращающиеся на высоких оборотах, имеют большую инерцию. Это мешает отследить быстро меняющиеся процессы и получить точную кривую мощности. Влияние инерции в ступичных стендах значительно меньше, что позволяет точно измерять и показывать маленькие и быстрые изменения в характеристике. Кроме того, это позволяет точно дозировать необходимое ускорение.

Характеристики ступичных тестов Dynapack [9] и Rototest [10] приведены в табл. 2.

Отдельно стоит отметить динамометрические стенды для тяжелой техники и техники специального назначения. В этом секторе наиболее широким ассортиментом представлены компании Kratzer Automation, Taylor Dynamometer и Mustang Dynamometer.

Подразделение Hofmann компании Kratzer Automation (Германия) занимается выпуском динамометрических стендов для многоосных автомобилей большой грузоподъемности [11]. В конструкции стендов используются беговые барабаны диаметром до 1,82 м. Привод каждого бегового барабана осуществляется собственным тяговым электродвигателем. Общий вид стенда представлен на рис. 8, а характеристики приведены в табл. 3.



а



б



в

Рис. 7. Динамометрические ступичные стелды:

а – Dynapack (США); б – Rototest (Швеция); в – Kratzer Automation (Германия)

Таблица 2.

Технические характеристики динамометрических ступичных стелдов

Параметр	Dynapack	Rototest
Габариты одного модуля, м	0,9×0,7×0,65	1,55×0,8×1,0
Момент инерции вращающихся частей, кг·м ²	н.д.	1,3
Максимальная нагрузка на ось, кг	3000	3500
Тип нагрузочного устройства	Гидронасос	Электродвигатель
Максимальная мощность на одном модуле, кВт	577	305
Максимальный крутящий момент на одном модуле, Н·м	2250	4000
Максимальная частота вращения, мин ⁻¹	2450	3000



Рис. 8. Динамометрический стенд с беговыми барабанами компании Kratzer Automation:
а – общий вид стенда; *б* – автомобиль во время испытаний на стенде

Таблица 3.

Технические характеристики динамометрического стенда компании Kratzer Automation

Конфигурация	4 x 2	4 x 4
Мощность, кВт	1190	1785
Максимальное тяговое усилие, кН	80	120
Максимальная скорость, км/ч	130	
Максимальная нагрузка на ось, кг	13 000	
Диаметр ролика, мм	1828	
Количество ведущих осей	1	2
Тип нагрузочного устройства	Электродвигатель-генератор	

Обзор динамометрических стендов для грузовых автомобилей

Компания Taylor Dynamometer (США) производит роликовые стенды с 1963 г. Компанией производится полный спектр динамометрических стендов (мощностью до 1230 кВт при скорости 72 км/ч) для одноосных, tandemных или многоосных ТС. В качестве нагрузочных устройств используются как гидравлические, так и электрические машины [12]. Внешний вид стендов компании Taylor Dynamometer представлен на рис. 9, а их характеристики приведены в табл. 4.

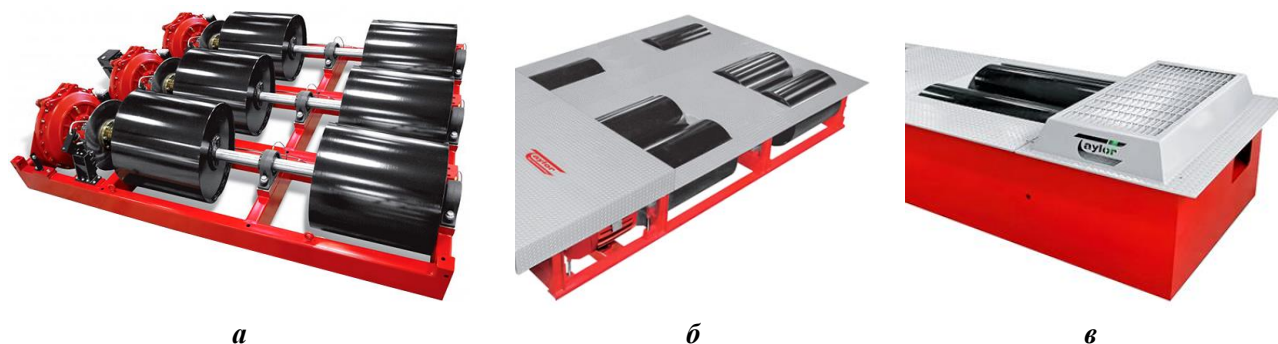


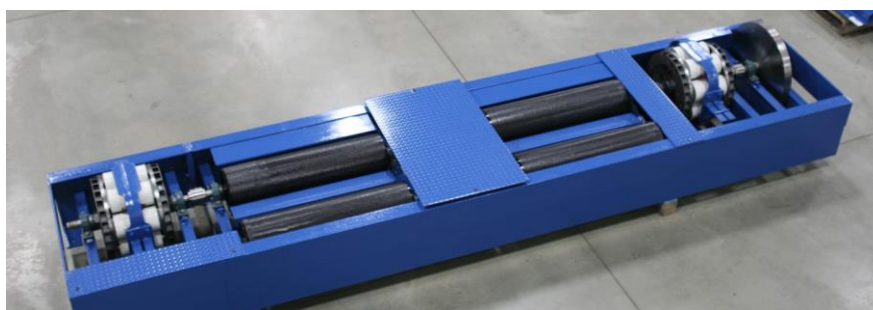
Рис. 9. Роликовые динамометрические стенды компании Taylor Dynamometer:
а – TD-36X3; *б* – TD-24-AC; *в* – CM-51S-EC

Таблица 4.

Технические характеристики динамометрических стенов компании Taylor Dynamometer

Параметр	TD-36X3	TD-24-AC	CM-51S-EC
Мощность, кВт	1230	820	232
Максимальная скорость, км/ч	145	145	145
Максимальная нагрузка на ось, кг	13 608	13 608	11 340
Диаметр ролика, мм	915	610	508
Количество ведущих осей	3	2	1
Тип нагрузочного устройства	Гидродинамический тормоз	Электродвигатель-генератор	Вихретоковый тормоз

Компания Mustang Dynamometer (США) предлагает на выбор три решения для грузовой техники: MD-250-HD, MD-1000 и MD-7500-HD (рис. 10). Динамометрический стенд серии MD-250-HD (рис. 10, а) был разработан в качестве первого динамометра компании, основное преимущество которого заключается в возможности тестирования двух колес одной оси ТС большой грузоподъемности, таких как грузовые автомобили, автобусы и коммерческие автомобили. Этот динамометр был сертифицирован для использования в программах тестирования выбросов благодаря высокой точности регулировок и надежности самого стенда. Стенд MD-250-HD имеет мощность 1500 л. с. при максимальной скорости 280 км/ч, а мощный вихретоковый тормоз с воздушным охлаждением обеспечивает MD-250-HD мощностью 900 л. с. для испытаний в режиме торможения. Стенд MD-250-HD может быть дооснащен до комплектации 250-HD-SE-M за счет добавления двигателя переменного тока мощностью 100 или 200 л. с. для испытаний электрических мотор-колес или транспортных средств с возможностью рекуперации. Конструкция стенда MD-250-HD позволяет устанавливать его как напольным, так и интегрированным в пол образом.



а



б



в

Рис. 10. Роликовые динамометрические стенов компании Mustang Dynamometer:
а – MD-250-HD; б – MD-1000; в – MD-7500-HD

Динамометрический стенд для тяжелых грузовиков серии MD-1000 (рис. 10, б) имеет стандартную максимальную мощность измерения 2000 л.с., достаточную для работы с большинством стандартных грузовиков, тракторов и автобусов. MD-1000 используются на заводах по производству грузовых автомобилей по всему миру для проверки качества выпускаемой продукции, а также используются в большинстве утвержденных правительством программ тестирования выбросов. Стандартная комплектация MD-1000 включает в себя два больших вихретоковых тормоза с воздушным охлаждением, которые дают возможность поглощать мощность до 1200 л.с.

Динамометрический стенд MD-7500-HD (рис. 10, в) в дополнение к тестированию отремонтированных или модернизированных транспортных средств может использоваться для регулярного тестирования ТС в качестве профилактической меры по техническому обслуживанию, которая уменьшает непредвиденные поломки и позволяет добиваться высокой энергоэффективности ТС, а также обеспечивает снижение затрат на ремонт. В основе MD-7500-HD лежит набор из трех вихретоковых тормозов с воздушным охлаждением.

В табл. 5 приведены характеристики стендов компании Mustang Dynamometer [13].

Таблица 5.

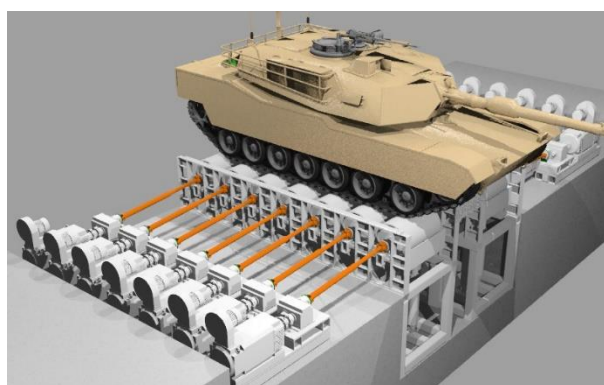
Технические характеристики динамометрических стендов компании Mustang Dynamometer

Параметры	MD-250-HD	MD-1000	MD-7500-HD
Максимальная мощность, л.с.:	1500	2000	3000
Максимальное поглощение, л.с.:	900	1200	1800
Инерционный маховик, кг:	910	1360	5 433
Максимальная скорость, км/ч:	280	200	161
Управление:	Цифровой контроллер с замкнутым контуром и программным обеспечением Holeshot. Включает запатентованную технологию виртуального моделирования дорог.		
Нагрузка на одну ось, кг:	10 886	10 872	10 886

Кроме того, подразделение Fearless Innovation компании Mustang Advanced Engineering (MAE) предлагает индивидуальные решения для тестирования многоосной военной колесной и гусеничной техники (рис. 11).



а



б

Рис. 11. Индивидуальные решения исполнения динамометрических стендов компании MAE:

а – для колесной техники; б – для гусеничной техники

Заключение

В современном автомобилестроении существует очень жесткая конкуренция в сфере качества, эффективности и экономичности выпускаемых моделей транспортных средств. Для достижения наилучших результатов требуется проведение большого числа испытаний различных уровней. Их результаты во многом зависят от типа и возможностей испытательного оборудования. Далеко не все отечественные научно-исследовательские центры обладают всем необходимым оборудованием для проведения различных типов испытаний транспортных средств, а большая часть из имеющихся испытательных стендов морально и физически сильно устарела.

Обзор современного испытательного оборудования систем привода ведущих колес транспортных средств дает возможность определить перспективные направления развития в этой области с целью обновления испытательной базы предприятия. В данной работе были рассмотрены типы динамометрических стендов для колесных транспортных машин и принцип их работы. Представлен обзор предложений на рынке динамометрических стендов как для обычных автомобилей, так и для специализированных транспортных средств.

Библиографический список

1. Балабин, И.В. Испытания автомобилей [Текст] / И.В. Балабин, Б.А. Куров, С.А. Лаптев. – М.: Машиностроение, 1988. – 192 с.
2. Специальные транспортные средства (испытания): учебник для вузов [Текст] / Г.И. Гладов, А.М. Петренко. Под ред. Г.И. Гладова. М: ООО «Гринлайт+», 2010. – 384 с.
3. Испытания колесных транспортных средств: учебное пособие [Текст] / А.М. Иванов, С.Р. Кристальный, Н.В. Попов, А.Р. Спинов. М.: МАДИ, 2018. – 124 с.
4. Федотов, А.И. Контроль систем безопасности автомобилей на стендах с беговыми барабанами: монография [Текст] / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Потапов, Е.М. Портнягин. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. – 364 с.
5. Горожанкин, С.А. Применения асинхронной электрической машины в качестве тормозного устройства при определении показателей автомобильного ДВС на неустановившихся режимах работы [Текст] / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков, В.Г. Скрипкарь // Автотранспортное предприятие. 2016. № 9. С.49-62.
6. Бумага, А.Д. Стенд для исследования пятна контакта шин с опорной поверхностью [Текст] / А.Д. Бумага, А.Г. Яценко, В.В. Криволап, Н.В. Савенков, В.Г. Скрипкарь // Автомобильная промышленность. 2016. № 6. С. 30-32.
7. Савенков, Н.В. Анализ характеристик современного оборудования для определения тягово-скоростных свойств автомобилей в лабораторных условиях [Текст] / Н.В. Савенков, В.В. Понякин, С.А. Чекулаев, В.В. Бутенко // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 3. С. 276-289.
8. Испытание автомобилей: учебное пособие [Текст] / Л.В. Бармашова, А.А. Матисов. – Вязьма: ФГБОУ ВПО «МГИУ», 2012. – 316 с.
9. Официальный сайт компании Dynapack. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://dynapack.com/> (дата обращения: 23.08.2021).
10. Официальный сайт компании Rototest. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://rototest.com/> (дата обращения: 23.08.2021).
11. Официальный сайт компании Kratzer Automation. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.kratzer-automation.com/> (дата обращения: 23.08.2021).
12. Официальный сайт компании Taylor Dynamometer. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.taylordyno.com/> (дата обращения: 24.08.2021).
13. Официальный сайт компании Mustang Dynamometer. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.mustangdyne.com/> (дата обращения: 29.08.2021).