

**ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ШИНАХ**

**МОБИЛЬНЫХ МАШИН  
PROBLEMS OF AUTOMATIC TIRE PRESSURE  
CONTROL IN MOBILE CARS**

*Гуськов В.В.*, д-р техн. наук, проф.,  
*Бойков В.П.*, д-р техн. наук, проф.,  
*Поварехо А.С.*, канд. техн. наук, доц.,  
*Павлова В.В.*, канд. техн. наук, доц., *Лысанович П.В.*, аспирант,  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

*V. Guskov*, Doctor of technical Sciences, Professor,  
*V. Boykov*, Doctor of technical Sciences, Professor,  
*A. Pavarekha*, Ph.D. in Engineering, Associate professor,  
*V. Pavlova*, Ph.D. in Engineering, Associate professor,  
*P. Lysanovich*, postgraduate,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Исследован процесс взаимодействия колесного движителя с  
грунтовой поверхностью при изменении давления воздуха в шине.  
Установлено влияние давления воздуха на тягово-сцепные свой-  
ства колесных машин. Предложена система автоматического ре-  
гулирования давления воздуха в шинах мобильных машин в зависи-  
мости от дорожных условий.*

*Ключевые слова: движитель колесный, давление, проходимость,  
регулирование, буксование, поверхность грунтовая.*

*Studies of the process of interaction of the wheel drive with the  
ground surface when the air pressure in the tire. As a result of researches  
it is established that the size of air pressure in tires renders essential  
influence on traction properties of wheel cars. As a result, the design of*

*the system of automatic control of air pressure in the tires of mobile machines, depending on the road conditions.*

*Keywords: wheel drive, pressure, permeability, regulation, slipping, ground surface.*

## **Введение**

Известен ряд способов повышения тягово-сцепных свойств колесных тракторов, основными из которых являются: использование полного привода, сдвигание или страивание шин, использование балласта, применение догрузителей сцепного веса, блокировка межосевых и межколесных дифференциалов.

В последнее время развивается один из способов повышения тягово-сцепных свойств и проходимости машин по грунтам со слабой несущей способностью – регулирование давления воздуха в шинах ведущих колес трактора.

Обычно последствия использования неправильно подобранного давления в шинах недооценивают. А ведь вследствие этого машина не может полностью реализовать свой потенциал. Растет коэффициент буксования и снижается тяговая мощность трактора. Чтобы снизить буксование и улучшить передачу тяговой мощности, начинают навешивать дополнительный балласт. Результаты проведенных исследований показали, однако, что это – не самый эффективный инструмент для уменьшения буксования. Увеличивая общую массу трактора, мы увеличиваем нагрузку на почву, повреждая ее, да и экономический результат вызывает сомнения.

При небольших рабочих скоростях (9...12 км/ч), например, при выполнении основной обработки почвы, тяговую мощность ограничивает пятно контакта шины с почвой.

Сама по себе почва не может «воспринять» большое окружное усилие на колесе. Вращающиеся колеса не передают полностью ту мощность, которую они через трансмиссию получили от двигателя. Основной задачей становится снижение коэффициента буксования за счет улучшения сцепления шин и почвы.

Со снижением давления в шине увеличивается пятно контакта с почвой, а значит, нагрузка распределяется по большей площади. Вследствие меньшего давления, шины в меньшей степени заглубляются в почву. Таким образом, снижается сопротивление качению и

меньше мощности растрачивается на уплотнение почвы. К тому же за счет увеличения опорной поверхности улучшаются сцепные свойства шины с почвой, а значит, на нее можно передать большую мощность.

Тяговая мощность и буксование связаны воедино, и без первого не будет второго. Уровень буксования, превышающий 15 %, приводит к повреждению почвы. Что же касается сопротивления качению, то при движении по шоссе оно тем меньше, чем больше давление в шинах. В поле ситуация диаметрально противоположна: чем меньше давление, тем меньше глубина захода колеса в почву и соответственно меньше сопротивление качению.

В 2017 г. на международной выставке сельскохозяйственных тракторов и машин фирма «Fendt» (ФРГ) представила сельскохозяйственный колесный трактор тягового класса 5,0 с двигателем мощностью 360 л.с. с системой регулирования воздуха в шинах (рисунок 1).



Рисунок 1 – Трактор фирмы Fendt на полевых испытаниях по регулированию давления воздуха в шинах

Фирма провела исследование влияния давления воздуха в шинах этого трактора на его тягово-сцепные свойства при работе на суглинке нормальной влажности ( $w=14-16\%$ ) при различных сельскохозяйственных работах. В результате исследований было выявлено существенное повышение мощности на крюке при регулировании давления, рисунок 2.

Также существенно понижается и расход топлива при различного вида работах. Давление в шинах регулировалось согласно таблице 1.

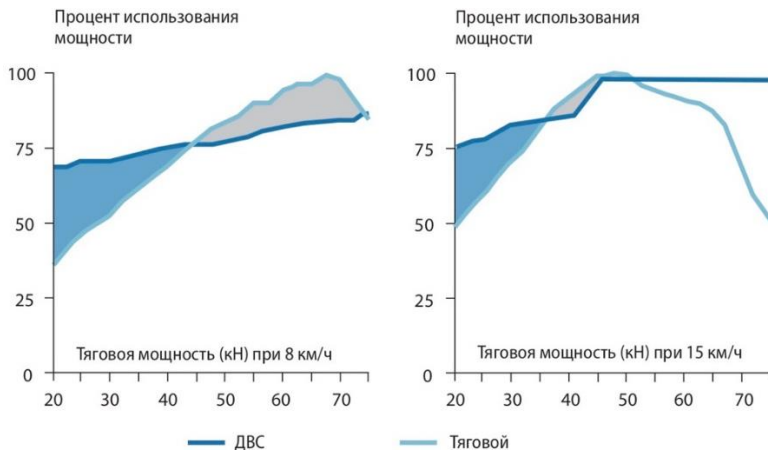


Рисунок 2 – Взаимозависимость относительных показателей тяговой мощности и мощности ДВС

При этом нужно отметить, что давление регулировалось водителем при остановке трактора в зависимости от сезона, категории грунтовой поверхности и вида работ, что, по нашему мнению, снижает эффективность рассматриваемого метода.

Таблица 1 – Подбор давления

Фронтальный балласт	Давление в шинах			
	Транспортные работы		Полевые работы	
	Передняя ось	Задняя ось	Передняя ось	Задняя ось
отсутствует	0,8 бар	1,6 бар	0,6 бар	0,6 бар
1250 кг	1,4 бар	1,6 бар	1,2 бар	0,6 бар
2500 кг	2,4 бар	1,6 бар	1,6 бар	0,6 бар

# 1. Теоретическое обоснование процесса взаимодействия ведущего колеса колесных машин с грунтовой поверхностью

## 1.1. Физико-механические свойства грунтовой поверхности

При воздействии ходовых органов машины на грунт в последнем возникают деформации, значение и характер которых обусловлены действием внешних и внутренних сил, вызывающих смещение частиц друг относительно друга, а также изменение среднего расстояния между частицами. Если после устранения внешнего воздействия частицы грунта вернуться в первоначальное положение, то деформация считается *упругой*, если положение частиц после снятия нагрузки отличается от первоначального, то наблюдается *остаточная* деформация. Если остаточная деформация равна общей деформации, то речь идет о *пластической* деформации.

Реальные грунты не являются чисто упругими и пластическими. Один и тот же грунт при различных условиях деформации проявляет свойства и упругости, и пластичности. При малых нагрузках деформация прямо пропорциональна им, т.е. грунт проявляет себя как упругое тело (участок *I*, рисунок 3). При дальнейшем увеличении нагрузки относительный прирост деформации возрастает (участок *II*, рисунок 3), в этом состоянии грунт близок к упруго-пластичным средам. При какой-то предельной нагрузке происходит увеличение деформации без ощутимого возрастания напряжения (участок *III*, рисунок 3).

Деформации грунтов, находящихся в естественном состоянии, представляют собой особый вид деформаций, свойственный только полидисперсным системам при условии, что силы отталкивания приближаются к значениям сил сцепления. Поэтому даже при линейной зависимости между напряжением и деформацией (малые нагрузки) после снятия нагрузки наблюдаются большие остаточные деформации.

При взаимодействии движителей мобильных машин с грунтом последний подвергается смятию, сдвигу в разных направлениях, в результате чего в нем возникают поля *нормальных* и *касательных напряжений*, распространяющихся в глубину и в разные стороны от

места приложения нагрузки. От способности грунта выдерживать указанные напряжение зависят глубина колеи, образуемой движителями машины, сила сопротивления движению за счет смятия грунта опорной частью колеса и образования колеи, а также сила сцепления. Поэтому сопротивление грунтов сжатию и сдвигу является основным показателем, влияющим на тягово-сцепные качества машин.

Известно, что тягово-сцепные и скоростные свойства мобильной машины проявляются при взаимодействии ее ходового аппарата с поверхностью движения. Поверхность движения может быть искусственной (асфальт, бетон, булыжник и др.) и естественной (целина, залежь, пахота и др.). В свою очередь, естественная поверхность может быть минерального (глина, песок и пр.) и торфяно-болотного происхождения (торфяники с остатками разного рода растительности).

Тягово-сцепные свойства многоцелевых колесных машин (МКМ) зависят, с одной стороны, от параметров машины (ее движителя), с другой – от физико-механических свойств грунтовой поверхности.

Грунтовая поверхность характеризуется составом грунта (минеральные грунты, торфяники), сопротивлением ее смятию и сдвигу, влажностью, плотностью, пористостью и др.

Одним из основных свойств является сопротивление грунтов сжатию и сдвигу под действием динамической нагрузки. В механике грунтов в основном рассматриваются зависимости сжатия и сдвига от статической нагрузки. Процесс взаимодействия движителя мобильной машины характеризуется переменным неустановившимся режимом перехода относительного покоя к относительному движению.

Одними из зависимостей сопротивления сжатию и сдвигу, которые адекватно отражают динамический процесс взаимодействия ведущего и ведомого колес движителя машины с грунтовой поверхностью являются зависимости, предложенные профессором В.В. Кацыгиным [6]. На рисунке 3 показана зависимость нормальных напряжений  $\sigma$  от глубины погружения  $h$ , а на рисунке 4 – напряжений сдвига  $\tau$  от деформации  $\Delta$ .

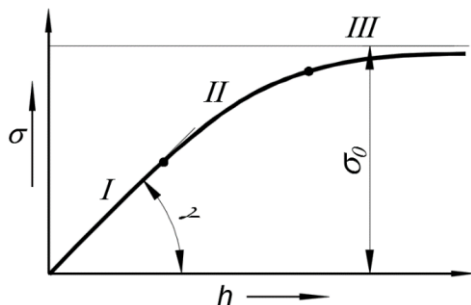
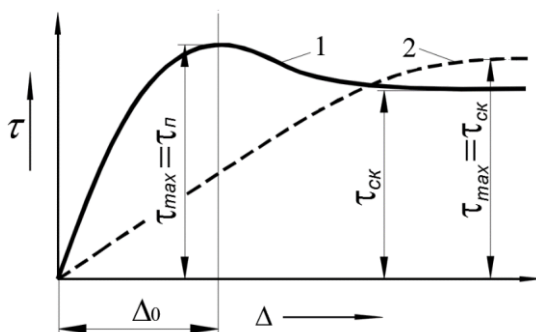


Рисунок 3 – Зависимость нормальных напряжений  $\sigma$  от глубины погружения  $h$  штампа

Нормальное напряжение определяется по формуле:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot th \left( \frac{k}{\sigma_0} \cdot h \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – несущая способность грунта;  $k$  – коэффициент объемного смятия грунта;  $h$  – глубина погружения штампа.



1 – плотные грунты; 2 – пластичные грунты

Рисунок 4 – Зависимость напряжений сдвига  $\tau$  от деформаций  $\Delta$

Напряжения сдвига, возникающие при деформации грунта:

$$\tau = f_{ck} \cdot q_x \cdot \left( 1 + \frac{f_n}{ch \frac{\Delta}{k_\tau}} \right) \cdot th \frac{\Delta}{k_\tau}, \quad (2)$$

где  $q_x$  – давление колеса на грунт;  $f_{ck}$  – коэффициент трения скольжения;  $f_n$  – коэффициент трения покоя;  $k_\tau$  – коэффициент деформации грунта;  $\Delta$  – деформация сдвига.

Особенностью этих зависимостей является то, что они имеют реальное происхождение, а коэффициент  $k_\tau$  пропорционален предельной деформации сдвига  $\Delta_0$ , т.е.

$$k_\tau = f(\Delta_0).$$

## 1.2. Тягово-сцепные свойства колес МКМ

Применение вышеприведенных зависимостей к процессу взаимодействия колесного движителя с грунтовой поверхностью дало возможность с большой достоверностью определить тягово-сцепные качества машины при движении по указанной поверхности [1, 4, 7].

Сила  $F_{cnp}$  сопротивления движению за счет смятия грунта опорной поверхностью колеса и глубина колеи определяются на основе расчетной схемы (рисунок 5) с помощью уравнений (3) и (4).

На рисунке 5 приняты следующие обозначения:  $r_0$ ,  $r_{cm}$ ,  $r_d$  – номинальный, статический и динамический радиусы колеса;  $c$  – горизонтальная координата приложения реакции грунтовой поверхности;  $F_T$ ,  $M_k$  – толкающая сила и крутящий момент, действующие на колесо;  $h$ ,  $h_{ш}$  – глубина колеи и деформация шины под действием нагрузки  $G$

$$F_{cnp} = \int_0^{h_0} b \cdot \sigma_0 \cdot th \left[ \frac{k \cdot r_{np}}{\sigma_0} \cdot \ln \frac{r_{np} - h}{r_{np} - h_0} \right] dh; \quad (3)$$



$$G = \int_0^{h_0} \frac{b \cdot \sigma_0 \cdot (r_{np} - h)}{\sqrt{2 \cdot r_{np} \cdot h - h^2}} \cdot th \left[ \frac{k \cdot r_{np}}{\sigma_0} \cdot \ln \frac{r_{np} - h}{r_{np} - h_0} \right] dh. \quad (4)$$

где  $b$  – ширина колеса;  $r_{np}$  – приведенный радиус колеса.

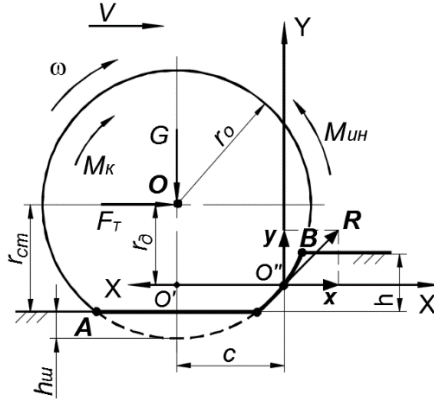


Рисунок 5 – Схема сил и моментов, приложенных к ведущему колесу, движущемуся по горизонтальной грунтовой поверхности в установившемся режиме

При этом были приняты следующие допущения:

- ведущее колесо движется по горизонтальной грунтовой поверхности в установившемся режиме;
- реальное ведущее колесо радиусом  $r_0$  заменено жестким колесом большего радиуса  $r_{np}$  согласно [2, 3, 5];
- реакции грунтовой поверхности направлены нормально к опорной поверхности.

Замена номинального радиуса  $r_0$  приведенным радиусом  $r_{np}$  жесткого колеса проводится по формуле:

$$r_{np} = r_0 \cdot \left( 1 + \frac{h_{ш}}{h} \right).$$

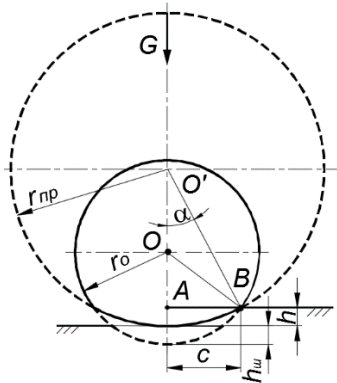


Рисунок 6 – Замена эластичного колеса радиусом  $r_0$  жестким колесом радиусом  $r_{np}$

Касательная сила тяги (движущая сила) определяется на основании рисунка 7 согласно выражению (5).

$$F_k = \int_0^{L_{np}} b \cdot f_{ск} \cdot q_x \cdot \left( 1 + \frac{f_n}{ch \frac{\delta_x \cdot L}{k_\tau}} \right) \cdot th \frac{\delta_x \cdot L}{k_\tau} dL, \quad (5)$$

где  $L_{np}$  – приведенная длина опорной части колеса (AB, рисунок 6);  $q_x$  – давление движителя на грунт.

$$L_{pr} = r_0 \cdot \arctg \sqrt{\frac{2 \cdot r_0 \cdot h - h^2}{r_{np} - h}} + \sqrt{2 \cdot r_0 \cdot h}.$$

где  $\delta$  – буксование колеса ( $0 \leq \delta \leq 1$ ).

### 1.3. Буксование ведущих колес колесных машин

Рассмотрим процесс возникновения буксования колеса используя расчетную схему, представленную на рисунке 7 [2, 3].

Как уже указывалось выше, тягово-сцепные свойства мобильных машин, в частности колесных тракторов, зависят от буксования колес машины, которое определяется силами трения и сдвигом грунта

почвозацепами в сторону, обратную направлению движения последней.

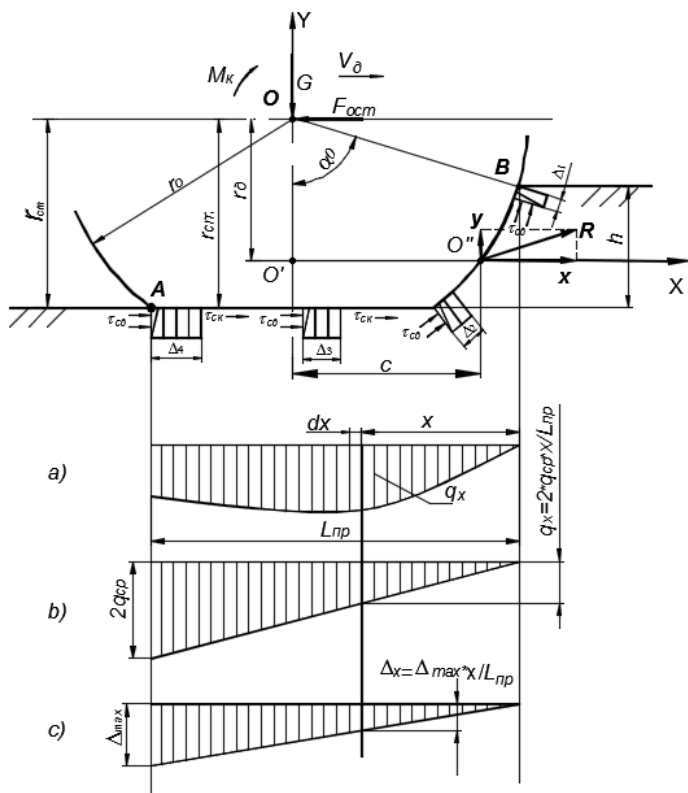


Рисунок 7 – Схема взаимодействия ведущего колеса с грунтовой поверхностью

Теоретически передача ведущего момента обязательно должна сопровождаться буксованием, в результате чего ось колеса перемещается как бы на соответствующее расстояние назад. В этом, главным образом, заключается физическая сущность буксования ведущих колёс на деформируемой поверхности и причина снижения их поступательной скорости. Дополнительное незначительное снижение поступательной скорости ведущих колёс обуславливается тангенциальными деформациями шин. Благодаря эластичности шин в

окружном направлении участки её, приближающиеся при качении колеса к площадке контакта шины с грунтом, под действием ведущего момента сжимаются, вследствие чего путь, проходимый колесом за один оборот, уменьшается. Из сказанного выше следует, что сцепление опорной поверхности колеса с грунтом происходит за счёт сил трения, возникающих между шиной и грунтом, и силы сдвига и среза грунтовых кирпичей, зажатых между грунтозацепами. При движении колеса ( $v=const$ ) сдвиг и срез грунтовых кирпичей происходит в основном в период выхода последнего грунтозацепа опорной поверхности колеса из грунта (рисунок 7). В этот момент нагрузка от вышедшего из зацепления грунтозацепа перераспределяется на остальные, находящиеся в зацеплении. Все грунтозацепы сдвигают и срезают грунт на одинаковую величину причём первый сдвигается на величину  $\Delta_1$ , второй на величину  $\Delta_1+\Delta_1=2\cdot\Delta_1$ , третий на  $\Delta_1+\Delta_1+\Delta_1=3\cdot\Delta_1$  и т.д. Поскольку первый грунтозацеп пройдёт все стадии зацепления от входа в грунт до выхода из него, наибольший сдвиг и срез грунта при выходе его из зацепления равен  $\Delta_{max}=n\cdot\Delta_1$  (здесь  $n$  – число грунтозацепов в зацеплении опорной поверхности колеса с грунтом).

С другой стороны, наибольший сдвиг и срез грунта можно представить как произведение коэффициента буксования  $\delta$  на длину опорной поверхности колеса  $L_{np}$ , т.е.  $\Delta_{max} = \delta \cdot L_{np}$ .

При движении по грунтовой поверхности движущая сила растёт в зависимости от буксования  $\delta$  до определенного предела  $\delta_{opt}$ , а затем начинает снижаться (рисунок 8).

Это объясняется тем, что при взаимодействии шины, имеющей грунтозацепы, с грунтовой поверхностью последние сдвигают грунт в направлении, обратном движению машины и на участке от  $0$  до  $\delta_{opt}$  движущая сила пропорциональна усилиям сдвига  $T_{cd}$ .

При достижении буксования  $\delta_{opt}$  грунтозацепы срезают грунтовые «кирпичи» и образуется «земляное» колесо, т.е. трение сдвига  $T_{cd}$  заменяется трением скольжения  $T_{ck}$ . Известно, что  $T_{cd} \geq T_{ck}$ .

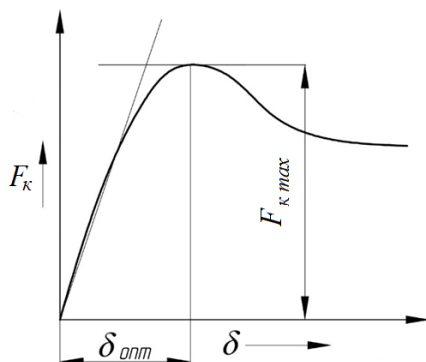


Рисунок 8 – Зависимость движущей силы от буксования при работе колесной машины на стерне суглинка нормальной влажности

Таким образом, при буксовании колеса имеется два режима буксования (рисунок 8):

- сила тяги растет с увеличением буксования;
- сила тяги падает и стремится к постоянной величине, обусловленной силами трения «земляного» колеса с грунтовой поверхностью.

## 2. Влияние давления воздуха в шинах ведущих колес на тягово-сцепные качества машины

Результаты исследований процесса взаимодействия колесного движителя с грунтовой поверхностью, проведенные сотрудниками кафедры «Тракторы» БНТУ [1, 2, 3] показали, что при снижении давления  $p_w$  воздуха в шинах ведущих колес трактора увеличивается сила тяги  $F_k$  и уменьшается сила сопротивления движению за счет образования колеи  $F_{cnp}$  и наоборот (рисунок 9).

При увеличении давления воздуха в шине до  $p_w max$  наступает потеря тягово-сцепных свойств машины. Особенно это явление заметно при движении трактора по грунтам со слабой несущей способностью типа торфяников или на минеральных грунтах при большой влажности.

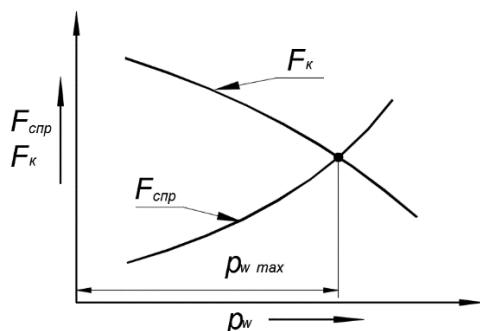


Рисунок 9 – Зависимость тягово-цепных свойств колесного трактора от давления воздуха в шине при работе на стерне суглинка нормальной влажности

### 3. Автоматическое регулирование давления воздуха в шинах мобильных машин

В настоящее время регулирование давления воздуха осуществляется ручным способом при остановке машины. Такое регулирование не всегда успешно. Например, если машина при движении попадает на участок грунта слабой несущей способности, то при ручном регулировании она теряет проходимость или ухудшаются ее тягово-цепные свойства за счет увеличения буксования.

Нами предлагается создать систему автоматического регулирования давления, функционирующую в соответствии с дорожными условиями. Она основывается на том, что при достижении касательной силы тяги максимального значения и дальнейшем увеличении буксования (рисунок 8) начинает работать электронное устройство, позволяющее снизить давление воздуха в шинах машины.

В результате исследований предложено два направления оценки необходимости регулирования давления воздуха в шине.

Первый путь требует установки датчиков, определяющих максимальную  $F_k$  силу, и электронного устройства, реализующего зависимость  $F_k = f(\delta)$ . При этом реализуется уравнение вида:

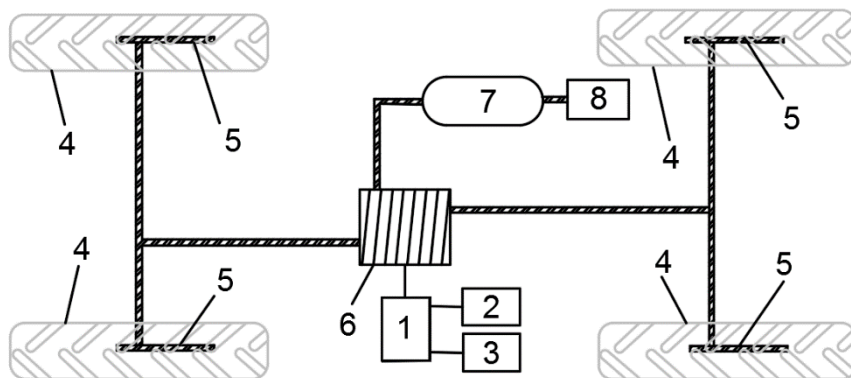
$$\frac{\partial F_k}{\partial \delta} \rightarrow 0.$$

Второй путь требует установки датчиков теоретической  $V_T = \omega \cdot r_k$  и действительной  $V_d = V_T \cdot (1 - \delta)$  скорости движения трактора (рисунок 8). При этом реализуется уравнение вида:

$$\frac{\partial \delta}{\partial F_k} \rightarrow \infty.$$

На рисунке 10 показан один из вариантов предлагаемой системы автоматического регулирования давления воздуха в шинах мобильных машин.

Воздух от компрессора 1 подается в ресивер 4, из которого при помощи шинного клапана 5, управляемого электронным блоком 9, непосредственно в шину. Управление давлением воздуха в шинах осуществляется электронным блоком по сигналам от датчика реальной скорости 7, датчика теоретической скорости 8 и датчиков крутящего момента 6 путем управления шинными клапанами.



- 1 – электронный блок; 2 – датчик крутящего момента; 3 – датчик буксования;  
 4 – колесо; 5 – шинный клапан; 6 – распределитель воздуха;  
 7 – ресивер; 8 – компрессор

Рисунок 10 – Принципиальная схема системы автоматического регулирования давления воздуха в шинах

## **Заключение**

1. Установлено, что регулирование давления воздуха в шинах мобильных машин влияет на их тягово-сцепные свойства.

2. Ручное регулирование обладает рядом недостатков при движении машины на различных грунтовых поверхностях, когда требуется быстрое изменение давления.

3. Возможно создать систему регулирования давления, которая обеспечивает автоматическое регулирование давления в шинах в зависимости от дорожных условий.

## **Литература**

1. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. – М.: Машиностроение, 1981 – 232 с., ил.

2. Бабков В.Ф. Проходимость колесных машин по грунту / В.Ф. Бабков, А.К. Бируля, В.М. Сиденко. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 189 с., ил.

3. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность-машина. Ч. I. Местность. Ч. II. Машина. Пер. с англ. Гуськова В.В. М.: Машиностроение. 1973. – 520 с., ил.

4. Гуськов В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В.В.Гуськов. – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с., ил.

5. Гуськов В.В. Тракторы: Теория / В.В. Гуськов, Н.Н. Велев, Ю.Е. Атаманов и др.; Под общ. ред. В. В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с., ил.

6. Кацыгин В.В. Некоторые вопросы деформации почв. «Вопросы сельскохозяйственной механики», Т. XIII. – Минск: Сельхозгиз, 1964. – с. 117...185.

7. Колобов Г. Г., Парфенов А. П. Тяговые характеристики тракторов. М.: «Машиностроение», 1972. – 157 с., ил.