

*На правах рукописи*

**ЛЕЩЕНКО Евгения Анатольевна**



**СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ТРАНСПОРТНЫХ  
РАБОТАХ УСТАНОВКОЙ РАЦИОНАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ  
ВОЗДУХА В ШИНАХ КОЛЕСНЫХ ТРАКТОРОВ  
(НА ПРИМЕРЕ ТРАКТОРА МТЗ-82)**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2014

Работа выполнена на кафедре «Безопасность жизнедеятельности»  
ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Богданов Андрей Владимирович**

Официальные оппоненты: **Келлер Андрей Владимирович**,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Колесные, гусеничные  
машины и автомобили» ФГБОУ ВПО  
«Южно-Уральский государственный  
университет (Национальный  
исследовательский университет)

**Строганов Юрий Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Эксплуатация  
машинно-тракторного парка»  
ФГБОУ ВПО «Уральский государственный  
аграрный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный аграрный университет»

Защита состоится «2» июля 2014 г., в 12.30 часов на заседании  
диссертационного совета Д 220.069.01 на базе ФГБОУ ВПО «Челябин-  
ская государственная агроинженерная академия» по адресу: 454080,  
г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия»  
<http://www.csaa.ru>.

Автореферат разослан «30» апреля 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета



Плаксин  
Алексей Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из главных факторов, определяющих показатели производства сельскохозяйственной продукции, является уровень эффективности механизированных работ, часть из которых занимают транспортные работы. Они в основном осуществляются по твердым дорогам (укатанные грунтовые, заснеженные дороги и т.д.). По статистике, доля использования тракторов (например, МТЗ-82) на транспортных работах составляет до 60%. Для увеличения тяговых свойств и повышения безопасности движения, особенно в зимний период, рекомендуется использовать заблокированный привод ведущих мостов трактора МТЗ-82. Но в этом случае может возникать кинематическое несоответствие между колесами ведущих осей, приводящее к появлению «паразитной» мощности, циркулирующей в трансмиссии. Повышенный износ шин, поломка отдельных элементов трансмиссии, повышенный расход топлива также могут быть следствием кинематического несоответствия.

Эффективным путем устранения кинематического несоответствия является установка давлений воздуха в шинах, влияющих на радиусы качения колес, с учетом условий эксплуатации. Давления, рекомендуемые в справочной литературе для транспортных работ, как правило, не учитывают используемые на тракторе модели шин и перераспределение нагрузок по его осям, главным образом зависящих от загрузки прицепа. Как показывают ранее проведенные исследования, установка давлений в зависимости от эксплуатационных условий может снизить расход топлива до 15%. Но данные исследования в основном рассматривают колесные машины с шинами равного размера, хотя в сельском хозяйстве используются тракторы с различными размерами шин ведущих мостов.

Поэтому исследования, направленные на повышение топливной экономичности тракторов путем устранения кинематического несоответствия за счет обеспечения рациональных давлений воздуха в шинах, учитывающих эксплуатационные условия, являются важной научно-технической задачей.

Актуальность темы подтверждается Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2008–2012 годы,

целевой программой «Развитие сельского хозяйства» в Челябинской области на 2009–2012 годы.

**Целью исследования** является снижение расхода топлива при выполнении транспортных работ на твердых опорных поверхностях колесными тракторами с заблокированным приводом ведущих мостов путем выбора рациональных давлений воздуха в шинах.

**Задачи исследования:**

1. Рассмотреть закономерности влияния давления воздуха в шинах на расход топлива колесных тракторов с заблокированным приводом ведущих мостов при выполнении транспортных работ и разработать математическую модель определения рациональных давлений воздуха в их шинах.

2. Обосновать и разработать устройство для регулирования и автоматического поддержания давления воздуха в шинах колесных машин.

3. Провести экспериментальную проверку разработанной математической модели определения рациональных давлений воздуха в шинах и дать экономическую оценку результатов исследования.

**Объектом исследования** является процесс движения трактора с заблокированным приводом ведущих мостов в составе тракторно-транспортного агрегата по твердым опорным поверхностям.

**Предмет исследования:** закономерности влияния давления воздуха в шинах на расход топлива колесного трактора при выполнении транспортных работ.

**Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:**

– разработана математическая модель определения рациональных давлений воздуха в шинах, обеспечивающих наименьший расход топлива при движении колесных машин (тракторов) с заблокированным приводом ведущих мостов по твердым опорным поверхностям, которая учитывает распределение реакций опорной поверхности по колесам различных осей и модели установленных шин;

– получена система, позволяющая определить основные параметры разработанного устройства для регулирования и автоматического поддержания давления воздуха в шинах колесных машин;

– установлена экспериментальная зависимость, подтверждающая адекватность математической модели определения рациональных давлений воздуха в шинах колесных машин.

**Практическая значимость.** Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать рациональные давления воздуха в шинах

для конкретных эксплуатационных условий. На ее основе возможен выбор моделей шин, соответствующих колесной машине (трактору).

Конструкция разработанного устройства для установки и автоматического поддержания давления воздуха в шинах позволяет оперативно регулировать давление в зависимости от условий эксплуатации. Полученная система дает возможность рассчитать основные параметры устройства для его изготовления. Данное устройство может монтироваться непосредственно на колеса большинства мобильных машин.

Результаты исследования дают возможность снизить расход топлива при движении колесных машин (тракторов) при выполнении транспортных работ. Они могут быть использованы инженерно-эксплуатационными службами сельскохозяйственных и других предприятий, вузами, научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями при разработке и совершенствовании моделей шин и конструкций колесных машин (тракторов).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и были одобрены на ежегодных международных научно-технических конференциях ЧГАА (г. Челябинск, 2011–2014 гг.), всероссийской конференции с международным участием ЮУрГУ (г. Челябинск, 2011 г.), международной научно-практической конференции ЮУрГУ (г. Челябинск, 2012 г.).

**Публикации.** Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 7 работах, из них 3 работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, получены патент на полезную модель и авторское свидетельство на программу для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 11 таблиц, 39 рисунков, состоит из введения, пяти глав, выводов и рекомендаций, 11 приложений. Список использованной литературы включает в себя 121 наименование.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, его практическая значимость, научная новизна основных положений, выносимых на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» проанализированы труды по вопросу движения колесной машины (трактора) с заблокированным приводом ведущих мостов по твердым опорным поверхностям Е. А. Чудакова, В. А. Петрушова, В. И. Кнороза, Г. А. Смирнова, Ю. А. Коцаря, К. А. Зеленова, Ю. Г. Горшкова, А. В. Богданова и др. Основным недостатком заблокированного привода является возникновение кинематического несоответствия между колесами ведущих осей. Оно приводит к появлению «паразитной» мощности в трансмиссии, оказывающей отрицательное влияние на топливную экономичность. Величина «паразитной» мощности может составлять 10...15% от мощности двигателя, а иногда и превышать ее. Кроме того, кинематическое несоответствие приводит к повышенному износу деталей трансмиссии и шин, снижению устойчивости движения и др. Анализ известных путей устранения кинематического несоответствия показал, что наиболее перспективным является выбор рационального давления воздуха в шинах, так как от давления зависят радиусы качения колес.

Имеющиеся в настоящее время зависимости для определения рациональных давлений воздуха в шинах не в полной мере учитывают эксплуатационные условия (распределение нагрузок по колесам) и применимы лишь для машин с одинаковыми колесами (размеры и модели шин и т.д.). Также проблематична оперативная установка и автоматическое поддержание давлений во время эксплуатации, так как существующие для этого системы имеют или сложную дорогостоящую конструкцию, или не дают возможности оперативной регулировки требуемых давлений.

Проведенный анализ работ показывает, что необходимо дальнейшее исследование взаимосвязи кинематического несоответствия между колесами ведущих мостов и давлений воздуха в шинах. В связи с этим была выдвинута **научная гипотеза**: снижение расхода топлива при движении трактора по твердым опорным поверхностям возможно устранением кинематического несоответствия между колесами ведущих осей путем обеспечения рациональных давлений воздуха в шинах.

Во второй главе «Теоретические предпосылки к предмету исследования» проведен анализ составляющих потерь энергии при движении колесной машины (трактора) по твердой опорной поверх-

ности и определены те составляющие, которые зависят от давления воздуха в шинах. Также проведен анализ формулы для расчета коэффициента кинематического несоответствия между колесами ведущих осей. В результате получено условие выбора давлений воздуха в шинах с точки зрения минимума потерь энергии на передвижение колесной машины (трактора)

$$\left[ \begin{array}{l} N_{\text{вп}} + N_{\text{вз}} \rightarrow \min \quad \text{при } P_{\text{шп}} + P_{\text{шз}} \rightarrow \max, \\ N_{\text{мп}} + N_{\text{мз}} + N_{\text{бп}} + N_{\text{бз}} + N_{\text{тр}} \rightarrow \min \quad \text{при } \frac{i_3 \cdot r_{\text{кп}}}{i_{\text{п}} \cdot r_{\text{кз}}} \rightarrow 1, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $P_{\text{шп}}, P_{\text{шз}}$  – давление воздуха в шинах передних и задних колес, Па;  
 $N_{\text{вп}}, N_{\text{вз}}$  – мощности, затрачиваемые на нормальную деформацию шин передних и задних колес в результате действия на них вертикальных нагрузок, Вт;

$N_{\text{мп}}, N_{\text{мз}}$  – мощности, затрачиваемые на тангенциальную деформацию шин передних и задних колес в результате приложения к ним крутящих моментов, Вт;

$N_{\text{бп}}, N_{\text{бз}}$  – мощности, теряемые на буксование передних и задних колес, Вт;

$N_{\text{тр}}$  – мощность, расходуемая на механические потери в трансмиссии, Вт;

$i_{\text{п}}, i_3$  – передаточные числа приводов переднего и заднего мостов;

$r_{\text{кп}}, r_{\text{кз}}$  – радиусы качения колес переднего и заднего мостов в ведущем режиме, м.

Известно, что расход топлива  $G_e$  зависит от потерь энергии при движении трактора (колесной машины). Поэтому при снижении суммы мощностей  $N_{\text{вп}} + N_{\text{вз}}$  и суммы мощностей  $N_{\text{мп}} + N_{\text{мз}} + N_{\text{бп}} + N_{\text{бз}} + N_{\text{тр}}$  расход топлива будет уменьшаться. С учетом этого условие (1) примет следующий вид:

$$G_e \rightarrow \min \quad \text{при } \left[ \begin{array}{l} P_{\text{шп}} + P_{\text{шз}} \rightarrow \max, \\ \frac{i_3 \cdot r_{\text{кп}}}{i_{\text{п}} \cdot r_{\text{кз}}} \rightarrow 1. \end{array} \right. \quad (2)$$

Из условия (2) видно, что для снижения расхода топлива необходимо устанавливать максимально возможные значения давлений, но при этом они должны обеспечивать кинематическое соответствие.

При полном отсутствии кинематического несоответствия, исходя из совокупности условий (2), будет наблюдаться следующее равенство:

$$r_{\text{кп}} \cdot i_{\text{к}} = r_{\text{кз}}, \quad (3)$$

где  $i_{\text{к}} = i_3/i_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий передаточное отношение трансмиссии между передними и задними колесами.

Из равенства (3) видно, что обеспечить условие (2) возможно путем изменения радиусов качения колес передней и задней осей. Для установления взаимосвязи между радиусами и давлением воздуха в шинах при отсутствии кинематического несоответствия запишем уравнения радиусов качения на основе известной формулы Е. А. Чудакова:

$$r_{\text{кп}} = r_{\text{кп}}^0 - \lambda_{\text{п}} \cdot M_{\text{п}}; \quad r_{\text{кз}} = r_{\text{кз}}^0 - \lambda_3 \cdot M_3, \quad (4)$$

где  $M_3, M_{\text{п}}$  – моменты, подведенные к задним и передним колесам, Н·м;  
 $r_{\text{кп}}^0, r_{\text{кз}}^0$  – радиусы качения колес передней и задней осей в ведомом режиме, м;

$\lambda_3, \lambda_{\text{п}}$  – тангенциальная эластичность шин задних и передних колес, 1/Н.

Исходя из равенства (3) и уравнений (4), можно записать, что при кинематическом соответствии будет следующее равенство:

$$\left( r_{\text{кп}}^0 - \lambda_{\text{п}} \cdot M_{\text{п}} \right) \cdot i_{\text{к}} = r_{\text{кз}}^0 - \lambda_3 \cdot M_3. \quad (5)$$

После его преобразований получим, что

$$\lambda_{\text{п}} = \lambda_3. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что при отсутствии кинематического несоответствия коэффициенты тангенциальной эластичности шин колес переднего и заднего мостов должны иметь одинаковые значения.

Исследования В. А. Петрушова показали, что на коэффициент тангенциальной эластичности шины  $l_{\text{к}}$  непосредственное влияние оказывают нормальная реакция на колесо  $R_z$  и давление воздуха  $P_{\text{ш}}$



в самой шине, а также характеристические значения  $\lambda_k^*$ ,  $P_k^*$ ,  $G_k^*$ , являющиеся константами для конкретной модели шины:

$$\lambda_k = \lambda_k^* \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{G_k^*}{R_z} \right) \cdot \frac{P_{ш}}{P^*} \right]. \quad (7)$$

Учитывая, что давление воздуха в шине ограничено максимальным  $P_{\max}$  и минимальным  $P_{\min}$  допускаемыми значениями, то, исходя из выражений (7), (2) и (6), получим систему для определения рациональных давлений воздуха в шинах с точки зрения минимума расхода топлива на передвижение колесной машины с любым (от двух и более) числом ведущих мостов:

$$G_e \rightarrow \min \quad \text{при} \quad \begin{cases} P_0 = P_{\max}, \text{ если } R_{z0} \geq R_{zi}, \\ P_i = \frac{\left( 1 - \frac{\lambda_0^*}{\lambda_i^*} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{G_{k0}^*}{R_{z0}} \right) \cdot \frac{P_0}{P_0^*} \right] \right) \cdot P_i^*}{1 - \frac{G_{ki}^*}{R_{zi}}}, \\ 1 - \frac{\lambda_0^*}{\lambda_i^*} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{G_{k0}^*}{R_{z0}} \right) \cdot \frac{P_0}{P_0^*} \right] < 0, \\ P_i = P_{\min}, \text{ если } P_i < P_{\min}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $R_{z0}$  – нормальная реакция опорной поверхности, действующая на колесо наиболее нагруженного моста, Н;

$R_{zi}$  – нормальная реакция опорной поверхности, действующая на колесо менее нагруженного  $i$ -го моста, Н;

$P_0$  – давление воздуха в шинах колес наиболее нагруженного моста, МПа;

$P_i$  – давление воздуха в шинах колес менее нагруженного  $i$ -го моста, МПа;

$\lambda_i^*$ ,  $\lambda_0^*$  – характеристические значения тангенциальной эластичности шин колес менее нагруженного и более нагруженного мостов, являющиеся константами 1/Н;

$G_{ki}^*$ ,  $G_{k0}^*$  – характеристические значения нормальной нагрузки шин колес менее нагруженного и более нагруженного мостов, являющиеся константами, Н;

$P_i^*$ ,  $P_0^*$  – характеристические значения давления воздуха в шинах колес менее нагруженного и более нагруженного мостов, являющиеся константами, МПа.

Анализ системы (8) показывает, что для снижения расхода топлива максимально допускаемое давление  $P_{\max}$  должно быть установлено в шинах более нагруженного моста, а относительно этого давления рассчитаны давления в шинах других менее нагруженных мостов. Знаменатель  $1 - (G_{ki}^*/R_{zi})$  будет всегда отрицательным, так как  $G_k^* > R_{zi}$ . Поэтому выражение

$$1 - \frac{\lambda_0^*}{\lambda_i^*} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{G_{k0}^*}{R_{z0}} \right) \cdot \frac{P_0}{P_0^*} \right]$$

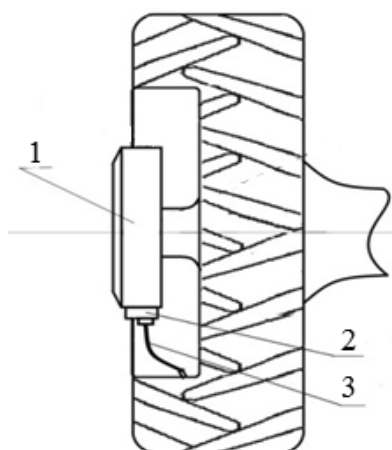
должно быть меньше нуля. В противном случае рекомендуется выбирать марки шин с другими значениями характеристических постоянных  $\lambda_k^*$ ,  $G_k^*$ ,  $P^*$ . Как показали расчеты, для подавляющего большинства колесных тракторов со стандартными шинами разность

$$1 - \frac{\lambda_0^*}{\lambda_i^*} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{G_{k0}^*}{R_{z0}} \right) \cdot \frac{P_0}{P_0^*} \right] < 0.$$

Достоинством полученной математической модели (8) является ее универсальность – возможность рассчитывать рациональные давления воздуха в шинах вне зависимости от их размеров и стандартных моделей. Для расчета рациональных давлений на основе системы (8) создана программа для ЭВМ (свидетельство регистрации № 2013613959).

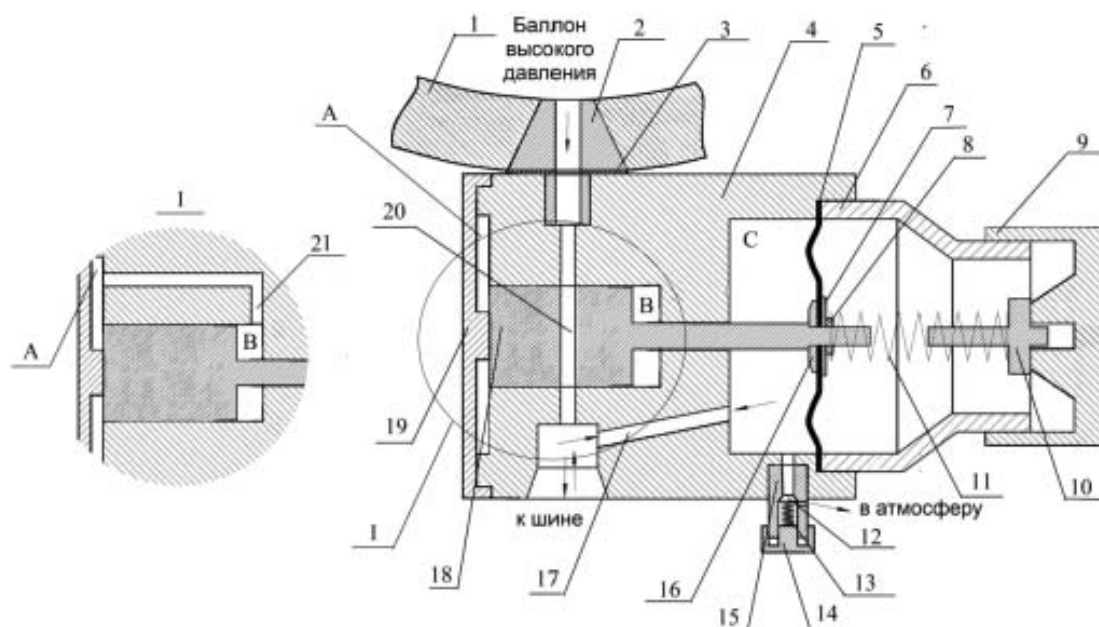
В процессе эксплуатации колесных машин (тракторов) требуется оперативная установка рациональных давлений воздуха в шинах. Поэтому предложено техническое устройство для регулирования и поддержания давления воздуха в шинах колесных машин (рисунок 1).

Значение давления устанавливается с помощью крышек 9 и 14 регулятора (рисунок 2) по нанесенной шкале. Для повышения давления впускной клапан 18 открывает доступ воздуха из баллона высокого давления в шину до тех пор, пока усилие со стороны мембраны 5 не превысит усилие пружины 11. При снижении давления в шине выпускной клапан 12 открывается, и воздух из шины выходит в атмосферу, пока давление не станет равным установленному. Установленное давление автоматически поддерживается во время эксплуатации предложенным регулятором (патент на полезную модель № 2012107514).



1 – баллон высокого давления с клапаном для закачки воздуха; 2 – регулятор давления воздуха; 3 – воздухопровод, соединяющий регулятор давления с вентилем шины

Рисунок 1 – Общий вид установки на колесе регулятора давления воздуха в шинах колесных машин



1 – корпус баллона высокого давления; 2 – переходной штуцер;  
 3 – прокладка переходного штуцера; 4 – основной корпус регулятора;  
 5 – мембрана; 6 – дополнительный корпус регулятора; 7 – шайба; 8 – гайка;  
 9 – регулировочная крышка впускного клапана; 10 – держатель пружины;  
 11 – пружина впускного клапана; 12 – выпускной клапан; 13 – пружина выпускного клапана; 14 – регулировочная крышка выпускного клапана;  
 15 – корпус выпускного клапана; 16 – стопорная шайба; 17 – соединительный канал; 18 – впускной клапан; 19 – крышка основного корпуса регулятора;  
 20 – канал впускного клапана; 21 – перепускной канал

Рисунок 2 – Схема регулятора давления воздуха в шинах колесных машин

Количество воздуха в баллоне высокого давления должно обеспечивать работу устройства без дозаправки в течение одной или более смен. Подача воздуха в шину возможна тогда, когда давление воздуха в баллоне  $P_{\text{бал}}$  будет больше, чем в шине. При выравнивании давлений процесс подкачки становится невозможным, а в баллоне останется определенная масса  $m_{\text{бал}}^{\text{ост}}$  неизрасходованного воздуха. С учетом этого число подкачек  $n_{\text{п}}$  шины без дозаправки баллона высокого давления определится следующим образом:

$$n_{\text{п}} = \frac{m_{\text{бал}} - m_{\text{бал}}^{\text{ост}}}{m_{\text{п}}}, \quad (9)$$

где  $m_{\text{п}}$  – масса воздуха, требуемая для одной подкачки шины, кг;  
 $m_{\text{бал}}$  – общая масса воздуха в баллоне, кг.

Массы воздуха  $m_{\text{бал}}$ ,  $m_{\text{бал}}^{\text{ост}}$ ,  $m_{\text{п}}$  можно определить с помощью уравнения Менделеева-Клайперона. Подставляя их значения в равенство (9) и делая ряд преобразований, получим:

$$\begin{aligned} n_{\text{п}} &= \left( \frac{P_{\text{бал}} V_{\text{бал}} M}{RT} - \frac{P_{\text{ш}}^{\text{max}} V_{\text{бал}} M}{RT} \right) \cdot \frac{RT}{(P_{\text{ш}}^{\text{после}} - P_{\text{ш}}^{\text{до}}) V_{\text{ш}} M} = \\ &= \frac{V_{\text{бал}}}{V_{\text{ш}}} \cdot \frac{P_{\text{бал}} - P_{\text{ш}}^{\text{max}}}{P_{\text{ш}}^{\text{после}} - P_{\text{ш}}^{\text{до}}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $M$  – молярная масса воздуха, кг/моль;  
 $V_{\text{бал}}$  – объем баллона высокого давления, м<sup>3</sup>;  
 $R$  – газовая постоянная ( $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ );  
 $T$  – температура воздуха, К;  
 $P_{\text{ш}}^{\text{max}}$  – максимально используемое давление воздуха в шине, Па;  
 $P_{\text{ш}}^{\text{после}}$  – давление воздуха в шине после подкачки, Па;  
 $P_{\text{ш}}^{\text{до}}$  – давление воздуха в шине до подкачки, Па;  
 $V_{\text{ш}}$  – внутренний объем шины, м<sup>3</sup>.

Внутренний объем шины  $V_{\text{ш}}$ , как правило, не указывается в справочной литературе. Поэтому его расчет можно привести на основе известных размеров шины и второй теоремы Гюльдена.

Тогда объем баллона определится следующим образом:

$$V_{\text{бал}} = \frac{n_{\text{п}} \cdot (P_{\text{ш}}^{\text{после}} - P_{\text{ш}}^{\text{до}})}{P_{\text{бал}} - P_{\text{ш}}^{\text{max}}} \cdot \frac{\pi^2 \cdot (D_{\text{об}} + B - 2 \cdot t_{\text{б}}) \cdot (B - 2 \cdot t_{\text{б}})^2}{4}, \quad (11)$$

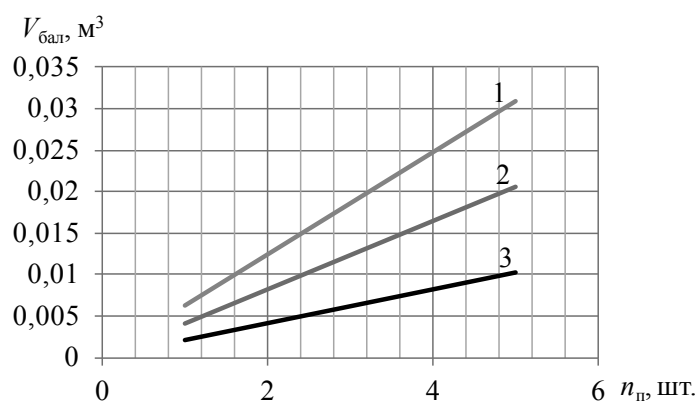
где  $D_{\text{об}}$  – диаметр обода, м;

$B$  – ширина профиля, м;

$t_6$  – толщина стенки боковины шины, м.

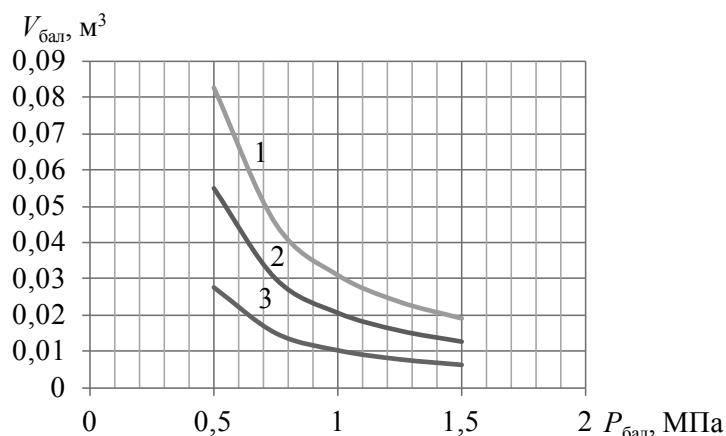
На основе выражения (11) построены кривые изменения объема баллона высокого давления  $V_{\text{бал}}$  от количества подкачек  $n_{\text{п}}$  (рисунок 3) и давления воздуха в нем  $P_{\text{бал}}$  (рисунок 4) при различных значениях  $\Delta P_{\text{ш}} = P_{\text{ш}}^{\text{после}} - P_{\text{ш}}^{\text{до}}$ .

Как видно из рисунков 3 и 4, объем баллона  $V_{\text{бал}}$  изменяется прямо пропорционально количеству подкачек  $n_{\text{п}}$  и обратно пропорционально давлению воздуха в нем  $P_{\text{бал}}$ . Кроме того, с увеличением «порции» воздуха при подкачке шины (разницы между давлениями в шине до и после подкачки  $\Delta P_{\text{ш}} = P_{\text{ш}}^{\text{после}} - P_{\text{ш}}^{\text{до}}$ ) объем высокого давления  $V_{\text{бал}}$  также увеличивается.



1 – при  $\Delta P_{\text{ш}} = 0,06$  МПа; 2 – при  $\Delta P_{\text{ш}} = 0,04$  МПа; 3 – при  $\Delta P_{\text{ш}} = 0,02$  МПа

Рисунок 3 – Зависимость объема баллона  $V_{\text{бал}}$  от количества подкачек  $n_{\text{п}}$  при давлении  $P_{\text{бал}} = 1,0$  МПа



1 – при  $\Delta P_{\text{ш}} = 0,06$  МПа; 2 – при  $\Delta P_{\text{ш}} = 0,04$  МПа; 3 – при  $\Delta P_{\text{ш}} = 0,02$  МПа

Рисунок 4 – Зависимость объема баллона  $V_{\text{бал}}$  от давления воздуха в нем  $P_{\text{бал}}$  при числе подкачек  $n_{\text{п}} = 5$

С учетом выражения (11) и известных соотношений можно записать следующую систему для расчета основных параметров устройства:

$$\begin{cases} V_{\text{бал}} = \frac{n_{\text{п}} \cdot (P_{\text{ш}}^{\text{после}} - P_{\text{ш}}^{\text{до}})}{P_{\text{бал}}} \cdot \frac{\pi^2 \cdot (D_{\text{об}} + B - 2 \cdot t_{\text{б}}) \cdot (B - 2 \cdot t_{\text{б}})^2}{4}, \\ P_{\text{ш}} \cdot S_{\text{кл}} - k_{13} \cdot x_{13} = 0, \\ P_{\text{ш}} \cdot S_{\text{мем}} - k_{11} \cdot x_{11} = 0, \\ x_{11} > d_{20}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $P_{\text{ш}}$  – давление воздуха в шине (в полости С), Па;

$S_{\text{мем}}$  – площадь мембраны, м<sup>2</sup>;

$k_{11}$  – жесткость пружины впускного клапана, Н/м;

$x_{11}$  – величина удлинения (сжатия) пружины впускного клапана, м;

$d_{20}$  – диаметр канала впускного клапана, м;

$S_{\text{кл}}$  – площадь рабочего основания выпускного клапана, м<sup>2</sup>;

$k_{13}$  – жесткость пружины выпускного клапана, Н/м;

$x_{13}$  – величина удлинения (сжатия) пружины выпускного клапана, м.

Таким образом, на основе системы уравнений (12) можно определить основные параметры устройства для регулирования и поддержания давления воздуха в шинах колесных машин.

**В третьей главе «Методика экспериментальных исследований»** приводится разработанная методика, необходимые приборы и оборудование.

Целью проводимых экспериментальных исследований является проверка основных положений теоретического анализа – математической модели (8) для определения рациональных давлений воздуха в шинах колесных машин при движении с заблокированным приводом ведущих мостов по твердым опорным поверхностям, а также системы (12) для расчета основных параметров устройства для регулирования и поддержания давления воздуха в шинах.

Для этого были проведены экспериментальные исследования с транспортно-тракторным агрегатом (ТТА) – трактор МТЗ-82 с прицепом 2 ПТС-4.

Давления воздуха в шинах будут рациональными, если они обеспечат минимальный расход топлива. Поэтому за критерий правиль-

ности выбора давлений был определен расход топлива трактором. В каждой серии экспериментов реакции опорной поверхности на колеса передней и задней осей трактора менялись путем различной загрузки прицепа: 0, 25, 50, 75 и 100% от номинальной грузоподъемности. Во время одной серии экспериментов изменялось только давление воздуха в шинах передних колес и измерялся расход топлива (при прочих равных условиях). Скорость движения (30 км/ч, IX передача) и реакции опорной поверхности на колеса оставались постоянными.

Для проверки адекватности математической модели (8) и системы (12) были решены основные задачи:

- проведены экспериментальные исследования для различных распределений реакций опорной поверхности по колесам переднего и заднего мостов трактора в зависимости от изменения загрузки прицепа;

- проведены измерения расхода топлива при изменении давления воздуха в шинах для определенного распределения реакций опорной поверхности по колесам переднего и заднего мостов трактора (для определенной загрузки прицепа);

- найдены рациональные значения давления воздуха в шинах для определенного распределения реакций опорной поверхности по колесам переднего и заднего мостов трактора, соответствующие минимальному расходу топлива;

- проконтролировано давление воздуха в шинах трактора при работе предлагаемого устройства для установки и поддержания давления воздуха в шине.

На внутривладельческих перевозках ТГА выполняет, как правило, не более 5 рейсов за смену. Поэтому для расчетов основных элементов устройства по системе (12) можно принять  $n_{\text{п}} = 5$ . Также было принято, что  $\Delta P_{\text{ш}} = P_{\text{ш}}^{\text{после}} - P_{\text{ш}}^{\text{до}} = 0,07$  МПа и  $P_{\text{бал}} = 1$  МПа. С учетом этого для шины Ф-165 (11,2R20) переднего колеса трактора МТЗ-82 был рассчитан объем баллона высокого давления, который составил  $0,036 \text{ м}^3$  (диаметр 0,45 м и высота 0,22 м). Также определена толщина стенки баллона (3,1 мм) и выбраны пружины для впускного и выпускного клапанов.

В четвертой главе «*Результаты экспериментальных исследований*» приведены данные, которые обрабатывались с помощью известных методик и системы Excel. По результатам экспериментов

каждой серии составлены уравнения регрессии и построены графики изменения расхода топлива от давления воздуха  $P_{\text{п}}$  в шинах передней оси трактора МТЗ-82. В качестве примера на рисунке 5 приведен график для 50-процентной загрузки прицепа.

Из рисунка 5 видно, что при давлении воздуха в шинах передних колес, равном 0,14 МПа, наименьший расход топлива – 10,05 кг/ч. При этом уравнение регрессии имеет вид:

$$G_e^{50\%} = 109,4 \cdot P_{\text{п}}^2 - 29,483 \cdot P_{\text{п}} + 12,036, \quad (13)$$

где  $G_e^{50\%}$  – расход топлива при 50-процентной загрузке прицепа, кг/ч.

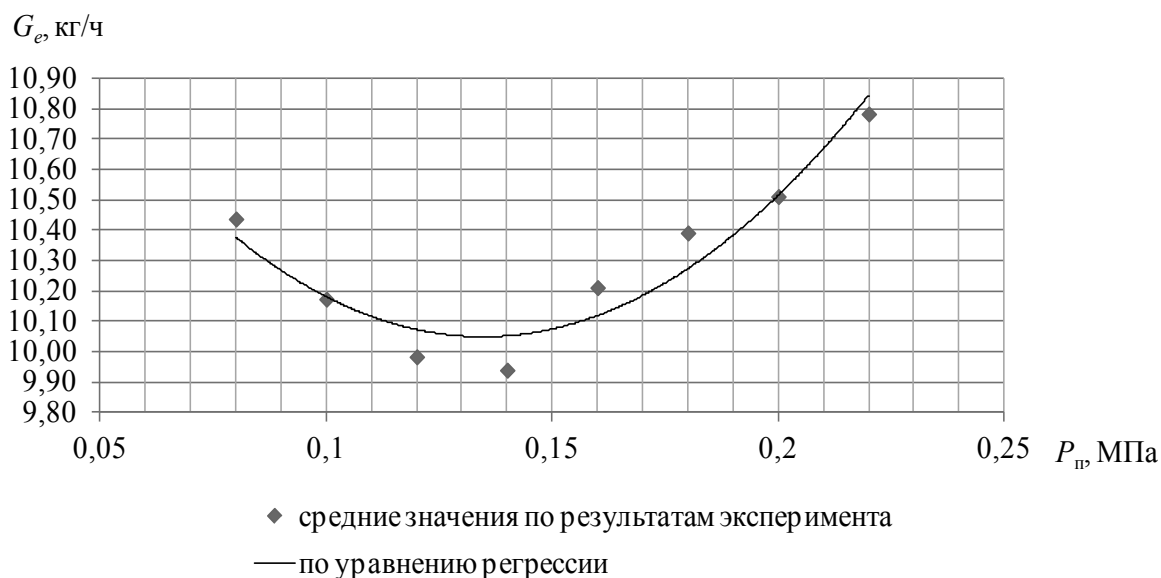


Рисунок 5 – Зависимость расхода топлива  $G_e$  от давления в шине переднего колеса  $P_{\text{п}}$  (загрузка прицепа на 50%: распределение реакций опорной поверхности на переднее колесо  $R_{\text{зп}} = 5542$  Н и заднее колесо  $R_{\text{зз}} = 13\ 615$  Н)

В целом, в каждой серии экспериментов имеются рациональные давления воздуха в шинах, при которых наблюдается наименьший расход топлива. Нужно отметить, что при изменении давлений воздуха в шинах в ту или иную сторону от рациональных значений расход топлива может увеличиваться до 13%. Результаты по определению рациональных давлений воздуха в шинах трактора МТЗ-82 для всех серий экспериментов сведены в таблицу 1. По результатам регрессионного анализа была выведена экспериментальная зависимость определения рациональных давлений возду-



ха в шине  $P_{\text{п рац}}^3$  от изменения реакции опорной поверхности на переднее колесо  $R_{\text{зп}}$ :

$$P_{\text{п рац}}^3 = 79,54 \cdot 10^{-10} \cdot R_{\text{зп}}^2 - 36,63 \cdot 10^{-6} \cdot R_{\text{зп}} + 0,0921. \quad (14)$$

Таблица 1 – Рациональные значения давлений воздуха в шинах по результатам экспериментов в зависимости от распределения реакций опорной поверхности по колесам трактора МТЗ-82

Транспортно-тракторный агрегат	Реакция опорной поверхности на переднее колесо $R_{\text{зп}}$ , Н	Реакция опорной поверхности на заднее колесо $R_{\text{зз}}$ , Н	Рациональное давление в шине заднего колеса, МПа	Рациональное давление в шине переднего колеса, МПа
Трактор с пустым прицепом (загрузка 0%)	6163	13336	0,17	0,17
Трактор с прицепом, загруженным на 25 %	5884	13615	0,17	0,16
Трактор с прицепом, загруженным на 50 %	5542	13957	0,17	0,14
Трактор с прицепом, загруженным на 75 %	5136	14363	0,17	0,11
Трактор с прицепом, загруженным на 100 %	4668	14831	0,17	0,10

На основе экспериментальной (14) и теоретической (8) зависимостей построены кривые (рисунок 6). Они показывают, что с возрастанием нормальной реакции опорной поверхности на колесо значение рационального давления воздуха в шинах передней оси повышается. Расхождения между кривыми не более 10%, что подтверждает адекватность математической модели (8).

Для оценки эффективности использования предлагаемых рациональных давлений были проведены сравнительные эксперименты. Результаты (таблица 2) показывают, что наименьший расход топлива наблюдается при движении трактора с двумя ведущими мостами и предлагаемыми рациональными давлениями воздуха в его шинах.

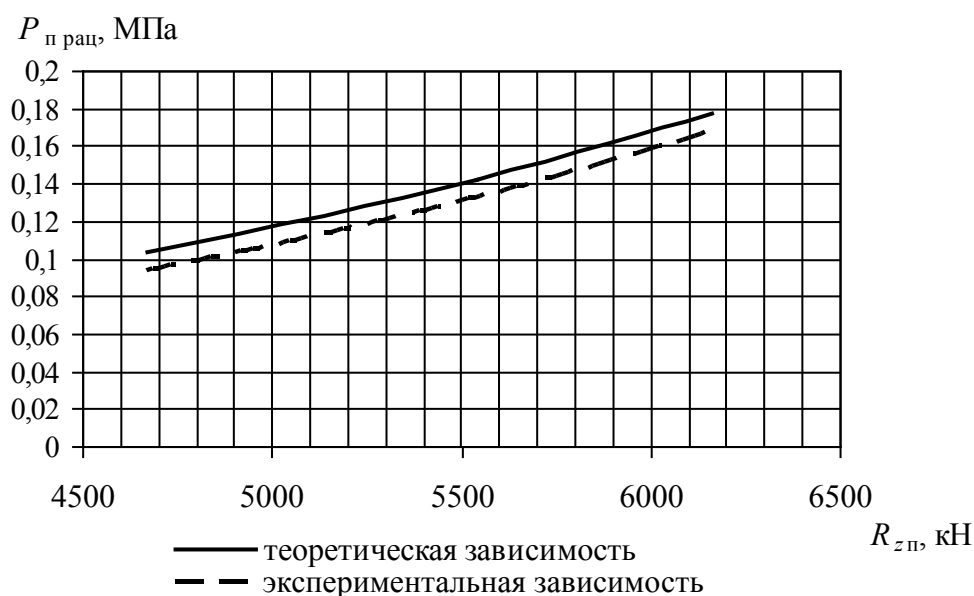


Рисунок 6 – Зависимость изменения рационального значения давления воздуха в шине от изменения реакции опорной поверхности на колесо

Таблица 2 – Результаты сравнительных экспериментов

Транспортно-тракторный агрегат		Трактор с пустым прицепом (загрузка 0%)	Трактор с прицепом, нагруженным на 50%	Трактор с прицепом, нагруженным на 100%	
1		2	3	4	
Реакции опорной поверхности на переднее колесо $R_{оп}$ , Н		6163	5542	4668	
Реакции опорной поверхности на заднее колесо $R_{з3}$ , Н		13 336	13 957	14 831	
Расход топлива при рациональных давлениях воздуха в шинах (движение трактора с заблокированным приводом ведущих мостов), кг/ч	$P_3 = 0,17$ МПа	сухая дорога	9,17 ( $P_n = 0,168$ МПа)	10,51 ( $P_n = 0,138$ МПа)	10,80 ( $P_n = 0,095$ МПа)
		заснеженная дорога	9,52 ( $P_n = 0,168$ МПа)	10,87 ( $P_n = 0,138$ МПа)	11,12 ( $P_n = 0,095$ МПа)

## Окончание таблицы 2

1			2	3	4
Расход топлива при давлениях воздуха в шинах, предлагаемых в справочной литературе, кг/ч	$P_n = 0,16$ МПа, $P_3 = 0,14$ МПа	сухая дорога	9,54	11,25	12,24
		заснеженная дорога	10,04	11,97	12,71

На основе данных таблицы 2 получены зависимости изменения расхода топлива от загрузки прицепа при движении на сухой и заснеженной поверхностях:

$$G_e^{\text{спр}} = -0,0001 \cdot Z^2 + 0,0414 \cdot Z + 9,54, \quad (15)$$

$$G_e^{\text{рац}} = -0,0002 \cdot Z^2 + 0,0373 \cdot Z + 9,17, \quad (16)$$

$$G_e'^{\text{спр}} = -0,0002 \cdot Z^2 + 0,038 \cdot Z + 9,52, \quad (17)$$

$$G_e'^{\text{рац}} = -0,0002 \cdot Z^2 + 0,0505 \cdot Z + 10,04, \quad (18)$$

где  $G_e^{\text{спр}}$ ,  $G_e'^{\text{спр}}$  – расход топлива при движении, соответственно, по сухой и заснеженной поверхности с давлениями воздуха в шинах, предлагаемыми в справочной литературе (движение трактора с одним ведущим мостом), кг/ч;

$G_e^{\text{рац}}$ ,  $G_e'^{\text{рац}}$  – расход топлива при движении, соответственно, по сухой и заснеженной поверхности с рациональными давлениями воздуха в шинах (движение трактора с заблокированным приводом ведущих мостов), кг/ч;

$Z$  – загрузка прицепа, %.

По уравнениям (15), (16), (17) и (18) построены кривые изменения расхода топлива при движении по сухой и заснеженной поверхности (рисунки 7 и 8).

Кривые (рисунки 7 и 8) показывают, что при движении трактора с двумя ведущими мостами и рациональными давлениями воздуха в его шинах экономия топлива составляет примерно от 4 до 12 % (для сухой поверхности) и от 6 до 13 % (для заснеженной поверхности).

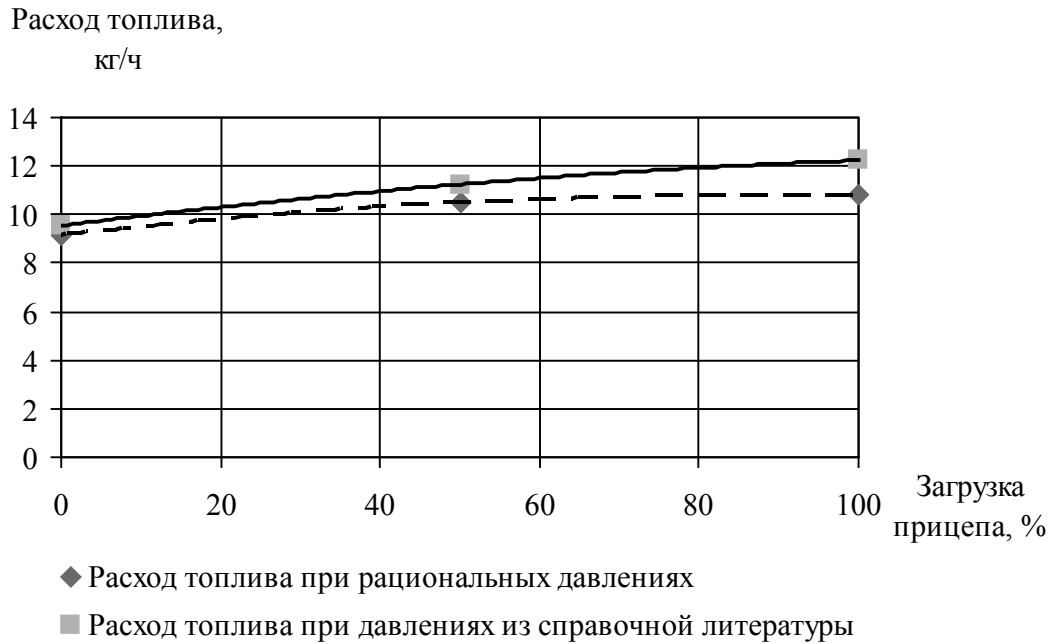


Рисунок 7 – Зависимость изменения расхода топлива от загрузки прицепа при движении по сухой твердой опорной поверхности

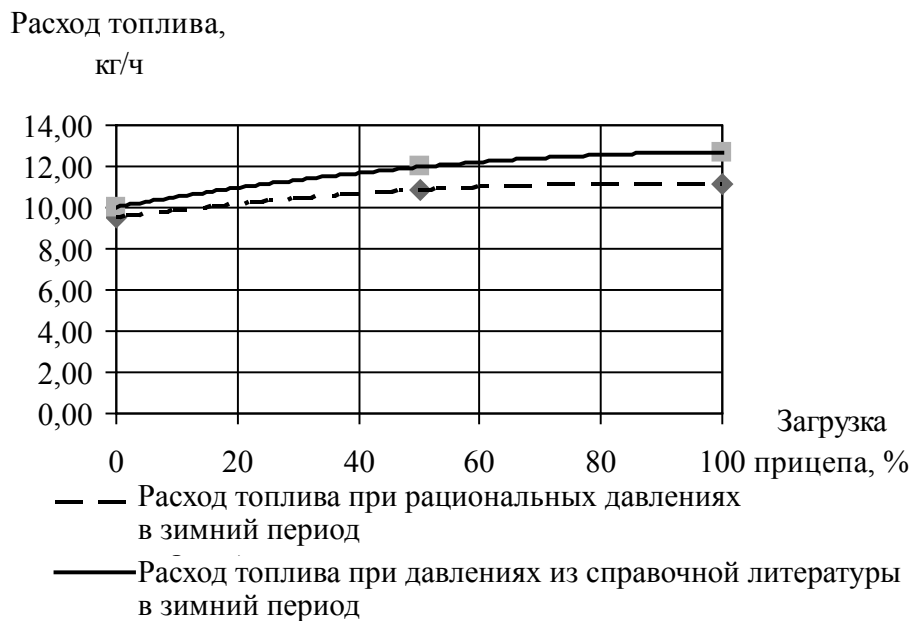


Рисунок 8 – Зависимость изменения расхода топлива от загрузки прицепа при движении по заснеженной опорной поверхности

Также проверялась работа устройств для установки и автоматического поддержания давления воздуха в шинах передних колес МТЗ-82, которые должны обеспечивать рациональное давление после каждой из пяти подкачек (таблица 3).

Таблица 3 – Средние значения результатов измерений давления воздуха в шинах трактора МТЗ-82 после пятой и шестой подкачек

№ опыта	Расположение колеса трактора по ходу движения	Среднее значение максимального давления воздуха в шине после пятой подкачки, МПа	Среднее значение максимального давления воздуха в шине после шестой подкачки, МПа
1	Правое переднее колесо	0,17	0,15
	Левое переднее колесо	0,17	0,14
2	Правое переднее колесо	0,17	0,16
	Левое переднее колесо	0,17	0,15
3	Правое переднее колесо	0,17	0,13
	Левое переднее колесо	0,17	0,16
4	Правое переднее колесо	0,17	0,16
	Левое переднее колесо	0,17	0,16
5	Правое переднее колесо	0,17	0,15
	Левое переднее колесо	0,17	0,13

Как видно из таблицы 3, устройства обеспечивают максимальные рациональные давления воздуха после пятой подкачки в передних шинах трактора. Это подтверждает правильность расчетов, а значит, и системы (12).

В пятой главе «Оценка экономической эффективности» показано, что использование предложенных рациональных давлений с применением разработанного устройства для регулирования и поддержания давления воздуха в шинах за счет снижения расхода топлива дает годовой экономический эффект на один трактор около 13 700 рублей.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ движения колесных машин (тракторов) с заблокированным приводом ведущих мостов по твердым опорным поверхностям показал, что возникающее кинематическое несоответствие между колесами ведущих осей делает использование заблокированного привода неэффективным. Наиболее действенным способом устранения кинематического несоответствия является установка рациональных давлений воздуха в шинах.

2. Определена совокупность условий выбора давлений воздуха в шинах, которая подтверждает, что наименьший расход топлива у машин с заблокированным приводом ведущих осей будет при установке максимально возможных значений давления в шинах, но при этом они должны обеспечивать кинематическое соответствие.

3. Разработана математическая модель с программным обеспечением (свидетельство Роспатента № 2013613959) для определения рациональных давлений воздуха в шинах многоосных колесных машин вне зависимости от размеров и моделей шин. Рациональные давления позволят обеспечить наименьшие затраты энергии при движении по твердым дорогам и рассчитываются в зависимости от реакций опорной поверхности на колеса различных осей и величин  $G_k^*$ ,  $\lambda_k^*$ ,  $P^*$ , являющихся константами для конкретной модели шины.

4. Обосновано и разработано устройство для установки и автоматического поддержания давления воздуха в шинах колесных машин, позволяющее оперативно устанавливать его значение с точностью  $\pm 10$  кПа посредством имеющегося регулятора (патент на полезную модель № 121775). Объем баллона высокого давления устройства, рассчитанный на основе полученной системы уравнений и равный  $0,036$  м<sup>3</sup>, обеспечивает 5 подкачек шины за одну рабочую смену без его дозаправки при начальном давлении воздуха в нем 1 МПа.

5. Экспериментальными исследованиями установлено, что для различных распределений реакций опорной поверхности на колеса передней и задней осей трактора МТЗ-82 при изменении давлений воздуха в шинах расход топлива изменяется до 13%. Так, для реакций опорной поверхности на колеса передней 4668 Н и задней 14 831 Н осей трактора наименьшему расходу топлива 10,80 кг/ч соответствовали рациональные давления в шинах переднего моста 0,095 МПа, в шинах заднего моста – 0,17 МПа.

6. Полученная на основе экспериментов зависимость соответствует разработанной математической модели определения рациональных давлений воздуха в шинах (расхождение не более 10%). Результаты сравнительных экспериментов показали, что при работе с предлагаемыми давлениями воздуха в шинах расход топлива снижается до 13% по сравнению с давлениями, рекомендуемыми в справочной литературе.

7. Использование рациональных давлений на тракторе МТЗ-82 с применением устройства для установки и автоматического поддержания давления воздуха в шинах дает годовой экономический эффект от экономии топлива около 13 700 руб. на одну машину.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Богданов, А. В. Обоснование параметров устройства для поддержания заданного давления воздуха в шинах колесных машин [Текст] / А. В. Богданов, Ю. Б. Четыркин, Е. А. Лещенко // Аграрный вестник Урала. – 2012. – № 11. – С. 44–46.

2. Горшков, Ю. Г. Определение рационального давления воздуха в шинах колесного трактора [Текст] / Горшков Ю. Г., Богданов А. В., Четыркин Ю. Б., Лещенко Е. А. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 11. – С. 25–26.

3. Горшков, Ю. Г. Устройство для регулирования давления воздуха в шинах колесных машин [Текст] / Горшков Ю. Г., Богданов А. В., Четыркин Ю. Б., Лещенко Е. А. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 10. – С. 17–19.

### **Публикации в других изданиях**

4. Богданов, А. В. Повышение экономичности и устойчивости движения колесных тракторов с заблокированным приводом ведущих мостов [Текст] / А. В. Богданов, Е. А. Лещенко // Материалы LI международного науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2013. – Ч. VI. – С. 110–114.

5. Горшков, Ю. Г. Определение рациональных давлений воздуха в шинах колесных машин (тракторов) при выполнении транспортных работ [Текст] / Ю. Г. Горшков, А. В. Богданов, Ю. Б. Четыркин, Е. А. Лещенко // Вестник ЧГАА. – 2012. – Т. 61. – С. 26–30.

6. Лещенко, Е. А. Обоснование устройства для регулирования и автоматического поддержания рационального давления воздуха в шинах колесных тракторов на транспортных работах [Текст] / Е. А. Лещенко // Материалы LI международного науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2012. – Ч. VI. – С. 58–62.

7. Лещенко, Е. А. Устранение кинематического несоответствия установкой рациональных давлений воздуха в шинах колесных тракторов [Текст] / Е. А. Лещенко // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии : Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. – Челябинск : ЮУрГУ, 2012. – Т. 1. – С. 204–206.

**Авторские свидетельства, патенты**

1. Пат. на пол. мод. 121775 Российская Федерация. Регулятор давления в шинах колесных машин [Текст] / Ю. Г. Горшков, А. В. Богданов, Е. А. Лещенко [и др.]. – № 2012107514 ; заявл. 28.02.2012 ; опубл. 10.11.2012.

2. Св-во о регистрации Российская Федерация. Расчет рационального давления воздуха в шинах колесных машин [Текст] / Е. А. Лещенко, Ю. Б. Четыркин. – № 2013613959 ; зарегистрировано 22.04.2013.

---

Подписано в печать 18.04.2014. Формат 60×84/16  
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 85

---

Отпечатано в ИПЦ ФГБОУ ВПО ЧГАА  
454080, г. Челябинск, ул. Энгельса, 83