

## СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН В ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

**Г.И. Гедроить,**

*зав. каф. тракторов и автомобилей БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**С.В. Занемонский,**

*ст. преподаватель каф. тракторов и автомобилей БГАТУ*

**С.И. Оскирко,**

*доцент каф. тракторов и автомобилей БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

*В статье приведены методика и результаты экспериментальных исследований по определению силы сопротивления качению транспортно-технологических машин в дорожных условиях.*

*Ключевые слова: машина, дорога, движитель, воздействие на почву, исследования, сопротивление качению, шина, давление воздуха, нагрузка.*

*The methodology and results of experimental studies to determine the rolling resistance force of transport and technological machines on the road are presented in the article.*

*Keywords: machine, road, mover, impact on soil, research, rolling resistance, tire, air pressure, load.*

### Введение

Сила сопротивления качению существенно влияет на потери энергии при движении тракторного агрегата. Она зависит от многих конструкционных и эксплуатационных факторов: типа и состояния покрытия дороги, профиля шины, рисунка протектора, его износа, конструкции каркаса и качества материала шины, давления воздуха в шинах, изношенности протектора [1-3]. В аналитических моделях учесть все факторы сложно. Поэтому экспериментальные исследования являются важным этапом при разработке и создании мобильных машин.

Актуальность оценки сил сопротивления качению в дорожных условиях для транспортно-технологических машин (прицепов, машин для внесения удобрений, транспортировщиков рулонов) возрастает из-за тенденции использования на них шин, обеспечивающих снижение уровня воздействия ходовых систем на почву. Это дает положительный результат в полевых условиях [4], но на дорогах энергозатраты на передвижение возрастают.

Цель работы – исследовать изменение силы сопротивления качению транспортно-технологических машин в разных дорожных условиях в зависимости от типа используемых шин.

### Основная часть

Исследованию вопроса взаимодействия различного типа движителей с опорным основанием посвящены труды многих ученых – В.А. Скотникова, Я.С. Агейкина, В.В. Гуськова, В.В. Кацыгина, В.П. Бойкова, В.А. Русанова, А.Н. Орды, Г.С. Горина, В.И. Кнороза, Н.Ф. Бочарова, В.Ф. Бобкова,

И.И. Водяника, А.М. Кононова, М.Г. Беккера, Дж. Вонга, М.Н. Летошнева и др. [1-3]. В большинстве работ описываются исследования взаимодействия колесного движителя с деформируемой опорной поверхностью. Их основной целью является определение показателей деформации шины и почвы, сопротивления качению, силы тяги, уровня воздействия на почву и др. Работы отличаются описанием зоны контакта колеса с опорным основанием, принятыми закономерностями изменения нормальных и касательных напряжений в контакте, допущениями.

Модели, построенные при аналитических исследованиях, всегда содержат эмпирические коэффициенты, которые определяются при нагружении шин на обжимных стендах, при полевых и дорожных исследованиях машин. Авторами данной статьи выполнены исследования и получены результаты по значениям силы сопротивления качению транспортно-технологических машин в дорожных условиях.

В качестве объектов исследований использовались образцы машин (табл. 1) с четырехколесными или шестиколесными ходовыми системами, осна-

**Таблица 1. Технические характеристики транспортно-технологических машин**

Машина	Полная масса, кг	Количество осей/колес, шт.	Шины
Образец-1	32000	1/2+6.т./4	1300x750 мод. Я-186
Образец-2	22000	1/2+6.т./4	16,5/70-18 мод. КФ-97
Образец-3	14570	6.т./4	16,5/70-18 мод. КФ-97
Образец-4	18730	6.т./4	22/70-20 мод. Ф-118
Образец-5	12330	6.т./4	1140x600 мод. Я-404
Образец-6	11800	6.т./4	1140x700 мод. Я-369
Образец-7	10800	6.т./4	22/70-20 мод. Ф-118
Образец-8	26660	1/2+6.т./4	22/70-20 мод. Ф-118

\* – балансирная тележка

ценными широкопрофильными и арочными шинами. Серийные машины оборудованы шинами 16,5/70-18 (мод. КФ-97). Параметры шин образцов приведены в таблице 2.

Для проведения исследований по определению сил сопротивления качению машин выбирались участки дороги длиной не менее 60 м и с уклоном не более двух градусов. Опыты проводились при движении в прямом и обратном направлении. На дороге сравниваемые варианты исследовались на одном участке. Измерение сил сопротивления качению машин осуществлялось тензометрическими тяговыми звеньями (тензобалками) (рис. 1).



Рисунок 1. Тензометрическое тяговое звено для измерения силы сопротивления качению машин

На вертикальных и горизонтальных плоскостях тяговых звеньев наклеивались тензорезисторы для измерения, соответственно, силы сопротивления качению машины и нагрузки, передаваемой от машины на трактор. Тензорезисторы соединялись в мостовую схему. Точная разметка деталей и качественная наклейка тензорезисторов позволили исключить взаимное влияние вертикальной и горизонтальной сил. Это установлено при тарировке тензозвеньев с помощью специального устройства. Нагружение и разгрузка тензозвеньев во время тарировки осуществлялись гидравлическим домкратом с трехкратной повторностью. Усилие определялось по образцовому динамометру сжатия ДОСМ-3-5. По результатам тарировки вычислялись масштабные коэффициенты. Ошибка тарировки звеньев не превышала 1,8 %.

Минимальное давление воздуха в шинах выбиралось исходя из допустимой деформации шин при соответствующей нагрузке. При исследовании образцов 6 и 7 (табл. 1) было смоделировано движение с разным давлением воздуха в шинах. Скорость движения в дорожных условиях задавалась в пределах 3...4 м/с. Взвешивание машин и распределение нагрузки по опорам производились на автомобильных весах погрешностью  $\pm 0,2\%$ .

Результаты экспериментов по определению сил сопротивления качению машин в дорожных условиях приведены в таблице 3.

Нагрузка на ходовые системы исследованных образцов (табл. 3) была ниже их полной массы, так как часть нагрузки передавалась на тензозвено, т.е. догружала трактор.

В связи с разной грузоподъемностью шин, нагрузки на ходовые системы машин различаются. Поэтому сравнение вариантов удобнее производить по коэффициенту сопротивления качению, равному отношению силы сопротивления качению к нормальной нагрузке на ходовую систему [5-7].

На асфальтированной дороге наиболее низкие значения коэффициента сопротивления качению машин получены для серийных машин (табл. 3, образцы 2, 3) и составляют 0,013. В шинах таких машин давление воздуха – 370 кПа. Применение шин с давлением воздуха 200...250 кПа приводит к повышению коэффициента сопротивления качению машин до 0,018...0,028, т.е. в 1,5...2,1 раза. При дальнейшем снижении давления воздуха в шинах до 100...150 кПа коэффициент сопротивления качению возрастает до 0,021...0,033, что выше, чем у серийных машин в 1,6...2,5 раза. Необходимо отметить, что значения давления воздуха коррелируют с давлением ходовых систем на опорное основание [2, 8]. Разность в значениях коэффициента сопротивления качению машин при одном давлении воздуха в шинах связана с тем, что они имеют разные размеры, форму профиля, деформируемость (табл. 2).

Аналогичные соотношения получены на сухой грунтовой дороге. На размокшей грунтовой дороге (толщина размокшего слоя 40...50 мм) получены равные значения коэффициентов сопротивления качению для машин с шинами 16,5/70-18 и 22/70-20.

Таблица 2. Геометрические размеры шин, м

Шина	Наружный диаметр	Ширина профиля	Высота профиля	Статический радиус	Ширина беговой дорожки протектора	Высота беговой дорожки протектора	Радиус кривизны беговой дорожки протектора
1300x750 мод. Я-186	1,280	0,750	0,300	0,564	0,684	0,118	0,555
16,5/70-18 мод. КФ-97	1,065	0,425	0,306	0,484	0,35	0,054	0,311
22/70-20 мод. Ф-118	1,320	0,560	0,406	0,571	0,460	0,070	0,413
1140x600 мод. Я-404	1,150	0,605	0,261	0,496	0,530	0,062	0,597
1140x700 мод. Я-369	1,160	0,710	0,266	0,515	0,630	0,062	0,831

**Таблица 3. Сопротивление качению транспортно-технологических машин**

Машина	Нагрузка на ходовую систему, кН	Давление воздуха в шинах, кПа	Сила сопротивления качению, кН	Коэффициент сопротивления качению
Асфальт				
Образец-1	300,5	250	7,62	0,025±0,002
Образец-2	204,0	370	2,66	0,013±0,001
Образец-3	128,2	370	1,66	0,013±0,001
Образец-4	169,0	210	3,42	0,020±0,001
Образец-5	108,4	150	3,16	0,030±0,001
Образец-6	108,5	250	2,45	0,023±0,003
	108,5	200	3,03	0,028±0,002
	108,5	150	3,61	0,033±0,002
Образец-7	108,5	250	1,93	0,018±0,002
	108,5	200	2,25	0,021±0,003
	108,5	150	2,45	0,023±0,004
	108,5	100	3,15	0,029±0,003
Сухая грунтовая дорога				
Образец-3	128,2	370	2,36	0,018±0,002
Образец-4	169,0	210	4,48	0,027±0,001
Образец-5	108,4	150	3,94	0,037±0,001
Размокшая грунтовая дорога				
Образец-8	249,5	220	9,46	0,038±0,002
Образец-2	202,5	370	7,72	0,038±0,003

**Таблица 4. Уклоны дорог**

Местность	Максимальный подъем на дороге, град.			
	с покрытием	грейдерной	грунтовой	полевой
Равнинная	4	5...6	7	8
Холмистая	5	6...7	8	10

**Таблица 5. Значение приведенного коэффициента сопротивления качению машин**

Машина	Давление воздуха в шинах, кПа	Подъем, град.				
		0	2	4	6	8
Асфальт						
Образец-3	370	0,013	0,048	0,083	0,118	0,154
Образец-7	200	0,021	0,056	0,091	0,126	0,162
	100	0,029	0,064	0,099	0,134	0,170
Сухая грунтовая дорога						
Образец-3	370	0,018	0,053	0,088	0,123	0,159
Образец-4	210	0,027	0,062	0,097	0,132	0,168

Размеры последних близки к рекомендованным, с целью совершенствования ходовых систем транспортно-технологических машин [9].

В реальных дорожных условиях агрегатам необходимо преодолевать подъемы, что соответственно вызывает увеличение сил сопротивления качению машин. Суммарное сопротивление движению машин на пересеченной местности оценивается приведенным коэффициентом сопротивления дороги  $\psi$ .

$$\psi = f \pm \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению на горизонтальной дороге;

$\alpha$  – угол уклона дороги, град.

Согласно источнику [10], можно выделить углы уклона на равнинной и холмистой местности (табл. 4).

Результаты расчетов испытанных образцов на широкопрофильных шинах приведены в таблице 5.

Из таблицы 5 видно, что уже при углах подъема два градуса, во всех вариантах составляющая приведенного коэффициента сопротивления качению от преодоления подъема выше, чем составляющая от дороги. С ростом углов подъема эта разница увеличивается. При углах подъема восемь градусов, суммарное значение приведенного коэффициента сопротивления дороги составляет 0,154...0,170. Отметим, что близкие значения коэффициента сопротивления качению получены для движения машин на почвах с низкой несущей способностью [1, 2].

Приведенные результаты показывают, что применение на транспортно-технологических машинах шин с пониженным давлением воздуха приводит к существенному росту коэффициента сопротивления качению в дорожных условиях, что отрицательно сказывается на топливно-экономических показателях агрегатов. Однако возможность агрегатирования на дорогах в большей степени зависит от уклонов дорог.

#### Заключение

Одной из тенденций современного сельскохозяйственного машиностроения является снижение уровня воздействия ходовых систем на почву. Применение на транспортно-технологических машинах шин с давлением воздуха 100...250 кПа вместо шин с давлением воздуха 370 кПа приводит к росту коэффициента сопротивления качению на асфальте и сухих грунтовых дорогах в 1,5...2,5 раза. Определяющую роль для возможности агрегатирования при этом для всех машин играют уклоны используемых дорог.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скотников, В.А. Проходимость машин / В.А. Скотников, А.В. Пономарев, А.В. Климанов. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 328 с.
2. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 242 с.

3. Гедроить, Г.И. Совершенствование профиля пневматических шин для сельскохозяйственной техники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 2-5.

4. Гедроить, Г.И. Уплотнение почв ходовыми системами сельскохозяйственных машин / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2010. – № 6. – С. 8-12.

5. Кутьков, Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства / Г.М. Кутьков. – М.: Колос, 2004. – 504 с.

6. Расчет нормальной жесткости шин для оценки их эксплуатационных показателей / А.Н. Евграфов [и др.] // Автомобильная промышленность. – 1977. – №3. – С. 20-22.

7. Гедроить, Г.И. Сопротивление качению ведомых пневматических колес / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2010. – № 1. – С. 26-30.

8. Гедроить, Г.И. Опорные свойства шин для сельскохозяйственной техники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2009. – № 4. – С. 23-27.

9. Совершенствование ходовых систем транспортно-технологических сельскохозяйственных машин / Г.И. Гедроить [и др.] // Агропанорама. – 2020. – № 2. – С. 2-6.

10. Моделирование характеристик дизельного двигателя: учеб.-метод. пособие / Ю.Н. Атаманов [и др.]. – Минск: БНТУ, 2014. – 196 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 12.11.2020

УДК 631.372

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ СВОЙСТВ ДВИЖИТЕЛЯ

**В.А. Шкляревич,**

*ст. преподаватель каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ*

*В статье получены зависимости, позволяющие оценить влияние конструктивных параметров движителя машинно-тракторного агрегата на развитие его касательной силы тяги и коэффициенты буксования и сцепления.*

*Ключевые слова: колесный движитель, гусеничный движитель, касательная сила тяги, буксование, сцепление, почвозацеп.*

*Dependencies allowing to estimate the influence of structural parameters of machine-tractor unit propeller on development of its tangent tractive effort and coefficients of slip and grip are obtained in the article.*

*Keywords: weeled propeller, tracked propeller, tangent tractive effort, slip, grip, grouser.*

### Введение

В настоящее время создано множество различных типов ходовых систем, учитывающих разнообразие почвенных условий и агротехнические требования, предъявляемые к выполнению технологических операций. Основными их видами являются колесные и гусеничные ходовые системы. Наиболее простым и универсальным элементом ходовой системы является колесный движитель. Гусеничный движитель можно представить как модификацию колесного – по характеру контакта с почвой гусеничные движители приближаются к колесу большого диаметра.

При движении машинно-тракторного агрегата (МТА), в состав которого входит тяговое энергетическое средство, как правило, трактор, по поверхности почвы его движители преобразуют крутящий момент в касательную силу тяги, которая ограничивается сцеплением движителя с почвой. От величины касательной силы тяги зависят тягово-сцепные свойства машинно-тракторного агрегата. Чрезмерное увеличение касательной силы тяги приводит к разрушению структуры почвы под движителями и срезу почвы их почвозацепами.

От величины касательной силы тяги зависит коэффициент сцепления движителя с почвой, характеризующий его тягово-сцепные свойства, который в свою очередь связан с его буксованием, являющимся одним из показателей режима работы движителя. Максимальное значение коэффициента сцепления соответствует такой величине буксования, после достижения которой наступает полный срез почвы под движителем.

Цель исследования – получение зависимостей, позволяющих оценить влияние конструктивных параметров движителя МТА на развитие его касательной силы тяги и коэффициенты буксования и сцепления для снижения негативных последствий процесса слеодообразования.

### Основная часть

Как правило, при движении машинно-тракторного агрегата по поверхности почвы действительный путь, пройденный им, оказывается меньше теоретического. Это объясняется частичным буксованием опорной поверхности движителя по почве, зависящим как от ее свойств, так и от конструкции и типа движителя, развиваемой касательной силы тяги. Степень пробуксовки оценивают коэффициентом