

На правах рукописи



Жаков Андрей Олегович

Оценка курсовой устойчивости прямолинейного движения гусеничного трактора путем учета силового влияния со стороны рабочего орудия

Специальность 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства
и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск 2024

Работа выполнена на кафедре «Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Трояновская Ирина Павловна, доктор технических наук, профессор, Почетный машиностроитель РФ, профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»

Официальные
оппоненты

Беляев Александр Николаевич, доктор
технический наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный аграрный
университет имени императора Петра I»,
агроинженерный факультет, заведующий
кафедрой «Прикладная механика».

Вязников Михаил Валерьевич, кандидат
технических наук, ООО «Международная
инжиниринговая компания по разработке новой
техники», генеральный директор.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Защита диссертации состоится 26 июня 2024 г., в 13 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.09 при Южно-Уральском государственном университете (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001. Тел. (351) 267-91-23.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на его официальном сайте: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243709-d-21229809/zhakov-andrey-olegovich>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.437.09, e-mail: D212.298.09@mail.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.437.09,
доктор технических наук, доцент


Абызов А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях большого санкционного давления на нашу страну, одной из важнейших задач является импортозамещение. В связи с существующим положением экономики нашей страны большие перспективы открываются в вопросах развития тракторного машиностроения.

Тракторные агрегаты отличаются от всех других наземных транспортных комплексов особым отношением к грунту. Они взаимодействуют с грунтом не только посредством движителя, но и с помощью рабочего орудия. Это взаимодействие оказывает существенное влияние на движение базовой машины, и как следствие, производительность выполняемых работ.

Большинство рабочих операций тракторные агрегаты выполняют на прямолинейных участках траекторий. Часто силы со стороны рабочего орудия приводят к отклонению трактора от заданного направления. Для сохранения прямолинейности движения водителю порой приходится через каждые 30 метров подправлять машину, что приводит к его повышенной утомляемости и снижению производительности труда на 10 –15%.

Вместе с тем, современные научные работы, посвященные исследованиям движения тракторных агрегатов, как правило, проводятся без учета силового влияния со стороны рабочих орудий. В связи с этим исследование вопросов курсовой устойчивости тракторных агрегатов при выполнении технологических операций сохраняют свою актуальность.

Цель исследования – оценить силовое влияние со стороны рабочего орудия на курсовую устойчивость гусеничного трактора при выполнении рабочих операций.

Задачи исследования.

1. Разработать математическую модель силового взаимодействия трактора с грунтом, учитывающую движитель и рабочее орудие.
2. Разработать модель движения гусеничного трактора с учетом возможного неуправляемого отклонения от заданного прямолинейного курса.
3. Создать программный комплекс для реализации предложенных математических моделей.
4. Провести экспериментальные исследования для оценки адекватности теоретических положений.
5. Предложить практические мероприятия по реализации полученных результатов исследования.

Объект исследования – движение гусеничного машинно-тракторного агрегата с учетом взаимодействия рабочих орудий с грунтом при выполнении технологических операций.

Предмет исследования – неуправляемое отклонение гусеничного машинно-тракторного агрегата под действием внешних сил со стороны рабочего орудия.

Методы исследования. Описание формирования силовых факторов в контакте гусеничного движителя с грунтом выполнено на основе математической теории трения. Математическое моделирование движения осуществлено с использованием методов теоретической механики, дифференциального и

интегрального исчисления. Разработка программных комплексов проведена с использованием современного компьютерного пакета MathCad. Верификация основных теоретических положений, математической модели движения и принятых допущений производилась непосредственным экспериментальным исследованием. Для обработки экспериментальных результатов применялись методы математической статистики и теории вероятности.

Научная новизна:

1. Предложен подход к изучению движения тракторного агрегата при выполнении технологических операций, представляющий совокупность прямолинейного управляемого движения и неуправляемого отклонения (сдвига) под действием внешних сил.

2. Разработана математическая модель движения гусеничного тракторного агрегата, отличающаяся учетом неуправляемого отклонения машины от заданного прямолинейного курса за счет силового воздействия со стороны рабочих орудий.

3. Получены новые экспериментальные данные по значениям предельной сдвигающей силы в зависимости от линии ее действия.

Теоретическая значимость.

Обосновано применение математической теории трения при описании силовых факторов в контакте движителя с грунтом в задаче неуправляемого мгновенно вращательного сдвига.

Разработана методика определения предельного значения внешней сдвигающей силы для известной линии ее действия на основе построения ее годографа.

Разработана методика расчета движения гусеничного трактора с учетом внешних сил со стороны рабочего орудия, позволяющая оценить величину бокового отклонения машины от прямолинейного курса за счет неуправляемого сдвига.

Практическая значимость.

Зарегистрирован программный комплекс для расчета силовых факторов в контакте гусеничного движителя при неуправляемом мгновенно вращательном сдвиге с учетом: упругих свойств грунта, анизотропии взаимодействия и отсутствия относительного движения бортов (свидетельство РФ № 2020610824) и для расчета траектории движения с учетом неуправляемого отклонения под действием внешних сил со стороны рабочего орудия (свидетельство РФ № 2020615467).

Представлены практические рекомендации и технические решения по разработке тензометрической установки в системе крепления рабочего орудия к трактору для замера ее силового воздействия (акт внедрения ООО «ЧКЗ»).

Реализация результатов исследования.

Результаты исследований нашли применение при расчётах и проектировании гусеничной техники в ООО «Завод буровой техники».

Рассматривается вопрос о внедрении разработанного программного комплекса в качестве обратной связи в системе управления беспилотного варианта тракторного агрегата сельскохозяйственного назначения в ООО «ЧКЗ».

Апробация работы. Положения диссертационной работы и результаты исследований были доложены на Международных конференциях: «Инженерные исследования и сотрудничество в мировом сельскохозяйственном производстве» (Зерноград, 2020 г.); «Современная аграрная наука: теория и практика» (Челябинск, 2021 г.); «Пром-Инжиниринг» (Сочи, 2022 г.) и научных семинарах ФГАОУ ВО ЮУрГУ (Челябинск, 2021-2023 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных трудов, в том числе: 3 статьи в журналах из перечня рекомендованного ВАК, 4 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых в базе Scopus и 2 свидетельства РФ о регистрации программ для ЭВМ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Подход к изучению движения тракторного агрегата, позволяющий оценить курсовую устойчивость при выполнении технологического процесса.
2. Математическая модель движения гусеничного тракторного агрегата, позволяющая вычислить величину неуправляемого отклонения от заданной прямолинейной траектории под действием внешних сил.
3. Экспериментальные данные, позволяющие определить значения предельной сдвигающей силы в зависимости от линии ее действия.

Достоверность полученных результатов подтверждена применением фундаментальных положений теоретической механики, математической теории трения, обоснованностью принятых допущений, а также сопоставлением результатов расчета с результатами натуральных экспериментов.

Структура и объём работы. Диссертационная работа изложена на 114 страницах машинописного текста и включает 61 иллюстрацию, 17 таблиц и 48 формул. Она состоит из: введения, пяти глав, заключения, библиографического списка (176 наименований) и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, указана научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость, указаны методы исследования, апробация полученных результатов и представлена структура диссертации.

В первой главе «Актуальность темы и состояние вопроса» приведён обзор существующих подходов к описанию силовых факторов в контакте гусеничного движителя с грунтом; представлены существующие методики исследования плоского криволинейного движения гусеничных машин; выполнен обзор научных исследований по теме курсовой устойчивости транспортных средств и предлагаемых решений для ее повышения.

Вопросами курсовой устойчивости тракторного агрегата занимались: *Виноградов В.И., Огинисян А.А., Панассюк А.Н., Пицхелаури Ш.Н., Рыжик Н.Е., Сарксян Л.Д., Старунова И.Н., Трубин Е.И. и другие.* Однако, большинство трудов посвящено отклонению транспортного средства при поперечном движении по склону, когда сдвигающая сила является составляющей веса машины, проходящей через центр масс, что приводит к прямолинейному ее отклонению.

Сила сопротивления, действующая на рабочее орудие, чаще всегда не проходит через центр тяжести. Внецентренная (не проходящая через центр масс машины) внешняя сила со стороны рабочего орудия встречается у бульдозеров при работе с перекосом отвала, у погрузчиков при корчевании пней краем ковша, у автогрейдеров при планировке дорожных откосов и у других тракторных агрегатов.

Наибольшее распространение неуправляемое отклонение наблюдается у тракторов сельскохозяйственного назначения. Например, сложная лемешная поверхность отвального плуга способна создать разворачивающий момент, отклоняющий трактор от прямолинейного движения, что подтверждено трудами *Зазули А.Н., Рыжих Н.Е., Синеокова Г.Н., Турбина Б.Г.* Вопросами курсовой устойчивости тракторного агрегата при пахоте занимались: *Бледных В.В., Воронков В., Свечников П.Г., Свиридова С.А., Сухарев Р.Ю. и другие*, рассматривая при этом только равновесия рабочего орудия (плуга). В трудах: *Балашова А.В., Беляева А.Н., Годжаева З.А., Завражного А.И., Зазули А.Н., Ляшенко П.Г., Огай В.А., Пейсахович Ю.А., Фомин С.Д. и других*, исследуется курсовая устойчивость, как правило, колесного базового трактора.

Вместе с тем, на пахоте, как наиболее энергоемкой операцией, использование гусеничной техники представляется наиболее целесообразным. Воздействие внецентренной внешней силы со стороны рабочего орудия способствует мгновенно вращательному сдвигу, поэтому отклонение от прямолинейного курса происходит по криволинейной траектории.

Исследованием криволинейного движения гусеничных тракторных агрегатов занимались: *Веденицкий Ю.Б., Груздев Н.И., Запольский В.И., Кацыгин В.В., Львов Е.Д., Моренко Г.В., Опейко Ф.А., Позин Б.М., Вязников М.В., Саяпин В.И., Софьян А.П., Татарчук Г.М., Трепененков И.И., Трояновская И.П., Котиев Г.О., Шепеленко Г.Н., Цыгунов В.А. и другие.* Однако, все они изучали активное криволинейное движение под действием управляющего воздействия со стороны водителя. Вопросы неуправляемого криволинейного движения остались мало изученными.

При исследовании криволинейного движения гусеничных машин наибольший интерес представляет сопротивление повороту, которое определяется силами в контакте движителя с грунтом. При управляемом прямолинейном движении относительное движение гусениц отсутствует. Поэтому использование классического подхода расчета момента сопротивления повороту за счет различия тяговых усилий по бортам трактора для данного исследования не подходит. Поскольку силы в контакте на 73–82% представляют собой силы трения, то за основу силового взаимодействия была принята математическая теория трения Ф.А. Опейко.

Потребность в изучении движения трактора с учетом неуправляемого отклонения под действием внешних сил со стороны рабочего орудия позволила сформулировать цель задачи исследования.

Во второй главе «Теоретические исследования» представлена математическая модель силового взаимодействия трактора с грунтом посредством движителя и рабочего орудия; построен годограф предельной сдвигающей силы;

определено влияние анизотропии взаимодействия гусеничного движителя с грунтом на силовые факторы в контакте; записаны уравнения движения трактора с учетом неуправляемого отклонения от заданного курса.

Силовое взаимодействие трактора с грунтом (рисунок 1) при наличии сил трения (в контакте движителя) записывается в виде уравнений предельного равновесия:

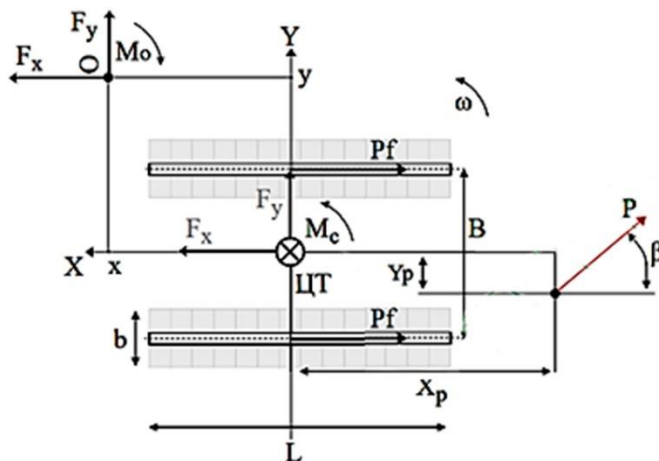


Рисунок 1. Схема сил, действующих на тракторный агрегат со стороны грунта

$$\begin{cases} 0 = F_x - P_f + P \cos \beta \\ 0 = F_y + P \sin \beta \\ 0 = M_c + y_p P \cos \beta + x_p P \sin \beta \end{cases}, \quad (1)$$

где F_x , F_y , M_c – силы и момент в контакте движителя с грунтом; P_x , P_y , $M_c(P)$ – силы и момент со стороны рабочего орудия; x_p , y_p – расстояние от центра тяжести трактора до точки приложения внешних сил со стороны рабочего орудия в продольном и поперечном направлении; β – угол наклона внешней силы к продольной плоскости трактора.

Согласно математической теории трения силовые факторы, возникающие в контакте движителя с грунтом F_x , F_y , M_c , являются функциями координатами мгновенного центра скольжения O :

$$\begin{cases} F_x = \mu q \iint_{\gamma\varphi} \frac{(y-\varphi)}{\sqrt{(y-\varphi)^2 + (x-\gamma)^2}} d\varphi d\gamma \\ F_y = -\mu q \iint_{\gamma\varphi} \frac{(x-\gamma)}{\sqrt{(y-\varphi)^2 + (x-\gamma)^2}} d\varphi d\gamma \\ M_c = \mu q \iint_{\gamma\varphi} \sqrt{(y-\varphi)^2 + (x-\gamma)^2} d\varphi d\gamma \end{cases}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения (сцепления); $q = mg/2Lb$ – нормальное давление; mg – вес тракторного агрегата; L – продольная база трактора (длина контакта гусеницы); b – ширина гусеницы; x , y – координаты мгновенного центра скольжения; γ , φ – текущие координаты, определяемые размеры контакта движителя с грунтом.

При неуправляемом сдвиге относительного движения гусениц отсутствует, что позволяет представить контакт гусеничного движителя с грунтом в виде единой площадки с разрывными пределами интегрирования:

– в продольном направлении $\gamma \in [-0,5L \dots 0,5L]$;

– в поперечном направлении $\varphi \in [-0,5(B+b)...-0,5(B-b)]$ и $\varphi \in [0,5(B-b)...0,5(B+b)]$, где B – колея.

Поскольку ширина гусеницы $b=480...520$ мм значительно меньше продольной базы $L=2800...3300$ мм, то ею можно пренебречь. Это допущение позволяет заменить двойные интегралы одинарными с поперечной координатой $\varphi = \pm 0,5B$. При этом погрешность при расчете силовых факторов составляет не более 2%.

Конструктивно все гусеничные тракторные движители снабжены поперечно расположенными грунтозацепами, что приводит к анизотропии взаимодействия с грунтом. Анизотропия проявляется не только в разных коэффициентах трения в продольном μ_x и поперечном μ_y направлениях. Наличие грунтозацепов принципиально меняет характер взаимодействия. В поперечном направлении грунтозацепы сразу срезают грунт. В продольном направлении грунт вначале сминается, согласно своим упругим свойствам, и только достигнув определенного предела, начинает срезаться.

Для учета упругих свойств грунта в продольном направлении внесем коэффициент трения μ_x под интеграл, что позволяет ввести для него любой закон. В этом случае коэффициент μ_x приобретает смысл удельного тягового усилия. Зависимость тягового усилия (коэффициента трения μ_x) от буксования δ хорошо известна (рисунок 2).

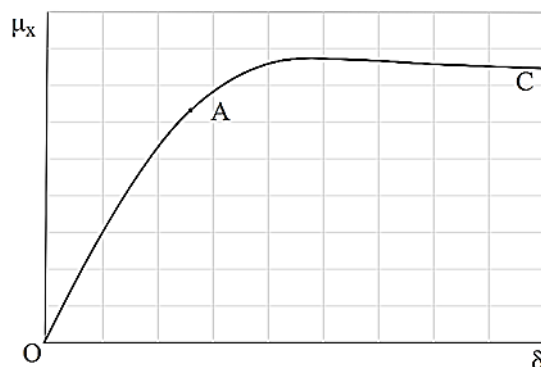


Рисунок 2. Зависимость удельного тягового усилия от буксования

Малая величина боковых смещений при решении задач неуправляемого сдвига позволяет использовать упрощённую формулу линейной зависимости, отражающую упругий участок OA деформации грунта:

$$\mu_x = \mu_{x \max} \frac{\delta}{\delta_{\max}}, \quad (3)$$

где μ_x , $\mu_{x \max}$ – текущее и максимальное значение коэффициента продольного трения, δ , δ_{\max} – текущее и максимальное (100%) буксование.

Выразим текущую величину буксования для каждой гусеницы через координаты мгновенного центра скольжения:

$$\delta_1 = y_1 / (R + y_1); \quad \delta_2 = y_2 / (R + y_2), \quad (4)$$

где $y_1 = y + 0,5B$ – расстояние мгновенного центра скольжения относительно дальней гусеницы; $y_2 = y - 0,5B$ – расстояние мгновенного центра скольжения

относительно ближней гусеницы; R – радиус кривизны траектории (определяется силовым взаимодействием).

С учетом введения единой площадки контакта, анизотропии взаимодействия движителя с грунтом и упругих свойств грунта в продольном направлении, силовые факторы (2) приобретают вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_x = \frac{mg}{2Lb} \int_{-0,5L}^{0,5L} \left[\frac{\mu_x \max y_1^2}{(R+y_1)\sqrt{y_1^2+(x-\gamma)^2}} + \frac{\mu_x \max y_2^2}{(R+y_2)\sqrt{y_2^2+(x-\gamma)^2}} \right] d\gamma \\ F_y = -\mu_y \frac{mg}{2Lb} \int_{-0,5L}^{0,5L} \left[\frac{(x-\gamma)}{\sqrt{y_1^2+(x-\gamma)^2}} + \frac{(x-\gamma)}{\sqrt{y_2^2+(x-\gamma)^2}} \right] d\gamma \\ M_c = \frac{mg}{2Lb} \int_{-0,5L}^{0,5L} \left[\frac{\mu_x \max 0,5B y_1^2}{(R+y_1)\sqrt{y_1^2+(x-\gamma)^2}} + \frac{\mu_y \gamma (x-\gamma)}{\sqrt{y_1^2+(x-\gamma)^2}} - \right. \\ \left. - \frac{\mu_x \max 0,5B y_2^2}{(R+y_2)\sqrt{y_2^2+(x-\gamma)^2}} + \frac{\mu_y \gamma (x-\gamma)}{\sqrt{y_2^2+(x-\gamma)^2}} \right] d\gamma \end{array} \right. . \quad (5)$$

Анизотропия взаимодействия движителя с грунтом приводит к асимметричному виду силовых факторов (рисунок 3). Численный анализ показал, что даже при одном положении мгновенного центра скольжения значения продольной F_x и поперечной F_y составляющей силы трения могут различаться на 50%.

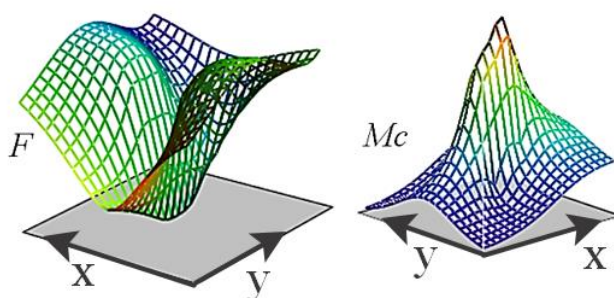


Рисунок 3. Результирующая сила F и момент M_c трения в контакте движителя с грунтом с учетом анизотропии взаимодействия

Однако общая зависимость между результирующей силой $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$, и моментом M_c сохраняется. В случае, когда результирующая сила F достигает своего максимального значения, момент трения равен нулю $M_c = 0$ (поступательное скольжение). Когда момент трения M_c достигает максимального значения, то сила трения становится равной нулю $F = 0$ (чистое вращение вокруг центра контакта).

На основании уравнений предельного равновесия (1) с учетом выражений силовых факторов в контакте (5) было определено значение предельной сдвигающей силы и построен ее годограф (рисунок 4).

Годограф показал, что максимальное значение соответствует направлению, когда внешняя сила проходит через центр тяжести тракторного агрегата. При любом отклонении от этого направления, для неуправляемого сдвига достаточно значительно меньшей внешней силы.

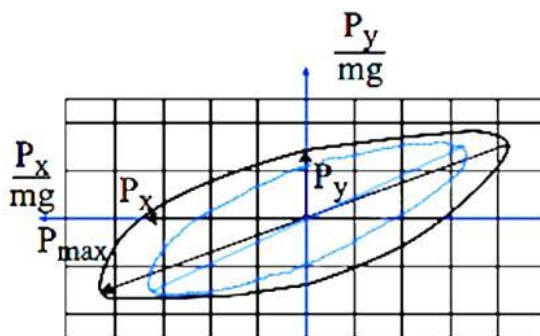


Рисунок 4. Годограф предельной сдвигающей силы со стороны плуга

При учете анизотропии годограф разворачивается в сторону наименьшего коэффициента сцепления и наблюдается снижение максимального сдвигающего усилия в продольном направлении на 20% и в поперечном на 7% (внутренний контур).

При внешней силе, превышающей свое предельное, согласно годографу, значение начинается сдвиг машины по криволинейной траектории. Суммарное движение трактора в этом случае представляет собой совокупность управляемого прямолинейного движения и неуправляемого криволинейного сдвига под действием внешних сил. Радиус кривизны траектории полностью определяется значением и линией действия внешней силы.

Особенностью работы тракторного агрегата являются невысокие скорости и отсутствие ускорений при выполнении рабочих операций. Это позволяет записать уравнения перемещения центра масс в виде интегральных зависимостей:

$$\begin{cases} y_c = \int_0^T V \cos \left(\int_0^t \frac{V}{R} d\tau \right) dt \\ x_c = \int_0^T V \sin \left(\int_0^t \frac{V}{R} d\tau \right) dt \end{cases} \quad (6)$$

где x_c, y_c – продольная и поперечная координата центра тяжести трактора; V – скорость управляемого движения; t, T – текущее и конечное время движения.

На основании системы уравнений (6) были построены траектории движения (рисунок 5), позволяющие оценить влияние внешних сил со стороны рабочего орудия на движение базового трактора.

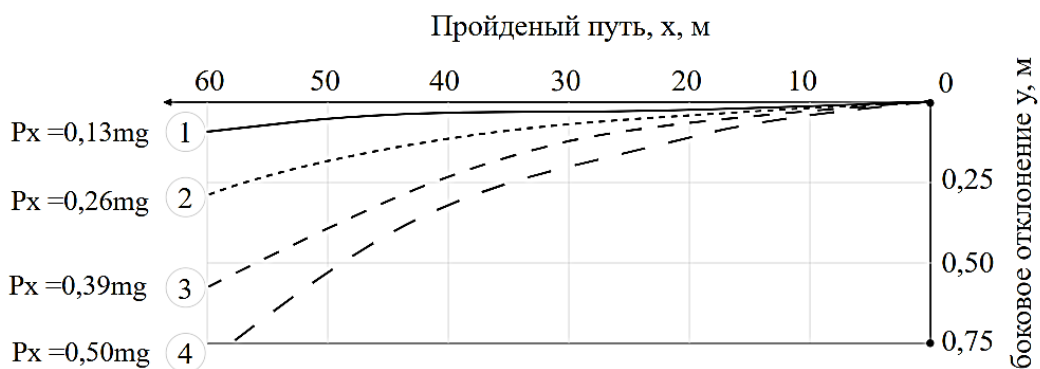


Рисунок 5. Траектории движения сельскохозяйственного тракторного агрегата при разных сопротивлениях плуга

Из рисунка 5 видно, что боковое отклонение трактора возможно только при наличии неуправляемого сдвига и его величина растет быстрее, чем увеличивается модуль внешней силы.

В третьей главе «Экспериментальные исследования силового взаимодействия» представлены методика проведения и результаты натурных экспериментов по определению предельного значения сдвигающей силы и дана оценка адекватности теоретических положений.

Испытания проводились на полигоне испытательного центра НАТИ (г. Чебаркуль) на суглинистом грунте. В качестве объекта исследования использовался гусеничный трактор Т-10.

В соответствии с планом экспериментальных работ опыты выполнялись в следующей последовательности:

- определение основных характеристик объекта исследования (масса, размеры);
- определение основных характеристик взаимодействия с грунтом (коэффициенты сцепления и сопротивления перекатыванию);
- определение предельной сдвигающей силы при различных ее направлениях.

Коэффициенты сопротивления перекатыванию f и коэффициент сцепления μ определялись путем деления крюкового усилия на вес тракторного агрегата G . Крюковое усилие замерялось с помощью тензозвена при буксировке трактора тензометрической лабораторией СДЛ-30 на базе трактора ДЭТ-250 (рисунок 6).



Рисунок 6. Замер сопротивления перекатыванию

Замер коэффициентов сцепления осуществлялся при полностью заторможенных гусеницах отдельно в продольном и поперечном направлениях (рисунок 7).

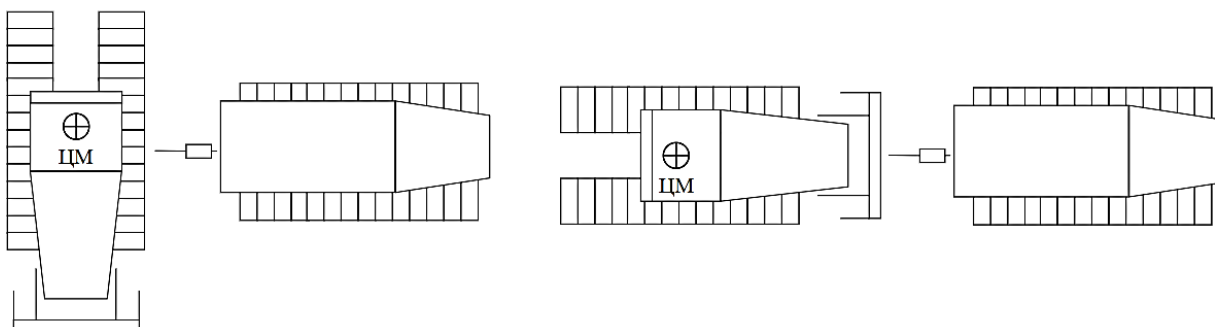


Рисунок 7. Схема замера силы сцепления с грунтом

Средние значения коэффициентов сцепления составили: в продольном направлении $\mu_x=0,95$ и поперечном направлении $\mu_y=0,85$, что подтверждает наличие анизотропии взаимодействия гусеницы с грунтом. Все замеры повторялись не менее 3 раз и записывались на осциллограмму.

При замере сопротивления перекачиванию буксировка осуществлялась со свободными гусеницами. Среднее значение коэффициента сопротивления перекачиванию составило $f \approx 0,12$.

Следующим этапом эксперимента было подтверждение теоретических положений, выдвинутых при мгновенно вращательном сдвиге. При проведении опыта внешняя сила прикладывалась к крайней точке рыхлителя (рисунок 8). Определение предельной сдвигающей силы осуществлялось при семи различных направлениях: $\alpha=0^\circ$; 10° ; 21° ; 26° ; 53° ; 62° ; 80° . При угле $\alpha=21^\circ$ внешняя сдвигающая сила проходила через центр масс трактора, что соответствует поступательному сдвигу машины.

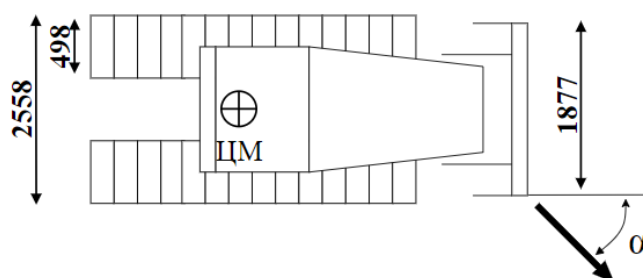


Рисунок 8. Схема сдвига трактора под действием внецентренной силы

В результате эксперимента получены осциллограммы внешней силы при поступательном и вращательном сдвиге (рисунок 9).

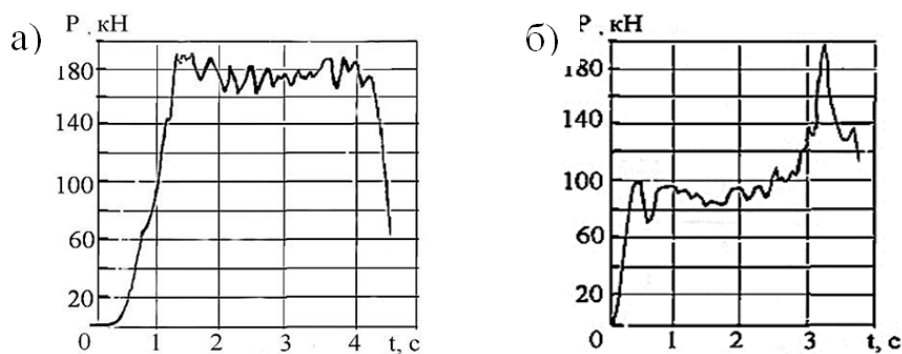


Рисунок 9. Осциллограммы внешней силы при (а) поступательном ($\alpha=21^\circ$) и (б) вращательном сдвиге ($\alpha=53^\circ$)

При поступательном сдвиге внешнее усилие сразу нарастает до своего предельного по сцеплению значения $P = \mu G$ (рисунок 9а). При вращательном сдвиге (рисунок 9б) на всех осциллограммах наблюдаются три характерных участка:

1. Нарастание усилия до некоторого значения, соответствующего началу неуправляемого сдвига;
2. Снижение значения внешней силы, соответствующее изменению угла приложения силы (вращательное скольжение);
3. Последующее нарастание, соответствующее сдвигу при новом положении внешней силы.

В качестве значений внешней сдвигающей силы принимался первый ярко выраженный максимум на осциллограмме. Экспериментальные значения предельной силы подтвердили возможность начала сдвига при значениях значительно меньших предела сцепления.

Нанесение значений предельной сдвигающей силы на годограф показали сходимость полученных значений в пределах 6% (рисунок 10).

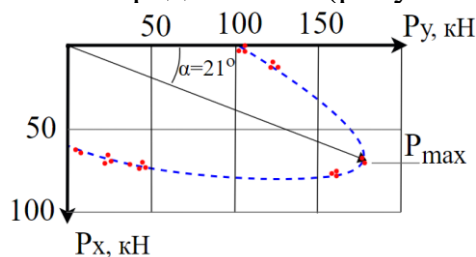


Рисунок 10. Экспериментальные значения предельной сдвигающей силы

В четвертой главе «Экспериментальные исследования курсовой устойчивости» представлена методика проведения и результаты натуральных экспериментов по замеру траектории движения гусеничного трактора при действии внешней внецентренной силы.

Трактор двигался прямолинейно без управляющих воздействий водителя с постоянной скоростью. Внешнее сопротивление прикладывалось к крайнему зубу рыхлителя посредством опытной самоходной лаборатории (рисунок 11).

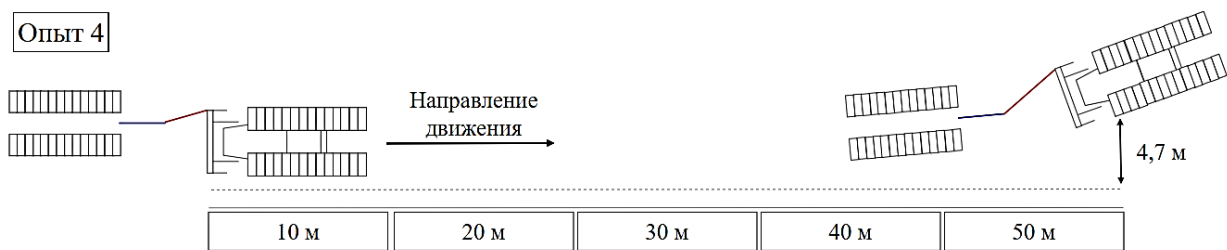


Рисунок 11. Схема эксперимента по замеру неуправляемого отклонения

Было проведено 6 опытов. Величина сопротивления менялась от 20 до 100 кН (от 8 до 40% веса трактора). Боковые отклонения от прямолинейного курса фиксировались через каждые 10 метров.

Два опыта показали отсутствие бокового отклонения, что свидетельствует о не достижении внешней силой своего предельного значения. В результате обработки эксперимента были построены траектории движения (рисунок 12).

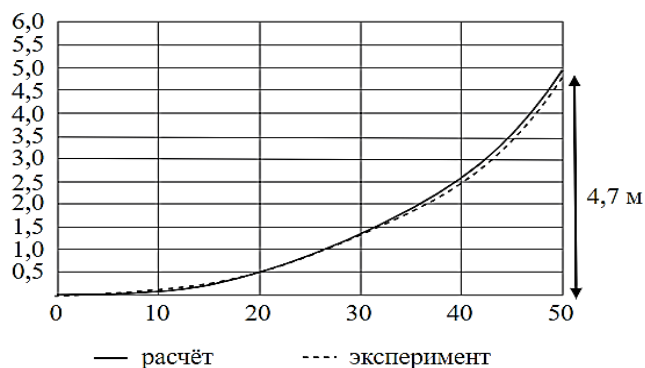


Рисунок 12. Экспериментальные и теоретические траектории движения

Их совмещение с теоретическими кривыми показали сходимость в пределах 9%, что подтверждает адекватность предложенной математической модели.

В пятой главе представлены пути практического применения результатов диссертационного исследования.

На основе разработанной математической модели проведена оценка вероятности неуправляемого отклонения серийно выпускаемых машинно-тракторных агрегатов. Выявлены возможные нарушения прямолинейного курса от силового воздействия со стороны рабочего орудия, требующие управляемой корректировки движения. Полученные результаты коррелируются с данными из независимых источников.

В настоящее время широкое применение получило беспилотное управление транспортными средствами, что наиболее актуально для машинно-тракторных агрегатов агропромышленного комплекса в силу сезонности сельскохозяйственных работ. Для контроля траектории движения машины часто используют системы спутниковой навигации, фиксирующие ее отклонение от заданного курса. В качестве обратной связи выступают скорости и ускорения центра масс базовой машины, а также данные скоростей или крутящих моментов на ведущих колесах. Такой подход позволяет учесть управляемые воздействия со стороны водителя и внешние воздействия со стороны грунта на движитель. Однако, он не учитывает влияние сил со стороны рабочего орудия.

Разработанный программный комплекс (патент №2020615467) позволяет спрогнозировать изменение траектории при воздействии внешней силы со стороны рабочего орудия. Для использования его в системе управления беспилотных транспортных средств необходимо расширить канал обратной связи за счет дополнительной информации о силовом воздействии со стороны рабочего орудия. Конструктивно это реализуется путем встраивания тензометрической установки в раму крепления рабочего орудия к трактору.

Рекомендации по внедрению в производство переданы на «Челябинский компрессорный завод» и «Завод буровой техники».

Заключение

1. Разработана математическая модель силового взаимодействия гусеничного трактора с грунтом и уравнений предельного сдвига в виде условий предельного равновесия, учитывающая взаимодействие движителя и рабочего орудия. Силовых факторов в контакте записаны на основе математической теории трения и подчеркивают взаимную связь силы и момента в контакте. В результате однозначной зависимости предельного значения сдвигающей силы от линии ее действия построен годограф, доказывающий возможность вращательного сдвига при силе, значительно меньшей предела сцепления. Анизотропия взаимодействия гусеницы с грунтом учтена посредством разных коэффициентов сцепления и учета упругих свойств грунта при его продольном смятии. Учет анизотропии позволяет уточнить значения предельной сдвигающей силы до 20% в продольном направлении и до 7% в поперечном.

2. Разработана математическая модель движения гусеничного тракторного агрегата, позволяющая оценить возможность неуправляемого отклонения машины от заданного прямолинейного курса под действием внешней внецентренной силы сил со стороны рабочего орудия. Модель состоит из уравнений движения в виде криволинейных интегралов первого рода. Радиус кривизны траектории при неуправляемом отклонении полностью определяется силовым взаимодействием. Численный эксперимент показал, что неуправляемое отклонение от заданного курса возможно только при наличии предельного сдвига и его величина растет быстрее, чем увеличивается модуль внешней силы.

3. Разработан и зарегистрирован программный комплекс для расчета силовых факторов в контакте с гусеничным движителем при неуправляемом сдвиге с учетом: упругих свойств грунта, анизотропии взаимодействия и отсутствии относительного движения бортов (свидетельство РФ № 2020610824) и для расчета траектории движения с учетом неуправляемого отклонения под действием внешних сил со стороны рабочего орудия (свидетельство РФ № 2020615467).

4. Проведены натурные эксперименты по силовому равновесию, подтвердившие однозначность зависимости предельного значения сдвигающей силы от линии ее действия. Обработка осциллограмм внешней силы показала принципиально разный характер ее изменения в случае поступательного и вращательного сдвига. Экспериментально зафиксировано, что поступательный сдвиг под действием силы, проходящей через центр масс машины, происходит при критическом угле $\alpha_{кр} = 21^\circ$, что на 4° больше его геометрического значения. Это

подтверждает теоретические результаты о повороте годографа предельной сдвигающей силы за счет анизотропии взаимодействия в сторону наименьшего сцепления;

Экспериментально подтверждено, что когда внешняя сила не проходит через центр тяжести машины, сдвиг начинается при силе значительно меньшей предела сцепления и представляет собой криволинейное скольжение. Расхождение экспериментальных и теоретических значений предельной сдвигающей силы не превысило 6% (без учета анизотропии расхождение составляет до 17%, - соответственно анизотропными свойствами пренебрегать не следует).

В результате натурных экспериментов по оценке курсовой устойчивости зафиксировано, что неуправляемое отклонение трактора под действием внешней внецентренной силы имеет место только в случае достижения ею своего предельного значения. Сравнение экспериментальных и расчетных траекторий движения показали расхождение данных в пределах 8%, что подтверждает адекватность математической модели.

5. Разработано техническое решение по замеру силового взаимодействия со стороны рабочего орудия, представляющее собой тензометрическую установку, встроенную в раму крепления рабочего орудия к трактору. Даны практические рекомендации по внедрению программного комплекса в качестве обратной связи системы управления беспилотных транспортных средств (имеются акты внедрения).

Перспективы дальнейшего исследования

Дальнейшие исследования планируется направить на изучение движения колесных машин с учетом внешнего внецентренного воздействия со стороны рабочего орудия.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Жаков А.О., Трояновская И.П. Модель отклонения трактора от прямолинейного движения под действием внешних нецентральных сил // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. Т. 20, № 3. С. 15–23. DOI:10.14529/engin200302 (0,25/0,5 п. л.)

2. Жаков А.О., Трояновская И.П. Влияние анизотропии на взаимодействие гусеничного движителя с грунтом при повороте машины // Тракторы и сельхозмашины. 2020. №2. С. 43–49. DOI:10.31992/0321-4443-2020-2-43-49 (0,22/0,44 п. л.)

3. Трояновская И.П., Жаков А.О. Курсовая устойчивость машинно-тракторного агрегата при вспашке // Тракторы и сельхозмашины. 2020. №6. С. 41–49. DOI:10.31992/0321-4443-2020-6-41-49 (0,25/0,5 п. л.)

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования (Scopus):

4. Troyanovskaya I., Zhakov A., Grebenshikova O., Voinash S., Timofeev E. Directional stability of an agricultural tractor // FME Transactions, 2021, vol. 49(2), pp. 456–462. DOI:10.5937/fme2102456T (0,14/0,42 п. л.)

5. Troyanovskaya I.P., Ulanov A.G., Zhakov A.O., Voinash S.A. Friction forces at the wheels contact with the ground in a turning vehicle // Tribology in industry, 2019, vol. 41(2). pp. 166–171. DOI:10.24874/ti.2019.41.02.03 (0,1/0,4 п. л.)

6. Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O., Starunova I.N. Mathematical model of passive withdrawal of a tractor unit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, vol. 659(1), no. 012081. DOI:10.1088/1755-1315/659/1/012081 (0,15/0,45 п. л.)

7. Troyanovskaya I., Zhakov A., Shepelev S. Method for Calculating the Limiting Shear Force Deviating from a Given Direction of Movement Using the Example of the B12 Bulldozer // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2023, pp. 779–787. DOI:10.1007/978-3-031-14125-6_76 (0,146/0,438 п. л.)

Работы, опубликованные в других изданиях:

8. Трояновская И.П., Жаков А.О. Модель неуправляемого сдвига на примере строительно-дорожной техники // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, №6(82). С. 678–687. DOI:10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687 (0,375/0,5 п. л.)

9. Жаков А.О. Модель движения машинно-тракторного агрегата при воздействии внешней силы // АПК России. 2021. Т. 28, № 5. С. 649–652.

10. Трояновская И.П., Жаков А.О. Экспериментальные исследования неуправляемого сдвига бульдозера // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 4(86). С. 514–521. DOI:10.26518/2071-7296-2022-19-4-514-521. (0,28/0,56 п. л.)

11. Жаков А.О., Трояновская И.П. Учет сил со стороны рабочего орудия в управлении беспилотным тракторным агрегатом // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2024. №13. С.70–72. (0,094/0,188 п. л.)

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

12. Жаков А.О., Трояновская И.П. Программа для расчёта силовых факторов в контакте гусеничного движителя с грунтом при повороте машины // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020610824 от 20.01.2020.

13. Жаков А.О., Трояновская И.П. Увод трактора под действием внецентренной крюковой нагрузки // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020615467 от 25.05.2020.

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают ее основные положения.

Жаков Андрей Олегович

Оценка курсовой устойчивости прямолинейного движения гусеничного трактора путем учета силового влияния со стороны рабочего орудия

Специальность 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 25.04.2024. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ 95/178.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.