

На правах рукописи



Перегудов Николай Евгеньевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПЛОТНЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО
ТРАКТОРА НА ПОЧВУ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЕГО ОЦЕНКИ**

Специальность 05.20.01 - Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск – наукоград, 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ЛГТУ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент

Носов Сергей Владимирович

Официальные
оппоненты:

Золотаревская Дина Исааковна,

доктор технических наук, профессор, академик РАЕ, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева», кафедра высшей математики, профессор

Поливаев Олег Иванович,

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», кафедра «Тракторы и автомобили», заведующий

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «1» апреля 2016 года в 10 часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.041.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, зал заседаний диссертационных советов; тел/факс: 8 (47545) 9-44-12; e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ и на сайте www.mgau.ru, с авторефератом - на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации www.vak.ed.gov.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью организации, просим направлять в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан «____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Н.В. Михеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Потребность в увеличении объемов производства сельскохозяйственных культур повышается в связи с ростом численности населения, расширением ассортимента продуктов питания, увеличением поголовья животных.

В настоящее время при возделывании и уборке сельскохозяйственных культур почвенный слой подвергается неоднократному воздействию со стороны движителей машинно-тракторных агрегатов во время обработки почвы, посева, внесения удобрений, мероприятий по борьбе с сорняками и т.д., что приводит к его излишнему уплотнению и отрицательно сказывается на урожайности, а также эксплуатационных качествах и свойствах машин - снижается их производительность вследствие повышения сопротивления обработке, возрастает расход топлива.

Уплотненная почва интенсивнее испаряет влагу, ухудшает газообмен с атмосферой. Кроме того, высокая плотность почвы препятствует нормальному развитию агрокультур и одновременно является благоприятной средой для роста сорняков.

Поэтому в настоящее время актуальной задачей является разработка и применение более эффективных способов и средств выполнения технологических процессов при производстве сельскохозяйственной продукции, снижающих уплотнение почвы и позволяющих повысить урожайность возделываемых культур.

Степень разработанности темы. Изучению влияния движителей сельскохозяйственных машин на изменение свойств почв и урожайность возделываемых культур посвящены работы многих авторов: Я.С. Агейкина, В.Я. Аниловича, А.С. Антонова, М. Беккера, И.И. Водяника, Д. Вонга, В.П. Горячкина, В.В. Гуськова, Е.Н. Докучаевой, В.А. Желиговского, Н.А. Забавникова, А.Н. Зеленина, Д.И. Золотаревской, В.В. Кацыгина, И.П. Ксеновича, Г.М. Кутькова, В.П. Лапика, М.Н. Летошнева, М.И. Ляско, М.Е. Мацепуро, С.Р. Месчана, А.Ф. Полетаева, О.И. Поливаева, В.А. Русанова, В.А. Скотникова и др. Данные, накопленные ими в ходе многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, имеют важное хозяйственное значение. Однако при оценке уплотняющего воздействия движителей гусеничных машин на почвенный слой остаются нерешенными вопросы учета изменения во времени его физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния.

Цель работы - разработка метода оценки уплотняющего воздействия гусеничного движителя на слой почвы с учетом изменения во времени его физико-механических характеристик, позволяющего повысить эффективность функционирования существующих и прогнозировать показатели работы новых сельскохозяйственных машин при снижении трудоемкости и повышении точности производимых расчетов.

Задачи исследований:

1. Разработать математическую модель процесса взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы;
2. Провести штамповые испытания слоя почвы для исследования его физико-механических характеристик;
3. Теоретически и экспериментально исследовать процесс развития деформаций под траком и получить закономерности изменения плотности почвы после прохода гусеничного трактора;
4. Разработать метод оценки уплотняющего воздействия гусеничного движителя на слой почвы;
5. Разработать рекомендации по определению рациональных режимов работы гусеничного трактора при выполнении различных сельскохозяйственных операций (культивация, посев и др.) и оценить экономическую эффективность их внедрения.

Объект исследования - процесс взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы.

Предмет исследования - особенности формирования и изменения во времени напряженно-деформированного состояния почвенного слоя при учете его реологических свойств в зоне контакта со звеном гусеничного движителя.

Методология и методы исследований. Исследования проводились с использованием основных положений теории наследственной вязкоупругости, теории напряженного и деформированного состояний, теории математического планирования эксперимента с применением измерительно-регистрирующей аппаратуры и ЭВМ. Полевые исследования проводились согласно ГОСТ 7057-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний», ГОСТ 20915–2011 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний» со статистической обработкой результатов исследования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) Разработана математическая модель процесса взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы, учитывающая нелинейность эпюры давлений под траком. При этом вертикальная, сдвиговая и объемная деформации, плотность почвы, буксование движителей, а также коэффициент сопротивления движению трактора являются функциями от времени и характера взаимодействия его ходовой системы с почвенным слоем;
- 2) Получены закономерности развития вертикальной и сдвиговой деформаций слоя почвы на основе экспериментальных исследований с использованием нового устройства (пат. №2365916) и способа (пат. №2366944). Теоретически получены закономерности изменения напряжений в слое почвы под траком гусеничного движителя;
- 3) Разработан метод оценки уплотняющего воздействия гусеничного движителя на почвенный слой с учетом изменения его физико-

механических характеристик, позволяющий определять значения вертикальной, сдвиговой, объемной деформации и плотности почвы, а также коэффициента сопротивления движению трактора и буксования движителей. При этом изменение данных показателей происходит в соответствии с релаксационными процессами по предложенным аналитическим зависимостям. Даны рекомендации по использованию разработанного метода.

Теоретическая и практическая значимость работы. С применением теории наследственной ползучести упруговязкопластичных материалов разработана методика определения нормальных и касательных напряжений под траком гусеничного движителя, которые могут быть использованы в расчетах вертикальной, сдвиговой, объемной деформаций слоя и плотности почвы после прохода различных типов с.-х. машин на гусеничном ходу. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан метод оценки уплотняющего воздействия гусеничного движителя на слой почвы, позволяющий определить оптимальные показатели внешнего силового воздействия со стороны движителей при заданных параметрах состояния почвенного слоя. Разработаны рекомендации по использованию данного метода. Разработано устройство (пат. №2365916), позволяющее в полевых условиях проводить исследование физико-механических характеристик слоя почвы с применением ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель процесса взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы;
- устройство для исследования физико-механических характеристик слоя почвогрунта и способ их определения;
- результаты экспериментальных исследований процессов деформирования слоя почвы штампом и гусеничным движителем;
- метод оценки уплотняющего воздействия гусеничного движителя на слой почвы;
- результаты расчетов, полученные при реализации разработанного метода, и рекомендации по его использованию.

Степень достоверности и апробация результатов. При нахождении значений оценочных показателей взаимодействия гусеничного движителя с почвенным слоем использовались известные зависимости теории трактора, общепринятые методики разработки критериев подобия технических систем, определения плотности и влажности почвы (ГОСТ 20915-2011), скорости трактора при полевых испытаниях (ГОСТ 7057-2001). В ходе регистрации и обработки экспериментальных данных, а также расчетов показателей взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы использовались стационарные и портативные персональные компьютеры с пакетом современных (Microsoft Office 2010, Borland Delphi 7, КОМПАС-3D V14 и др.) лицензионных программ, а также специально разработанных и прошедших регистрацию в Государственном информационном фонде

неопубликованных документов (свидетельства ОФАП №50201350217, №10182, №50201350981). Исследования физико-механических свойств почвы проводились с применением специально разработанных способа и устройства, на которые были получены патенты РФ (№2366944, №2365916), с обработкой экспериментальных данных и получением уравнений регрессий по общепринятым методикам. Достоверность результатов расчетов показателей деформирования слоя почвы, полученных теоретическим путем, подтверждена их схождением с экспериментальными данными полевых исследований трактора.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на: Восьмой региональной молодежной научной и инженерной выставке «Шаг в будущее, центральная Россия» (г. Липецк, 2005 г.); V, VI и VIII Всероссийских научно-технических конференциях «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса» (г. Екатеринбург, 2007, 2008, 2010 гг.); Межрегиональном съезде молодых ученых России «Молодежь в науке: проблемы и перспективы» (Липецк, 2008 г.); Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем» (Волгоград, 2009 г.); Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ» (Москва, 2010 г.); Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК» (Мичуринск – наукоград РФ, 2015 г.); научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов ФГБОУ ВПО ЛГТУ в 2006-2015 гг.; заседании кафедры «Транспортные средства и техносферная безопасность» ФГБОУ ВПО ЛГТУ в 2015 г.

Реализация и внедрение результатов исследования. Результаты диссертационной работы в виде рекомендаций по использованию метода оценки уплотняющего воздействия движителя гусеничного трактора на слой почвы с пакетом прикладных программ (свидетельства ОФАП №50201350217, №10182, №50201350981) внедрены в ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт рапса (г. Липецк) и в ЗАО «Агрофирма имени 15 лет Октября» (Липецкая область, Лебедянский район, с. Троекурово). Программа расчета объемной, сдвиговой, вертикальной деформаций и плотности почвы после прохода гусеничного трактора используется в учебном процессе при подготовке студентов направлений подготовки 190100 «Наземные транспортно-технологические комплексы» и 190109 «Наземные транспортно-технологические средства» в Липецком государственном техническом университете. Устройства, реализованные в ходе экспериментальных исследований, используются в ЛГТУ при подготовке магистров по направлению 190100 «Наземные транспортно-технологические комплексы» в рамках дисциплины «Исследования и ис-

питания наземных транспортно-технологических машин», а также студентов по направлению подготовки 110400.62 «Агрономия» в Елецком государственном университете им. И.А. Бунина во время учебно-полевой практики.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 19 печатных работ, в том числе две статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, два патента РФ на изобретения и три свидетельства об отраслевой регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 172-х страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 19 таблиц, 12 приложений и список литературы из 163-х наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, раскрываются научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе отмечается необходимость применения новых знаний, разработки новых методов и рассмотрения не учитываемых ранее факторов в решении проблемы переуплотнения почвы под воздействием ходовых систем сельскохозяйственных машин.

В качестве основного критерия при анализе взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы принята ее плотность после прохода трактора, как одна из самых основных агрофизических характеристик, влияющих на урожайность, что подтверждается работами В.Е. Колотилина, И.П. Ксеневича, А.П. Куляшова, М.И. Ляско, В.А. Русанова, В.А. Скотникова, В.Т. Ходыкина, В.Г. Цыбулько, М.А. Шипилова и др.

Весомый вклад в развитие теории взаимодействия движителей машин с различными грунтами внесен А.С. Агейкиным, В.Я. Аниловичем, А.С. Антоновым, М.Г. Беккером, И.И. Водяником, В.П. Горячкиным, В.В. Гуськовым, Н.А. Забавниковым, Д.И. Золотаревской, В.В. Кацыгиным, А.М. Кононовым, С.С. Корчуновым, М.К. Кристи, И.П. Ксеневичем, Л.Н.Кутиным, Г.М. Кутьковым, М.Н. Летошневом, Е.Д. Львовым, М.И. Ляско, С.Р. Месчаном, С.В. Носовым, Ф.А. Опейко, В.Ф. Платоновым, А.В. Рославцевым, В.А. Русановым, В.А. Скотниковым и др.

Анализ публикаций показывает, что часть исследователей (М.Г. Беккер, В.В. Кацыгин, И.П. Ксеневич, М.Н. Летошнев и др.) не учитывает явлений ползучести и релаксации в почвенном слое и основывается на линейной или степенной зависимостях между деформациями и напряжениями в нем. При этом в моделях используются неинвариантные показатели, приемлемые лишь для конкретных условий при оценке взаимодействия ходовых органов машин со слоем почвы. Другая часть исследователей (И.И. Водяник, А.Н. Зеленин, Д.И. Золотаревская, А.Ю. Ишлинский, М.Е.

Мацепуро, С.Р. Месчан) учитывает влияние времени на деформацию почвенного слоя, применяя реологические коэффициенты, однако без рассмотрения остаются такие важные составляющие как: закономерности развития напряжений под движителем, его параметры, физико-механические свойства почвы (влажность, плотность) и др.

В настоящей работе используемая модель (1) является базовым уравнением теории наследственной ползучести упруговязкопластичных материалов и учитывает выше перечисленные особенности процесса развития деформации под гусеничным движителем:

$$\varepsilon(t) = \chi_k \cdot \left[\frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

где $\varepsilon(t)$ – относительная деформация слоя почвы; $\sigma(\tau)$ – напряжения под движителем в момент времени τ действия нагрузки; E – мгновенный модуль деформации почвы; $K(t-\tau)$ – функция скорости ползучести почвы, χ_k – функция подобия кривых ползучести почвы при разных значениях параметров состояния слоя и характеристик силового воздействия на него; t – полное время деформирования.

При описании процессов ползучести и релаксации напряжений использовались экспоненциально-степенные ядра:

$$S(t) = A \cdot e^{-\beta t} \cdot t^{\alpha-1} \quad (2)$$

$$K(t-\tau) = \frac{e^{-\beta t}}{t} \sum_1^{\infty} \frac{[A\Gamma(\alpha)]^n t^{cn}}{\Gamma(\alpha n)}, \quad (3)$$

где α , β , A – параметры функций скоростей релаксации $S(t)$ и ползучести $K(t)$; $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера.

При анализе научно-технической литературы по оценке уплотняющего воздействия гусеничного движителя на почвенный слой установлено, что необходимо разработать математическую модель, учитывающую нелинейность распределения давлений под звеньями гусеничной цепи, инвариантность показателей состояния почвы, технологические и конструктивные особенности машин.

Во второй главе приводятся теоретические исследования взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы. Обоснован выбор математической модели процесса взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы и описана методика исследования физико-механических характеристик почвы.

Предложено определять вертикальную и сдвиговую относительные деформации почвенного слоя согласно модели (1) по выражениям:

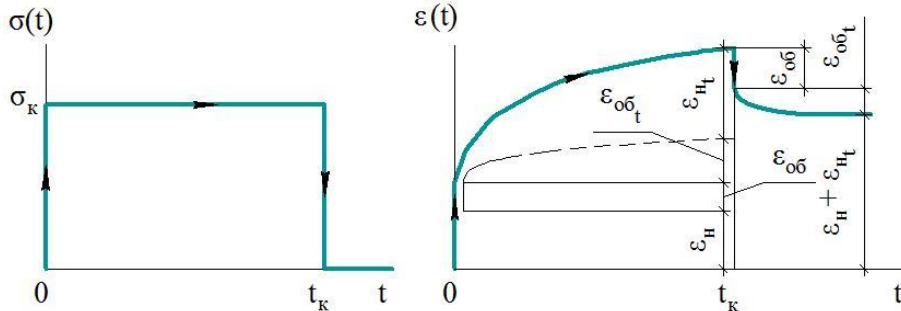
$$\varepsilon_{верт}(t) = \chi \cdot \frac{1}{E_{поч}} \left[\sigma_n(t) + \int_0^t K(t-\tau) \sigma_n(\tau) d\tau \right], \quad (4)$$

$$\varepsilon_{zop}(t) = \chi \cdot \frac{1}{G_{поч}} \left[\tau_H(t) + \int_0^t R(t-\tau) \tau_H(\tau) d\tau \right], \quad (5)$$

где $\sigma_H(t)$, $\tau_H(t)$ – нормальные и тангенциальные напряжения под траком в момент времени t действия нагрузки; $E_{поч}$, $G_{поч}$ – мгновенные модули вертикальной и сдвиговой деформаций почвы; $K(t-\tau)$, $R(t-\tau)$ – функции скоростей продольной и поперечной ползучести слоя почвы; τ – время возникновения напряжений $\sigma_H(\tau)$, $\tau_H(\tau)$; $\chi = \chi[\sigma_K; \tau_K; W; \rho]$ – функция подобия кривых ползучести слоя почвы при различных значениях ее плотности ρ и влажности W , нормальных σ_K и касательных τ_K напряжений в почвенном слое при ступенчатом законе его нагружения штампом:

$$\sigma(t) = \sigma_K \cdot h(t), \quad \begin{cases} h(t) = 1 \text{ при } t \in [0; t_K]; \\ h(t) = 0 \text{ при } t \in [t_K; \infty], \end{cases} \quad (6)$$

где $h(t)$ – функция Хевисайда; t_K – время нагружения.



$\varepsilon_{об}$ и ε_H – обратимая и необратимая части деформации почвенного слоя; $\varepsilon_{обt}$ и ε_{Ht} – обратимая и необратимая части деформации, развивающиеся в процессе ползучести почвенного слоя; σ_K – максимальные напряжения под штампом; t_K – время нагружения почвенного слоя

Рисунок 1 - Диаграммы изменения во времени напряжений по закону Хевисайда и соответствующих им деформаций

С целью выявления закономерностей распределения и изменения во времени напряжений под траком для различных условий движения машины проведен эксперимент на физической модели в лабораторных условиях (см. главу 3). В результате обработки данных лабораторных исследований установлено, что траектории точек трака, характеризующие процесс деформирования слоя материала, принимают треугольную или трапециевидную форму (рисунок 2).

Теоретически получены закономерности изменения напряжений под траком во времени с учетом особенностей кривых развития деформаций $\varepsilon(t)$.

На участке 1 (рисунок 2, а) при $0 \leq t \leq t_1$

$$\sigma(t) = E \cdot \dot{\varepsilon}_{n_1} \cdot t - E \cdot \dot{\varepsilon}_{n_1} \int_0^t T(t-\tau) \tau d\tau = E \cdot \frac{\dot{\varepsilon}_n}{t_1} \cdot t - E \cdot \frac{\dot{\varepsilon}_n}{t_1} \int_0^t T(t-\tau) \tau d\tau; \quad (7)$$

где ε_n – величина максимальной деформации; $\dot{\varepsilon}_{n_1}$ – скорость деформирования на участке; $T(t-\tau)$ – функция скорости релаксации напряжений.

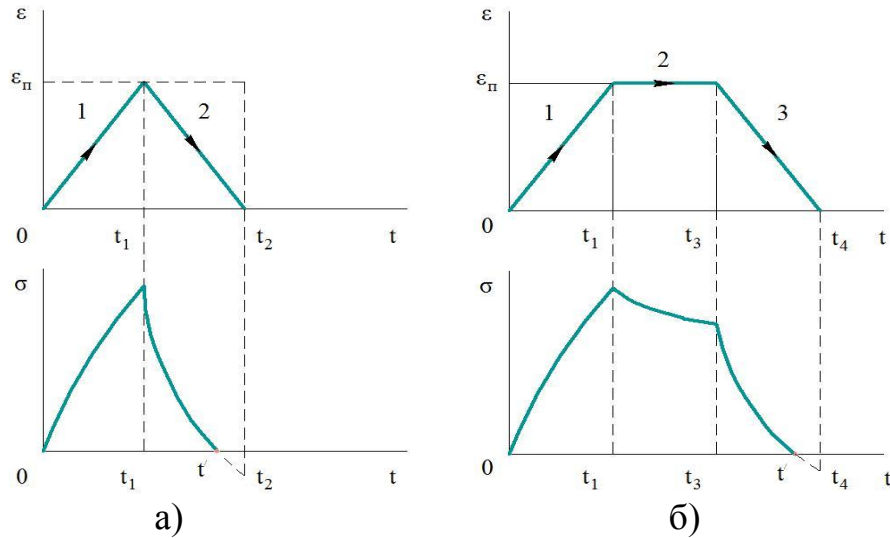


Рисунок 2 - Изменение во времени напряжений $\sigma(t)$ под точками трака при треугольном а) и трапециевидном б) законах развития деформаций

На участке 2 (рисунок 2, а) при $t_1 \leq t < t_2$

$$\begin{aligned} \sigma(t) = E \cdot \frac{\varepsilon_n}{(t_2 - t_1)} \cdot (t_2 - t) - E \cdot \frac{\varepsilon_n}{t_1} \int_0^{t_1} T(t - \tau) \tau d\tau - \\ - E \cdot \frac{\varepsilon_n}{(t_2 - t_1)} \cdot t_2 \int_{t_1}^t T(t - \tau) d\tau + E \cdot \frac{\varepsilon_n}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^t T(t - \tau) \tau d\tau. \end{aligned} \quad (8)$$

Интегралы от функции скорости релаксации напряжений $\int T(t) d\tau$ и $\int T(t) \tau d\tau$ считаются разложением подынтегральной функции в ряд Тейлора.

Аналогичным образом составляются уравнения зависимости напряжений под траком $\sigma(t)$ для трапециевидного закона развития деформаций $\varepsilon(t)$.

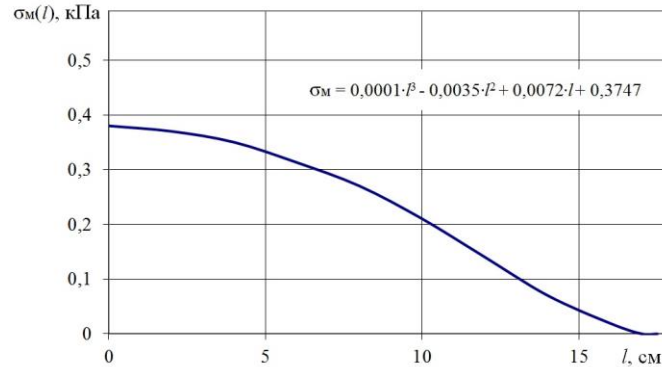
На рисунке 3 показана эпюра напряжений под траком, построенная по значениям $\sigma(t)$ для нескольких точек в момент времени силового воздействия со стороны опорного катка $t=0,1$ с.

Из рисунка 3 видно, что эпюра не линейна и принимает вид кривой, обращенной относительно трака вогнутостью вниз, в отличие от представлений И.П. Ксеневица, В.А. Русанова, М.В. Ляшенко и др., где она условно разделяется на прямоугольную и треугольную составляющие. Нелинейность эпюры напряжений под траком гусеничного движителя свидетельствует о наличии реологических свойств у деформируемого материала, которые необходимо учитывать при оценке уплотняющего воздействия на него со стороны ходовой системы машины.

Для приведения в соответствие данных, полученных на модели, с показателями взаимодействия движителя гусеничной машины со слоем почвы в естественных условиях эксплуатации разработан критерий подобия:

$$K = \rho \cdot E \cdot V^2 / \sigma \cdot \tau; \quad (9)$$

где E – модуль деформации материала, Па; ρ – плотность материала, кг/м³; V – скорость передвижения объекта, м/с; σ , τ – нормальные и касательные напряжения, обусловленные соответственно нагрузкой со стороны катка на звено гусеничной цепи и силой натяжения гусеницы, а также касательной силой тяги на ее опорном участке, Па.



$\sigma_m(l)$ – напряжения под траком модели; l – длина трака

Рисунок 3 – Эпюра напряжений под траком, полученная по экспериментальным данным

Переход от эпюры под траком $\sigma_m = f(t)$, полученной при обработке данных лабораторных опытов, к реальной под звеном гусеницы машины естественного размера $\sigma_n = f(t)$ осуществляется при выполнении равенства критериев подобия (9) для модели и натуры. Составляющие критерия подобия K для натуры (E_n , ρ_n), а также параметры α , β , A , входящие в выражения (2) и (3), получены в ходе проведения штамповых испытаний слоя почвы (см. главу 3) по специально разработанной методике. Предельные значения нормальных напряжений под гусеничным движителем машины естественного размера σ_n определяются по известным зависимостям теории трактора. Касательные напряжения и сила натяжения гусеницы на ее опорной ветви определяются по значению потребной силы тяги в заданных условиях движения с учетом параметров состояния почвы (плотности, влажности, толщины слоя) методом последовательных приближений.

По полученным закономерностям изменения нормальных и касательных напряжений под траком реальной машины с помощью выражений (4), (5) определялись численные значения вертикальной и горизонтальной деформаций почвенного слоя при его различных параметрах состояния и скоростных режимах работы трактора. По измененному объему почвы под траком определялась ее конечная плотность после прохода трактора.

В третьей главе представлены методика и результаты экспериментальных исследований по определению физико-механических характеристик слоя почвы, а также по оценке процесса развития ее деформаций под траком гусеничного движителя.

Исследования проводились в лабораторных условиях на специально разработанном стенде (рисунок 4) с применением теории математического планирования эксперимента.

В качестве контролируемых входных факторов рассматривались: усилие натяжения гусеницы P , скорость агрегата V и толщина слоя моделируемого материала h . Выходным показателем являлась деформация данного слоя. Закономерность деформирования слоя моделируемого материала оценивалась по осадке $\lambda_{ш1,2}$ двух соседних шарниров гусеничного звена при прохождении по нему опорного катка трактора.



Рисунок 4 - Общий вид лабораторного стенда

На рисунке 5 представлены графики зависимости максимальной вертикальной деформации под выбранным шарниром трака от исследуемых факторов.

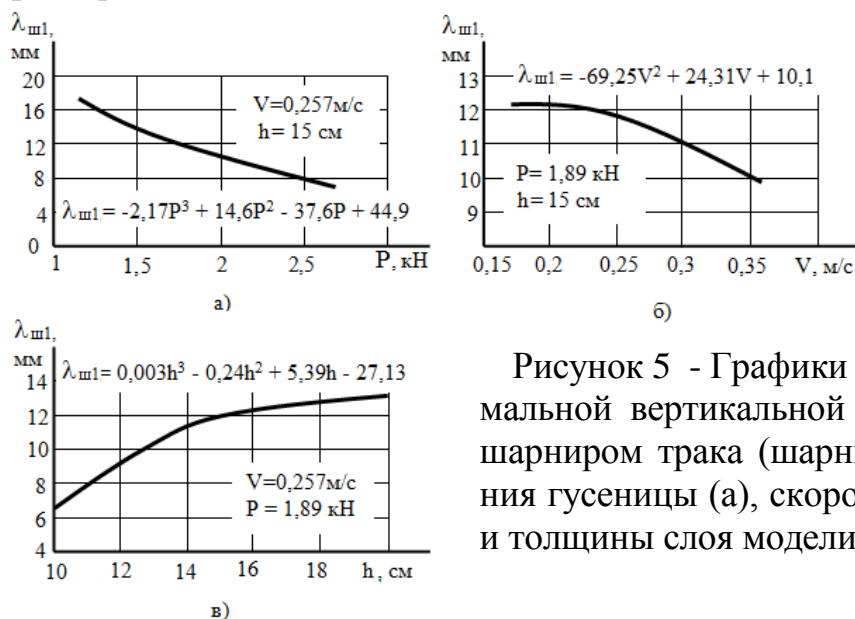


Рисунок 5 - Графики зависимостей максимальной вертикальной деформации слоя под шарниром трака (шарнир 1) от силы натяжения гусеницы (а), скорости опорного катка (б) и толщины слоя моделируемого материала (в)

Снижение деформации на рисунке 5 (а) обусловлено увеличением силы натяжения гусеницы, на рисунке 5 (б) – ростом скорости опорного катка, меньшее время взаимодействующего с траком. Увеличение $\lambda_{ш1}$ на рисунке 5 (в) объясняется увеличением толщины деформируемого слоя.

В ходе обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии $\lambda_{ш1,2} = f(P; v; h)$, которые использовались для расчета функции подобия χ'_m при нахождении мгновенного модуля деформации моде-

лируемого материала E_m , как одной из неизвестных составляющих критерия подобия (9):

$$E_m = \chi_m' \cdot \frac{1 + \int_0^t K(t-\tau) d\tau}{\varepsilon_m(t) / \sigma_m'} \quad (10)$$

где σ_m' – уровень экспериментальных нормальных напряжений; $\varepsilon_m(t)$ – экспериментальная деформация в момент времени t .

В расчетах используется уравнение регрессии, полученное для шарнира, первым подвергающемуся воздействию со стороны опорного катка (шарнир 1):

$$\lambda_{un1} = 0,0087 \cdot P^2 - 13,95 \cdot V^2 - 0,0088 \cdot h^2 - 0,658P + 6,155 \cdot V + 0,3258 \cdot h - 1,161. \quad (11)$$

Функцию подобия можно представить в виде:

$$\chi_m' = \frac{\lambda_m(P_3; V_3; h_3)}{\lambda_m(P_3; V_3; h_3)}. \quad (12)$$

Здесь индекс “з” означает заданные параметры, т.е. параметры, при которых необходимо рассчитать деформацию; индекс “э” указывает на параметры, при которых получена базовая кривая развития деформации материала в эксперименте.

Значения реологических характеристик почвенного слоя: параметров функций скоростей ползучести α_i , β_i , A_i , а также его мгновенных модулей вертикальной $E_{поч}$ и горизонтальной $G_{поч}$ деформаций определялись на основе получаемых кривых ползучести почвы в опытах с устройством статического нагружения, снабженного дисковым штампом, общий вид которого представлен на рисунке б.

При планировании эксперимента был выбран центральный некомпозиционный план на кубе для трех переменных факторов: плотности почвы ρ , влажности почвы W и сдвиговых напряжений τ_k . Выходными показателями являлись вертикальная $\lambda_{верт}$ и горизонтальная $\lambda_{гор}$ деформации почвенного слоя. В результате обработки данных эксперимента со штампом получены уравнения регрессии:

$$\lambda_{верт} = 18,527 - 12,721 \cdot X_1 + 2,434 \cdot X_2 + 5,583 \cdot X_3 - 1,256 \cdot X_1 \cdot X_3 + 6,328 \cdot X_2 \cdot X_3 + 14,757 \cdot X_1^2 + 0,337 \cdot X_2^2 - 8,248 \cdot X_3^2; \quad (13)$$



Рисунок б – Общий вид установки

$$\lambda_{\text{гор}} = 4,467 - 11,817 \cdot X_1 + 1,316 \cdot X_2 + 6,221 \cdot X_3 - 0,881 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5,03 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,883 \cdot X_2 \cdot X_3 + 8,078 \cdot X_1^2 + 0,506 \cdot X_2^2 + 2,078 \cdot X_3^2. \quad (14)$$

Переходы от кодированных X_i к действительным значениям факторов и обратно осуществляются с помощью следующих зависимостей:

$$X_1 = (\rho - 0,98) / 0,075; \quad X_2 = (W - 25) / 7; \quad X_3 = (\tau_k - 61,3) / 10,2. \quad (15)$$

Установленные интервалы изменения входных параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Интервалы изменения входных параметров

Кодированные значения факторов	Действительные значения факторов		
	Плотность почвы ρ , г/см ³	Влажность почвы W , %	Тангенциальные напряжения τ_k , Н/м ²
+1	1,06	32	71,5
0	0,98	25	61,3
-1	0,91	18	51,1

Значения показателей α_i , β_i , A_i , а также мгновенных модулей деформации почвы $E_{\text{поч}}$ и $G_{\text{поч}}$ для базовых кривых ползучести приведены в таблице 2. В качестве базовых выбраны кривые, полученные при проведении опытов со следующими значениями факторов: $\rho=0,91$ г/см³, $W=22\%$, $\tau_k=51,1$ Н/м².

Таблица 2 - Параметры базовых кривых развития деформации слоя почвы и ядер ползучести, рассчитанные на ЭВМ

Вид деформации	Параметры кривых ползучести				
	α	β	A	$E_{\text{поч}}$, МПа	$G_{\text{поч}}$, МПа
Нормальная ($\lambda_{\text{верт}}$)	0,325	0,98	0,166	2,59	-
Сдвиговая ($\lambda_{\text{гор}}$)	0,425	0,25	0,166	-	1,43

В четвертой главе представлен метод оценки уплотняющего воздействия гусеничного движителя на слой почвы, разработанный на основе рассмотренной во второй главе математической модели. Результаты расчетов оценочных показателей взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы, проведенных по данному методу, представлены в таблице 3.

По данным таблицы 3 получено семейство графиков зависимостей общей вертикальной $\lambda_{\text{верт_общ}}$ и сдвиговой $\lambda_{\text{гор_общ}}$ деформаций почвенного слоя, плотности почвы после прохода трактора $\rho_{\text{кон}} = \rho_{\text{н4}}$, буксования движителей δ , касательных напряжений $\tau_{\text{нi}}$, возникающих под опорными катками и др. от тяговой нагрузки на крюке $P_{\text{кр}}$. На рисунке 7 приведен пример построенного по расчетным данным графика зависимости плотности почвы, полученной после прохода опорных катков ходовой системы машины, от крюковой нагрузки.

Таблица 3 – Расчетные показатели процесса деформирования слоя почвы движителем гусеничного трактора

Показатель	$P_{кр}, \text{кН}$						
	0	5	10	15	20	25	30
$\lambda_{\text{верт1}}, \text{см}$	2,53	1,26	1,02	0,71	0,32	0,16	0,11
$\lambda_{\text{верт2}}, \text{см}$	1,27	0,88	0,81	0,64	0,3	0,15	0,11
$\lambda_{\text{верт3}}, \text{см}$	0,15	0,22	0,41	0,94	2	3,46	4,97
$\lambda_{\text{верт4}}, \text{см}$	0,12	0,18	0,33	0,71	1,07	0,87	0,49
$f_{\text{поч1}}$	0,089	0,045	0,036	0,025	0,011	0,006	0,004
$f_{\text{поч2}}$	0,045	0,031	0,029	0,023	0,01	0,005	0,004
$f_{\text{поч3}}$	0,005	0,008	0,014	0,033	0,071	0,122	0,175
$f_{\text{поч4}}$	0,004	0,006	0,012	0,025	0,038	0,031	0,017
$\rho_{\text{н1}}, \text{г/см}^3$	0,983	0,939	0,932	0,922	0,91	0,905	0,903
$\rho_{\text{н2}}, \text{г/см}^3$	1,031	0,969	0,959	0,943	0,919	0,91	0,906
$\rho_{\text{н3}}, \text{г/см}^3$	1,036	0,976	0,973	0,974	0,985	1,029	1,087
$\rho_{\text{н4}}, \text{г/см}^3$	1,04	0,982	0,984	0,998	1,024	1,064	1,109
$\lambda_{\text{верт_общ}}, \text{см}$	4,07	2,54	2,57	3	3,69	4,64	5,68
$\rho_{\text{кон}}, \text{г/см}^3$	1,04	0,982	0,984	0,998	1,024	1,064	1,109
$\tau_{\text{сумм}}, \text{кПа}$	21,252	51,56	89,87	133,05	181,755	231,967	284,306
$\tau_{\text{поч}}, \text{кПа}$	21,25	11,56	10,87	14,05	22,76	33,97	46,31
$\tau_{\text{н1}}, \text{кПа}$	3,29	10,13	16,73	21,86	28,97	41	56,86
$\tau_{\text{н2}}, \text{кПа}$	5,48	12,86	20,98	25,98	31,55	43,29	58,08
$\tau_{\text{н3}}, \text{кПа}$	5,92	13,79	24,32	36,08	55,73	71,01	83,13
$\tau_{\text{н4}}, \text{кПа}$	6,26	14,78	27,83	49,13	65,5	76,65	86,24
$\lambda_{\text{гор_общ}}, \text{см}$	0,15	1,27	2,65	3,9	5,8	8,3	11,9
$\delta, \%$	0,086	0,73	1,51	2,23	3,31	4,74	6,8
$X_{\text{д}}, \text{м}$	-0,142	-0,06	0,022	0,104	0,185	0,267	0,349

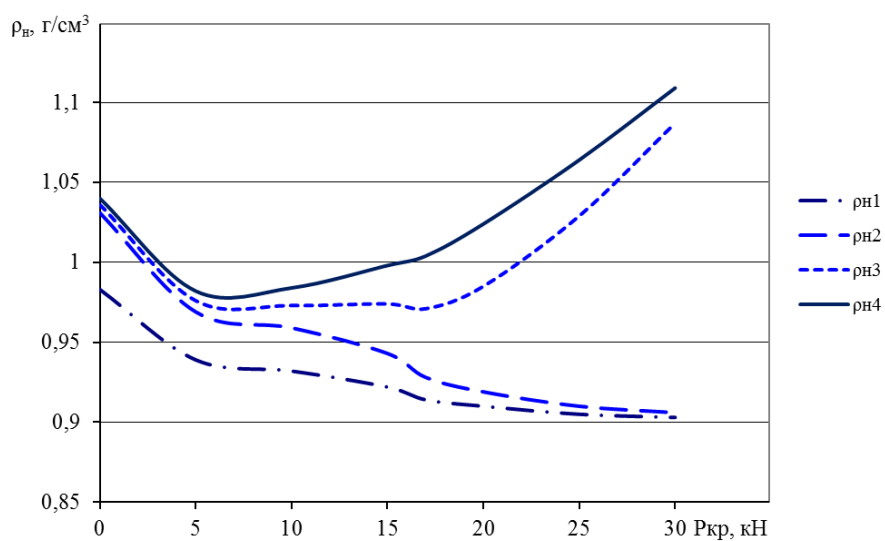


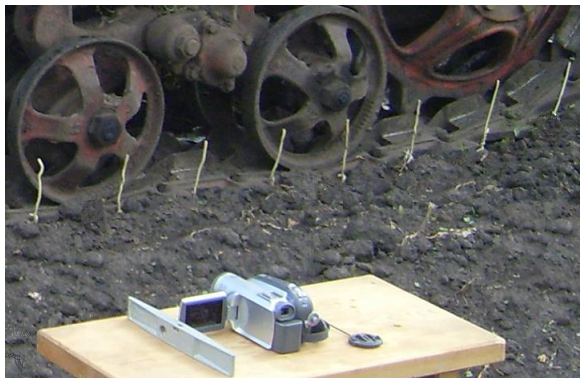
Рисунок 7 - Зависимости плотности почвы ($\rho_{\text{н1}}, \rho_{\text{н2}}, \rho_{\text{н3}}, \rho_{\text{н4}}$) после прохода опорных катков гусеничного движителя от нагрузки на крюке трактора

Из графика видно, что максимальное уплотнение почвы наблюдается при $P_{кр}=0$ кН и $P_{кр}=30$ кН, когда весовая нагрузка по каткам движителя распределена наиболее неравномерно. При минимальном значении $P_{кр}$ основное увеличение плотности почвы наблюдается после прохода первого и второго опорных катков ($\rho_{н1}$, $\rho_{н2}$). Плотность почвы после прохода 3 и 4 опорных катков ($\rho_{н3}$, $\rho_{н4}$) в этом случае изменяется незначительно. Подобная закономерность наблюдается при больших значениях $P_{кр}$, с той лишь разницей, что основное уплотнение здесь происходит под задними катками трактора. Особенности вида кривых $\rho_{ни}=f(P_{кр})$ связаны также с параметрами состояния самой почвы. Так, от катка к катку изменяется ее плотность, что влияет на дальнейшую деформационную способность – уплотненный слой почвы заметно лучше противостоит внешнему воздействию.

Также в данной главе проанализировано влияние скорости и распределения массы гусеничного трактора по опорным каткам на его уплотняющую способность.

В пятой главе представлены методика и результаты полевых исследований взаимодействия движителя гусеничного трактора со слоем почвы, технологические рекомендации производству и оценка эффективности разработанного метода.

Во время проведения полевого эксперимента при помощи видеокамеры с частотой покадровой съемки 30 ед./с фиксировались перемещения специальных стержней, прикрепленных к шарнирам звеньев гусеничной цепи, при перекатывании по ней опорных катков во время движения трактора на различных скоростях (рисунок 8).



а)



б)

а) регистрация перемещений шарниров трака; б) взятие пробы почвы

Рисунок 8 – Полевые исследования

В результате обработки экспериментальных данных построены диаграммы, отражающие закономерности процесса развития деформации слоя почвы под шарнирами звена гусеничной цепи во времени. Сравнением экспериментальных и рассчитанных с помощью разработанного метода и реализующей его программы на ЭВМ данных по деформированию слоя почвы (рисунок 9) подтверждена адекватность математической модели

процесса взаимодействия с ним гусеничного движителя. В среднем погрешность в определении вертикальной деформации и плотности почвы после прохода трактора теоретическим и экспериментальным способом составляет 5...8%.

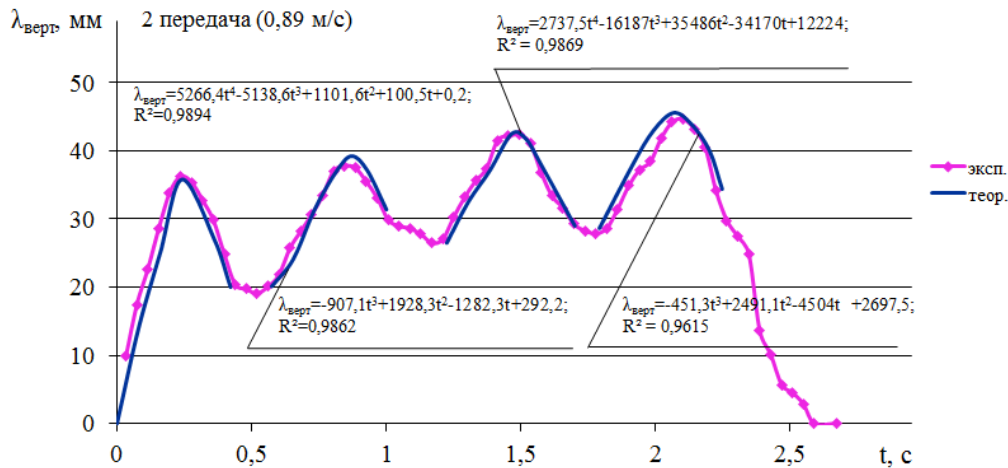


Рисунок 9 - Сравнение экспериментальных и расчетных (теоретических) данных по развитию деформации почвенного слоя при проходе гусеничного трактора без нагрузки на крюке

Сформирован перечень мер по снижению уплотняющего воздействия гусеничного движителя на слой почвы с помощью предложенного в данной работе метода. Их эффективность оценивалась при возделывании ячменя в ЗАО «Агрофирма имени 15 лет Октября» Лебедянского района Липецкой области. При увеличении скорости трактора на операциях посева и прикатывания с 8 до 11 км/ч и при использовании дополнительного груза массой 150 кг, навешиваемого на переднюю часть рамы во время культивации, удалось снизить плотность почвы «по следу» гусеницы на 9-11% и повысить урожайность ячменя в среднем на 3,5 ц/га. При этом был достигнут экономический эффект от продажи ячменя с учетом его средней рыночной стоимости в 2014 году (8000 руб. за тонну) в размере 140000 рублей (2800 руб./га).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные научные исследования позволили выйти на решение важной задачи, имеющей значение для развития знаний в области технологий и средств механизации сельского хозяйства, заключающейся в разработке метода оценки уплотняющего воздействия гусеничного движителя на слой почвы при учете его реологических характеристик, позволяющего повысить эффективность функционирования существующих и прогнозировать показатели работы проектируемых сельскохозяйственных машин, а также снизить трудоемкость и повысить точность производимых расчетов.

2. Разработана математическая модель процесса взаимодействия гусеничного движителя с почвенным слоем, учитывающая нелинейность эпюры давлений под звеном гусеничной цепи. При этом вертикальная, сдвиговая, объемная деформации и конечная плотность почвы по следу трактора, а также коэффициент сопротивления качению и буксование движителей являются функциями от времени, зависят от характера взаимодействия ходовой системы машины с почвенным слоем и его физико-механических характеристик. Раскрыты преимущества использования теории наследственной ползучести упруговязкопластичных материалов, позволяющей более точно описать процесс деформирования почвенного слоя.

3. Разработаны метод оценки показателей уплотняющего воздействия гусеничного движителя на слой почвы с учетом его реологических характеристик и реализующая этот метод компьютерная программа «Расчет колеи, сдвиговой деформации и плотности почвогрунта после прохода гусеничного трактора с 4-опорной балансирной подвеской». Полученные результаты расчетов и полевых исследований показывают, что в среднем расхождение значений осадки слоя и конечной плотности почвы после прохода трактора, найденных с помощью разработанной математической модели и экспериментальным путем, не превышает 7%, что говорит о возможности использования разработанного метода для оценки уплотняющего воздействия гусеничного движителя на почвенный слой. Для использования предлагаемого в данной работе метода разработаны рекомендации, позволяющие производить выбор скорости трактора, положения центра давления и крюковой нагрузки, обеспечивающих наименьшее уплотнение почвы.

4. Выявлен ряд факторов, влияющих на уплотнение почвы гусеничным движителем: распределение массы трактора по опорным каткам, смещение его центра давления, сила тяги на крюке, скорость движения. Расчетным путем установлено, что наиболее экологичным с точки зрения минимального уплотнения почвы является режим работ гусеничного трактора тягового класса 3 с крюковой нагрузкой, лежащей в пределах 5...15 кН. При этом удается достичь минимальных значений общей вертикальной деформации и конечной плотности почвы после прохода машины. Снижение глубины колеи в среднем происходит на 37% в сравнении со свободным режимом движения трактора и на 55% в сравнении с рабочим режимом при номинальной тяговой нагрузке (30 кН), снижение плотности почвы - на 6% и 11% соответственно. Это происходит вследствие более равномерного распределения массы трактора вдоль опорной ветви гусеницы. Процентное соотношение веса, приходящегося на переднюю и заднюю каретки, составляет 55% на 45% в свободном режиме, и 40% на 60% в режиме максимальной крюковой нагрузки. В связи с этим рекомендуется машиностроительным заводам устанавливать устройства для автоматического перемещения дополнительного груза в передней части рамы гусеничной машины, позволяющие совместно с разработанным

программным обеспечением выйти на формирование машинно-тракторных агрегатов, адаптирующихся к условиям внешней среды при выполнении различных с/х операций. Также теоретическим путем установлено, что с изменением скорости трактора в диапазоне от 0,9 м/с до 1,7 м/с вертикальная деформация слоя почвы уменьшается на 54%, что объясняется уменьшением времени силового воздействия на него со стороны гусеничного движителя.

5. Установлено, что эпюра нормальных давлений под отдельным траком гусеницы нелинейна и представляет собой участок, ограниченный кривой, обращенной выпуклостью вниз, с вершиной в области расположения опорного катка. Также расчетным путем выявлено, что равномерное распределение напряжений под активным траком наступает в тот момент, когда его положение отлично от горизонтального, что подтверждает наличие у деформируемого слоя почвы реологических свойств.

6. На основе теоретических и экспериментальных исследований получены закономерности развития вертикальной и сдвиговой деформаций почвенного слоя при различных значениях его физико-механических характеристиках (ρ , W , $E_{\text{поч}}$, $G_{\text{поч}}$, α_i , β_i , A_i) и напряжений в пятне контакта с гусеничным движителем.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Носов, С.В. Математическая модель взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием [Текст] / Носов С.В., Перегудов Н.Е. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2006. - №11. - С. 29-33.
2. Носов, С.В. Развитие деформации и изменение плотности почвогрунта под траком гусеничной машины [Текст] / Носов С.В., Перегудов Н.Е. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2009. - №11. - С. 14-16.

Патенты РФ:

3. Пат. 2365916 Российская Федерация. МПК G 01 N 33/24. Устройство для исследования физико-механических характеристик слоя почвогрунта [Текст] / Носов С.В., Перегудов Н.Е., Киндюхин Ю.Ю.; заявитель и патентообладатель Липец. гос. техн. ун-т. – №2008112526/28; заявл. 31.03.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. №24. – 13 с.: ил.
4. Пат. 2366944 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/24. Способ определения физико-механических характеристик слоя почвогрунта [Текст] / Носов С.В., Перегудов Н.Е., Киндюхин Ю.Ю.; заявитель и патентообладатель Липец. гос. техн. ун-т. – №2008109671/03; заявл. 11.03.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. №25. – 17 с.: ил.

**Публикации в сборниках научных трудов и
материалов конференций:**

5. Носов, С.В. Выбор рациональных режимов работы гусеничного трактора на опорном деформируемом основании при учете его физико-механических характеристик [Текст] / С.В. Носов, Н.Е. Перегудов // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров : сб. науч. тр. междунар. науч. - техн. конф., посвящ. 145-летию МГТУ "МАМИ". Кн. 1. – М.: МГТУ "МАМИ", 2010. - С. 463-472.

6. Носов, С.В. Результаты штамповых испытаний при исследовании реологических свойств почвы в цилиндрических координатах с использованием переносной установки. [Текст] / С.В. Носов, Н.Е. Перегудов, Ю.Ю. Киндюхин // Сб. тезис. докл. науч. конф. студ. и аспирантов. Лип. гос. техн. ун-та. - Липецк, 2007. - С. 95-98.

7. Перегудов, Н.Е. Алгоритм расчета и результаты расчета математической модели взаимодействия движителя со слоем почвы [Текст] / Н.Е. Перегудов // Технические науки – региону : сб. науч. тр. - Липецк: ЛГТУ, 2007. - С. 75-78.

8. Перегудов, Н.Е. Исследование процесса взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием [Текст] / Н.Е. Перегудов // Восьмая региональная молодежная научная и инженерная выставка "Шаг в будущее, центральная Россия" : сб. тез. докл. В 2 ч. Часть 2. - Липецк, 2005. - С. 81-82.

9. Перегудов, Н.Е. Исследование процесса развития деформации под траком гусеничной машины в условиях эксплуатации [Текст] / Н.Е. Перегудов, С.В. Носов // Проблемы и достижения автотранспортного комплекса: сб. мат. VIII Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2010. - С. 101-104.

10. Перегудов, Н.Е. Методика определения вертикальной деформации слоя почвы после прохода гусеничного трактора [Текст] / Н.Е. Перегудов, С.В. Носов // Сб. тезис. докл. науч. конф. студ. и аспирантов. Лип. гос. техн. ун-та. - Липецк, 2008. - С. 109-110.

11. Перегудов, Н.Е. Методика проведения эксперимента по оценке взаимодействия гусеничного движителя трактора со слоем почвы [Текст] / Н.Е. Перегудов // Проблемы и достижения автотранспортного комплекса: сб. матер. V Всерос. науч.-техн. конф. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. - С. 118-119.

12. Перегудов, Н.Е. Обработка результатов штамповых испытаний и получение эпюры нормальных напряжений под звеном гусеничной цепи [Текст] / Н.Е. Перегудов // Проблемы и достижения автотранспортного комплекса : сб. мат. VI Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. - С. 170-172.

13. Перегудов, Н.Е. Оценка уплотнения почвы движителями гусеничных машин с применением теории наследственной ползучести [Текст] / Н.Е. Перегудов, С.В. Носов // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК : мат. Междунар. науч.-практ. конф. – Мичуринск : 2Д Мичуринск, 2015. – С. 533-540.

14. Перегудов, Н.Е. Подход к решению переуплотнения почвы ходовыми органами мобильных энергетических средств через реологические свойства опорного основания [Текст] / Н.Е. Перегудов // Молодежь в науке: проблемы и перспективы : сб. матер. межрег. съезда молодых ученых России – Липецк: ЛГТУ, 2008. - С. 5-8.

15. Перегудов, Н.Е. Пути снижения уплотняющего воздействия движителей гусеничных машин на опорное основание через его реологические свойства [Текст] / Н.Е. Перегудов, С.В. Носов // Прогресс транспортных средств и систем – 2009 : мат. Междунар. науч.–практ. конф. В 2 ч. Часть 1. - Волгоград : ВолгГТУ, 2009. - С. 202-203.

16. Перегудов, Н.Е. Сравнение результатов расчета вертикальных деформаций под звеном гусеничной цепи с экспериментальными данными [Текст] / Н.Е. Перегудов, С.В. Носов // Сб. тезис. докл. науч. конф. студ. и аспирантов. Лип. гос. техн. ун-та. - Липецк, 2009. - С. 226-229.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

17. Носов, С.В. Оценка уплотняющей способности трактора [Электронный ресурс] : программа / Носов С.В., Перегудов Н.Е. – 3,4 Мб. – М. : ОФАП, 2008.

18. Перегудов, Н.Е. Определение смещения центра давления гусеничного трактора и распределения весовой нагрузки по каткам движителя [Электронный ресурс] : программа / Перегудов Н.Е., Безрядин А.С. – 1,25 Мб. - М.: ОФАП, 2013 г.

19. Перегудов, Н.Е. Расчет колеи, сдвиговой деформации и плотности почвогрунта после прохода гусеничного трактора с 4-опорной балансирной подвеской [Электронный ресурс] : программа / Перегудов Н.Е., Носов С.В. – 3,7 Мб. - М. : ОФАП, 2013.

Перегудов Николай Евгеньевич

Исследование уплотняющего воздействия гусеничного движителя сельскохозяйственного трактора на почву и разработка метода его оценки

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано в печать 27.01.2016. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.

Ризография. Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ №95.

Издательство Липецкого государственного технического университета.

Полиграфическое подразделение Издательства ЛГТУ.

398600, Липецк, ул. Московская, 30.