

05.03
075

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ПЛАТОНОВ Александр Сергеевич

УДК 629.114.2-3.001.57

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАКОВ НА БАЗЕ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГУСЕНИЦЫ ПРОМЫШЛЕННОГО
ТРАКТОРА С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ОСНОВАНИЕМ

Специальность 05.05.03 - Автомобили и тракторы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедрах "Автомобили и тракторы" и "Электронные вычислительные машины" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Б.Н. ПИНИГИН.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
В.В. ГУСЬКОВ;
кандидат технических наук, доцент
В.Н. КИЧЕВ.

Ведущее предприятие - Чебоксарский завод промышленных тракторов.

Защита диссертации состоится "24" декабря 1986 г. в 15.00 часов на заседании специализированного совета К 053.13.02 при Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола по адресу: 454044, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "24" ноября 1986 г.

Учёный секретарь специализи-
рованного совета, к.т.н.

Г.В. САВЕЛЬЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 г., утверждёнными на XXVII съезде КПСС, предусматривается коренное повышение технического уровня выпускаемой продукции и производительности труда в промышленности при снижении себестоимости продукции на 4...5% и сокращении сроков разработки и освоения новой техники в 3...4 раза. Главным путём достижения высоких показателей основные направления называют комплексную автоматизацию всего производственного процесса. Первым звеном комплексной автоматизации являются системы автоматизированного проектирования (САПР). При их создании большое значение имеет наличие соответствующих моделей (математических, имитационных и др.), описывающих поведение машин, агрегатов или их отдельных узлов в процессе работы. Отсутствие моделей существенно тормозит развитие САПР. В постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР "О мерах по коренному повышению качества продукции" подчёркивается: "Руководителям объединений, предприятий и организаций предложено обеспечить широкое внедрение автоматизированного проектирования, моделирования...и других прогрессивных методов разработки новых образцов промышленных изделий..." В области промышленного тракторостроения на сегодня наблюдается явный дефицит детерминированных математических моделей, легко поддающихся алгоритмизации, могущих работать с различными, в том числе стохастическими, исходными данными. Исследование и разработка таких моделей и методов моделирования представляется, в свете сказанного, актуальной задачей. Тематика работы соответствует "Перечню рекомендуемых направлений диссертационных исследований по проблемам...автомобиле- и тракторостроения" (направления I, 36, 40, 43), согласованному с целевыми комплексными программами и опубликованному в Бюллетене ВАК СССР № I за 1984 год.

Цель работы. Целью диссертационной работы является: разработка и применение математической модели взаимодействия гусеницы промышленного трактора с деформируемым основанием для целей автоматизации выбора конструктивных параметров на начальном этапе проектирования.

Методы исследования основаны на использовании гиперболических функций, механики грунтов, теории алгоритмов, теории графов,

математической логики, теории случайных функций, теории и языков программирования, методов вычислений.

Научная новизна работы определяется следующим.

1. Впервые выведены, исследованы и применены:

- зависимость, учитывающая влияние напряжений, возникающих под упорной поверхностью первого уложенного грунтозацепа, его высоты, ширины гусеницы, базы и эпюры давления трактора, значений физико-механических параметров грунта на образование общей касательной силы тяги гусеничного промышленного трактора;
- зависимость, позволяющая количественно оценить потери полезной мощности на прессование грунта первым укладываемым грунтозацепом;
- зависимость, позволяющая строить эпюры распределения напряжений в грунте под упорной поверхностью грунтозацепа;
- зависимость, позволяющая отображать количественно момент сопротивления грунта внедрению грунтозацепа.

2. В выведенные зависимости впервые заложен механизм, учитывающий различные варианты взаимодействия поверхностей грунтозацепа с грунтом: с относительным проскальзыванием (без налипания) и без проскальзывания (с налипанием).

3. Математическая модель учитывает, что при внедрении грунтозацепа в грунт различные участки одного и того же грунтозацепа могут взаимодействовать по-разному с грунтом из-за их различного расположения относительно оси вращения трака, различных углов наклона, различных напряжений в грунте и других причин.

Практическая ценность. Показана практическая применимость общей предложенной математической модели как элемента будущей САПР ходовой части гусеничного промышленного трактора. Все функциональные зависимости, из которых состоит математическая модель, реализованы на ЭВМ для различных комбинаций значений параметров ходовой части гусеничного промышленного трактора и физико-механических параметров грунта, различных веса и эпор давления трактора на грунт. Показана независимость математической модели от поколений и типов ЭВМ и языков программирования. Получены числовые значения зависимостей, позволяющих количественно оценить потери полезной мощности на прессование грунта первым укладываемым грунтозацепом, момент сопротивления грунта внедрению грунтозацепа, эпюры распределения напряжений в грунте под упорной поверхностью грунтозацепа, влияние напряжений, возникающих под первым уложенным грунтозацепом, на образование общей касательной силы тяги.

Реализация работы. Результаты, полученные в процессе работы, внедрены в ПО ЧТЗ им. В.И. Ленина в рамках выполнявшихся хозяйственных договоров, что подтверждается четырьмя актами внедрения.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на Втором региональном семинаре "Применение электронных вычислительных машин в управлении производством, инженерных и экономических расчётах", Челябинск, 1971 г.; XXX научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 1972 г.; Первой всесоюзной научно-технической конференции по тракторам промышленного назначения, Челябинск, 1973 г.; Научно-исследовательской конференции УЛТИ, Свердловск, 1973 г.; Научно-исследовательской конференции ЧИМЭСХ, Челябинск, 1976 г.; в лаборатории мобильной энергетики ЦНИИМЭСХ, Минск, 1982 г.; ежегодных научно-исследовательских конференциях ЧПИ в 1970... 1983 г.г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в двенадцати статьях, получено одно авторское свидетельство.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 89 страниц с рисунками и таблицами. Она состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы (всего 119 наименований) и приложения (77 страниц).

На защиту выносятся:

- метод цифрового моделирования взаимодействия внедряемого грунтозацепа с грунтом и образования касательной силы тяги гусеничного промышленного трактора;

- гипотеза о влиянии напряжений в грунте под упорной поверхностью первого уложенного грунтозацепа на образование общей касательной реакции грунта;

- метод получения качественной оценки взаимодействия грунтозацепа укладываемого звена гусеницы с грунтом, основанный на применении упрощенной математической модели и мини, микро и персональных ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ методов исследования взаимодействия гусеничного движителя с грунтом показал, что большинство исследований являются экспериментальными, их результаты имеют конкретный характер и применимы для определённых условий. В приводимых в литературе аналитических зависимостях, описывающих ходовые и

тягово-сцепные свойства гусеничных машин, не учитываются некоторые факторы, влияющие на эти свойства, например, форма, размеры и расположение грунтозацепов на звене, эпюра давления трактора на грунт. Сами зависимости являются эмпирическими, основаны, как правило, на результатах экспериментов с конкретными натурными образцами, что существенно ограничивает сферы их применения. Недостаточно исследованы процессы, имеющие место при внедрении грунтозацепа первого укладываемого на грунт трака гусеницы, в частности, сопротивление грунта внедрению грунтозацепа, потери энергии при этом, напряжения, возникающие в грунте под первым уложенным грунтозацепом, их влияние на образование касательной реакции грунта под опорной частью гусеницы. В литературных источниках отсутствуют аналитические зависимости, базирующиеся на исследованиях теории грунтов, описывающие ходовые и тягово-сцепные качества тракторов для более или менее широких классов грунтов.

Проведённый в работе анализ грунтов, на которых работают промышленные трактора, выпущенные ПО ЧТЗ им. В.И. Ленина, показал, что на глинах работают около 32%; на суглинках - 24,9%; на супесях - 12,2%; на песках - 11,9%; на скальных, мерзлых, щебнистых и других грунтах - 19% обследованных (9789 шт.) тракторов.

На основе анализа методов исследования грунтов выбраны аналитические зависимости между вертикальной деформацией грунта h и нормальными напряжениями σ , возникающими при этом, между горизонтальным сдвигом грунта S и касательными напряжениями τ . Зависимости предложены В.В.Кацунгиным и положены в основу при выводе математической модели.

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

$$\tau = f_{ск} \cdot q \cdot \left(1 + \frac{a}{ch \frac{S}{K\tau}}\right) \cdot th \frac{S}{K\tau}, \quad (2)$$

где σ_0 - предел несущей способности грунта; K - коэффициент объёмного смятия; $f_{ск}$ - коэффициент внутреннего трения скольжения грунта; q - удельное давление; a - приведённый коэффициент трения, определяемый по формуле

$$a = 2,55 \cdot \left(\frac{f_n - f_{ск}}{f_{ск}}\right)^{0,825}; \quad (3)$$

f_n - коэффициент внутреннего трения покоя грунта; K_T - коэффициент деформации, пропорциональный критической деформации и зависящий от коэффициента a

$$K_T = S_0 / \text{Arch} [(1 + \sqrt{1 + 8a^2}) / 2a]; \quad (4)$$

S_0 - деформация, при которой касательное напряжение принимает максимальное значение.

Взаимодействие гусеничного движителя с грунтом начинается с укладывания первого звена гусеницы. В процессе его укладывания происходит деформация грунта грунтозацепом. К настоящему времени этот вопрос исследован недостаточно, хотя потери на деформацию грунта при укладывании звена могут составлять значительный процент общих потерь. Как показали экспериментальные исследования, проведённые в лаборатории исследования моделей ходовых систем (ЛИМКС) ЧИИ на модели ходовой части с гусеницей без грунтозацепов и с грунтозацепами, потери на деформацию грунта грунтозацепами могут доходить до 35...50% от общих потерь в движителе при его качении по грунту средней плотности. Рассматривая процесс внедрения грунтозацепа в грунт, можно сказать, что потери энергии на деформацию грунтов происходят от прессования последнего торцевой и упорной поверхностями грунтозацепа. Соответственно математическая модель взаимодействия грунтозацепа трака гусеницы, укладываемого в грунт, состоит из двух компонент - математических моделей взаимодействия торцевой и упорной поверхностей грунтозацепа с грунтом. При выводе названных моделей в качестве базисных были использованы формулы (1) и (2).

Вывод математических моделей построен на рассмотрении взаимодействия элементарной точки, соответствующей поверхности грунтозацепа с элементарным объёмом грунта, входящего с ней в контакт. При этом учитывается, что траектории движения элементарного объёма грунта могут быть различны в зависимости от того, движется ли он с проскальзыванием относительно поверхности грунтозацепа (без налипания) или без проскальзывания (с налипанием). Последний вариант предполагает, что траектории движения элементарного объёма грунта и элементарной точки соответствующей поверхности грунтозацепа совпадают. Он возможен в случае, когда вектор результирующего напряжения грунта в точке контакта с поверхностью грунтозацепа входит в конус трения, тангенс угла которого определяется коэффициентом трения стали по грунту f . Первый вариант движения возможен, когда данный вектор не входит

в конус трения в точке контакта. В свою очередь, напряжение, возникающее в грунте в точке контакта с поверхностью грунтозацепа, зависит от траектории, по которой перемещается элементарный объём грунта. Она представляется состоящей из множества элементарных траекторий, каждая из которых раскладывается на две составляющих: горизонтальное и вертикальное элементарные перемещения. Горизонтальная составляющая определяет элементарное касательное напряжение $d\tau$ в точке взаимодействия элементарного объёма грунта с поверхностью грунтозацепа, аналогично, вертикальная составляющая определяет элементарное нормальное напряжение $d\sigma_g$ в той же точке. Элементарные напряжения $d\tau$ и $d\sigma_g$ выражены через расстояние соответствующих точек до оси вращения трака R и элементарное приращение угла поворота трака $d\alpha$, так как траектории движения точек поверхностей грунтозацепа и элементарных объёмов грунта являются функциями двух переменных: расстояния до оси вращения - радиуса R и текущего угла поворота трака α по отношению к деформируемой поверхности. Зная законы изменения $d\sigma_g$ и $d\tau$, можно строить эпюры распределения напряжений σ_g и τ под соответствующей поверхностью грунтозацепа для любого положения укладываемого трака, характеризуемого углом α , вычислять момент сопротивления грунта внедрению соответствующей поверхности грунтозацепа относительно оси шарнира трака $M(\alpha)$. Для определения эпюр распределения напряжений σ_g и τ берутся интегралы от $d\sigma_g$ и $d\tau$ соответственно в пределах от α до $\alpha_{\text{нач}}$. Угол $\alpha_{\text{нач}}$ определяется моментом касания грунта грунтозацепом - углом, характеризующий начало зацепления грунтозацепа с грунтом. Зная σ_g и τ , легко найти величину результирующего напряжения σ в любой точке, характеризуемой радиусом R , по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sigma_g^2 + \tau^2} \quad (5)$$

Условие перемещения элементарного объёма грунта относительно торцевой поверхности грунтозацепа без проскальзывания (с налипанием) выражается неравенством

$$\arctg \frac{\tau}{\sigma_g} + \alpha \leq \arctg f, \quad (6)$$

относительно упорной поверхности

$$\pi/2 - (\alpha + \psi + \arctg \frac{\tau}{\sigma_g}) \leq \arctg f, \quad (7)$$

где ψ - угол наклона упорной поверхности грунтозацепа. σ_g и τ вычисляются для конкретного значения радиуса R и для случая,

когда элементарный объём грунта и элементарная точка поверхности перемещается по одной траектории. Если неравенства (6) или (7) не соблюдаются, это означает, что элементарный объём грунта перемещается с проскальзыванием относительно соответствующей поверхности грунтозацепа и $d\sigma_g$ и dT считаются по другим выведенным в работе формулам.

Для определения момента сопротивления грунта внедрению грунтозацепа $M(\alpha)$ в работе выведены функциональные зависимости приращения элементарного момента сопротивления грунта внедрению соответствующей поверхности грунтозацепа для любой произвольной точки поверхности, характеризуемой радиусом R и текущим углом α

$$d^2 M = F(R, \alpha) \cdot dR \cdot d\alpha \quad (8)$$

Интеграл от (8) в пределах от $R_{нач}$ до R_{max} даёт приращение момента сопротивления грунта, имеющее место при повороте трака на элементарный угол $d\alpha$

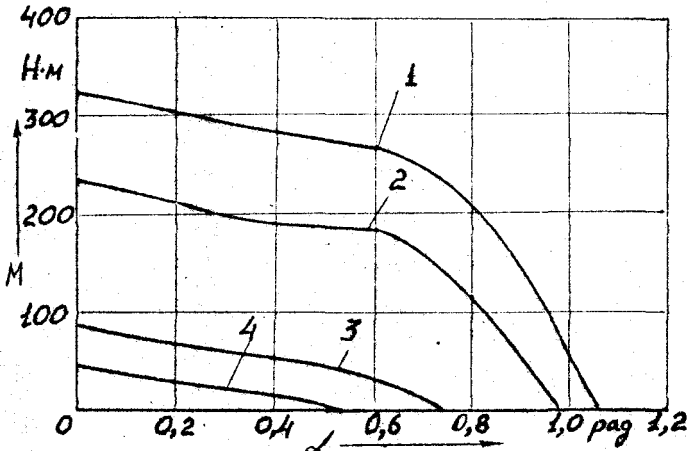
$$dM = \int_{R_{нач}}^{R_{max}} F(R, \alpha) \cdot dR \cdot d\alpha, \quad (9)$$

здесь $R_{нач}$ и R_{max} для торцевой поверхности - расстояния от оси шарнира до рёбер, образованных упорной поверхностью и торцевой, торцевой и задней поверхностью грунтозацепа соответственно. Для упорной поверхности $R_{нач}$ - расстояние от оси шарнира трака до линии пересечения поверхностей грунта и упорной грунтозацепа, R_{max} - расстояние от оси до ребра, образованного упорной и торцевой поверхностями грунтозацепа. Интеграл от (9) в пределах от α до $\alpha_{нач}$ даёт значение момента сопротивления грунта внедрению соответствующей поверхности грунтозацепа для произвольного угла α ($0 \leq \alpha \leq \alpha_{нач}$). При полностью уложенном траке $\alpha = 0$. Общий момент сопротивления грунта внедрению грунтозацепа есть сумма двух вышеназванных моментов. Работа, затраченная на внедрение грунтозацепа при повороте трака от $\alpha_{нач}$ до α , есть интеграл от момента по углу, т.е.

$$A = \int_{\alpha}^{\alpha_{нач}} \int_{\alpha}^{\alpha_{нач}} \int_{R_{нач}}^{R_{max}} F(R, \alpha) \cdot d\alpha \cdot d\alpha \cdot dR. \quad (10)$$

На рис. 1 и 2 показаны примеры зависимостей момента сопротивления грунта внедрению упорной поверхности грунтозацепа в функции от угла поворота трака для различных значений l ($h = 0,067$ м, $\varphi = 0,152$ рад, рис. 1) и h ($l = 0,012$ м, $\varphi = \arctg l/h$, рис. 2), ширины трака $b = 0,58$ м, значений физико-механических парамет-

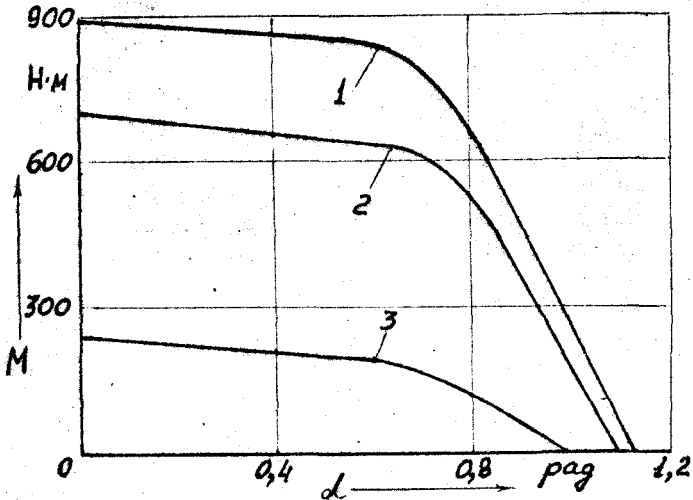
Момент сопротивления грунта



1 - $l = 0$ м; 2 - $l = 0,01$ м; 3 - $l = 0,05$ м; 4 - $l = 0,1$ м

Рис.1

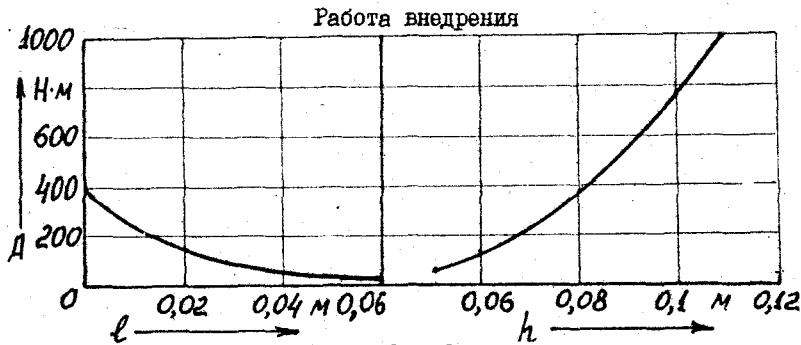
Момент сопротивления грунта



1 - $h = 0,11$ м; 2 - $h = 0,1$ м; 3 - $h = 0,07$ м

Рис.2

ров грунта $K = 17,64 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$, $\sigma_0 = 29,4 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. На рис. 3 показаны зависимости работы, затрачиваемой на внедрение упорной поверхности грунтозацепа в функции от l и h соответственно для перечисленных комбинаций значений параметров трака и грунта.



Общая касательная реакция грунта под опорной поверхностью гусеничного движителя складывается из суммы реакций под отдельными грунтозацепами. С учётом формулы (2) касательная реакция грунта для произвольного (i -того) грунтозацепа запишется

$$P_i = f_{ск} \cdot q \cdot \left[1 + \frac{a}{ch(s_i/k_\tau)} \right] \cdot th(s_i/k_\tau) \cdot b \cdot h, \quad (II)$$

где h - высота грунтозацепа; s_i - эквивалентная деформация грунта i -тым грунтозацепом

$$s_i = s_0 + s_i' \quad (12)$$

Здесь s_0 такая деформация грунта, при которой

$$f_{ск} \cdot q \cdot \left[1 + \frac{a}{ch(s_0/k_\tau)} \right] \cdot th(s_0/k_\tau) = \tau_1 \quad (13)$$

τ_1 - среднее касательное напряжение грунта, образующееся под упорной поверхностью первого уложенного в грунт грунтозацепа. Зная τ_1 , можно всегда найти s_0 , решив уравнение (13). Расчёты показывают, что в случае двух корней следует брать левый. s_i' - деформация грунта i -тым грунтозацепом по отношению к первому уложенному, т.е. деформация, образующаяся в результате буксования

$$s_i' = \delta \cdot i \cdot t_r \quad (14)$$

где δ - буксование трактора; i - порядковый номер трака; t_r - длина трака. Суммарная касательная реакция грунта под двумя гу-

сеницами трактора имеет вид

$$\rho = \sum_{i=0}^m 2 \cdot P_i, \quad (15)$$

где m - количество уложенных траков без единицы, оно определяется по формуле

$$m = \text{entier}(L/t_r), \quad (16)$$

L - база трактора. Для равномерной эпюры давления трактора на грунт и постоянных физико-механических коэффициентов грунта a , f , K_τ выражение (15) принимает вид

$$\rho = f_{ск} \cdot \frac{Q \cdot h}{L} \cdot \sum_{i=0}^m \left[1 + \frac{a}{ch(S_i/K_\tau)} \right] \cdot th(S_i/K_\tau), \quad (17)$$

где Q - вес трактора. Меняя в (17) S_0 , входящее в S_i , можно задавать различные напряжения под упорной поверхностью первого уложенного грунтозацепа τ_i , т.е. получили функцию

$$\rho = F(\tau_i), \quad (18)$$

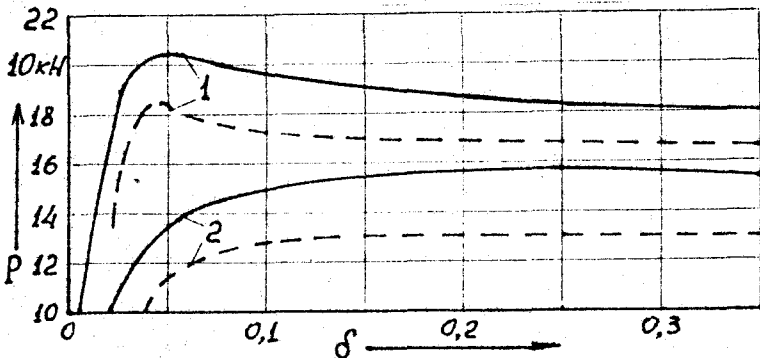
которая позволяет моделировать влияние напряжения, возникающего под упорной поверхностью при укладывании первого грунтозацепа, на образование общей касательной реакции грунта. Для тракторов, имеющих эпюры давления, отличные от равномерной, в формулу (17) подставляется вместо $q = Q/(2L\delta)$ соответствующее функциональное выражение $q = F(x)$, при $0 \leq x \leq L$. Так для трапецидальной эпюры давления выражение суммарной касательной реакции грунта имеет вид

$$\rho = f_{ск} \cdot h \cdot \sum_{i=0}^m (P_{нач} \pm K \cdot i \cdot t_r) \cdot \left[1 + \frac{a}{ch(S_i/K_\tau)} \right] \cdot th(S_i/K_\tau), \quad (19)$$

где $P_{нач}$ - давление, создаваемое левым краем эпюры (опорным колесом или первым катком); K - коэффициент наклона эпюры давления, знак "плюс" ставится для случая, когда давление возрастает от первого катка (опорного колеса) к последнему (трапецидальная сзади эпюра давления), знак "минус" - когда давление уменьшается от первого катка к последнему (трапецидальная спереди эпюра давления). Выражения $P_{нач}$ и K в работе выведены через Δ - смещение центра давления от середины опорной поверхности. Моделирование выражений (17) и (19) с различными значениями параметров $Q, L, h, \delta, t_r, f_{ск}, a, K_\tau, P_{нач}, K$ показало, что использование постоянных значений физико-механических параметров грунта допустимо только при моделировании образования касательной силы тяги тракторов, имеющих постоянные (прямоугольные) эпюры давления на грунт и постоянные

значения базы, ширины гусеницы и веса трактора. На основе анализа исследований В.П.Запольского, В.В.Гуськова, Н.Н.Маслова в работе показана существенная зависимость значений физико-механических параметров грунта от нормального удельного давления трактора на грунт. Дальнейшее моделирование выражений (17) и (19) производилось только с переменными значениями физико-механических параметров грунта, зависящими от удельного нормального давления. На рис.4 показаны примеры зависимостей тягового усилия трактора весом 369460 Н, полученные путём моделирования, для двух значений базы L и двух эпюр давления на грунт. На рис.5 показаны примеры зависимостей тягового усилия трактора весом 980000 Н от значения базы. Зависимости получены для трёх эпюр давления на грунт и двух значений ширины гусеницы b . Аналогичным образом в работе построены зависимости тягового усилия трактора от шага звена t_r , ширины гусеницы b и др. Программная реализация всех моделей выполнялась на алгоритмических языках АЛГОЛ-60 и ФОРТРАН-IV, расчёты производились на ЭВМ М-222 и ЕС ЭВМ.

Зависимость тягового усилия трактора весом 369460 Н
с шириной гусеницы 1 м, шагом звена 0,25 м,
высотой грунтозацепа 0,08 м

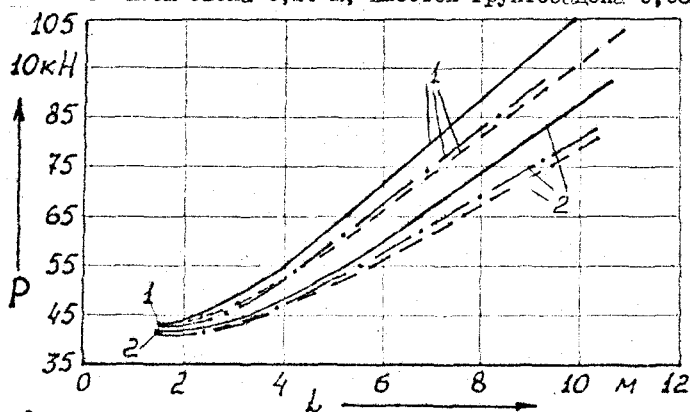


1 - $L = 3,5$ м; 2 - $L = 1,5$ м; — трапецеидальная сзади эпюра давления; - - - трапецеидальная спереди эпюра давления

Рис.4

Как уже отмечалось выше, математическая модель взаимодействия гусеницы промышленного трактора с деформируемым основанием функционально состоит из математической модели взаимодействия внедряемо-

Зависимость тягового усилия трактора весом 980000 Н с шагом звена 0,25 м, высотой грунтозацепа 0,08 м



1 - $b = 1$ м; 2 - $b = 0,8$ м; — трапециевидная сзади эшора давления; — — — — прямоугольная эшора давления; — — — — трапециевидная спереди эшора давления

Рис. 5

го грунтозацепа с грунтом и математической модели образования касательной силы тяги. Адекватность последней проверялась сопоставлением результатов моделирования выражений (17) и (19) для гусеничных промышленных тракторов массой 37,7 т и 100 т и различных грунтов (различных значений физико-механических параметров грунтов) с экспериментальными данными, полученными другими авторами и приведёнными в литературных источниках. Математическое моделирование показало, что наибольшее сцепное усилие на промышленных грунтах достигается при буксовании 3...15%, трапециевидная сзади эшора давления имеет преимущества перед другими по образованию касательной силы тяги. Результаты тяговых испытаний гусеничных промышленных тракторов Т-4АМТ, Т-180Г, Т-130БГ-1, ДЭТ-250М и других на глинистом укатанном треке, приведённые в сертификатах на эти тракторы, показывают, что они развивают наибольшую силу тяги на первой передаче при буксовании 3...11%. Из результатов исследований, проведённых Дж.Вонгом, следует, что наилучшие сцепные свойства имеют гусеничные тракторы с трапециевидной сзади эшорой давления на грунт.

Проверка математической модели взаимодействия внедряемого грунтозацепа с грунтом производилась на установке, сконструиро-

ванной и изготовленной в ЛИИХС ЧПИ и защищённой авторским свидетельством. Установка позволяет полностью имитировать кинематику движения звена гусеничной цепи, предназначена для проведения исследований взаимодействия звеньев гусеницы с грунтом как в лабораторных, так и полевых условиях. Во время проведения опыта с помощью тензодатчиков сопротивления, усилителя и шлейфового осциллографа КИ2-22 измерялись и записывались на осциллографическую бумагу горизонтальная и вертикальная реакции грунта, его момент сопротивления внедрению грунтозацепа, угол поворота трака (с помощью реохордного датчика). Вся усиливающая и регистрирующая аппаратура помещалась в кабине трактора (при проведении эксперимента в полевых условиях) или в лаборатории. Усилия, необходимые для преодоления сил трения учитывались при тарировке установки. Количество опытов, необходимых для получения одной достоверной функциональной зависимости (с доверительной вероятностью 0,95) между углом наклона трака α и моментом сопротивления грунта внедрению грунтозацепа $M(\alpha)$, для конкретных значений параметров трака и физико-механических параметров грунта было определено на основании статистической обработки результатов экспериментов методами теории случайных функций и бралось равным десяти. Сравнение расчётных и экспериментальных кривых показало удовлетворительную адекватность математической модели взаимодействия грунтозацепа укладываемого звена гусеницы с грунтом реальному физическому процессу.

Математическая модель взаимодействия внедряемого грунтозацепа с грунтом, разработанная ранее, является наиболее сложной и громоздкой составляющей общей математической модели. Она требует основную долю машинного времени при расчётах на ЭВМ, так как основой её реализации служат итерационные численные алгоритмы взятия определённых интегралов, являющихся к тому вложенными. При проведении расчётов на начальных этапах проектно-конструкторских работ наибольший интерес обычно представляет качественная картина поведения узла, устройства, установки, машины и т.д. Количественные значения тех или иных функциональных зависимостей начинают интересовать тогда, когда приступают к подбору и проверке конкретных значений конструктивных параметров. Учитывая разницу целей различных этапов проектирования, представляется целесообразным на начальном этапе проектирования ходовой части гусеничного промышленного трактора применять математическую модель взаимодей-

ствия грунтозацепа укладываемого трака гусеницы с грунтом менее сложную и более быструю при счёте на ЭВМ - упрощённую математическую модель. Такая модель должна давать приемлемые, с практической точки зрения, значения момента сопротивления грунта внедрению в него грунтозацепа и работы, затрачиваемой при этом, за относительно короткий промежуток времени на мини, микро и персональных ЭВМ, которыми в ближайшее время будут оснащены практически все научно-исследовательские и проектно-конструкторские институты, лаборатории, отделы, бюро.

Упрощение математической модели было достигнуто двумя путями. Путь первый заключается в упрощённом представлении конструкции трака: грунтозацеп имеет не трапецевидную, а прямоугольную форму ($\varphi = 0$), взаимодействие торцевой поверхности грунтозацепа с грунтом не учитывается, что, на наш взгляд, вполне допустимо для заднего расположения грунтозацепа, которое имеет место на промышленных тракторах. Второй путь упрощения математической модели состоит в предположении, что основной составляющей в образовании момента сопротивления грунта внедрению в него грунтозацепа является вертикальное прессование (горизонтальное напряжение связано с вертикальным известной из механики грунтов зависимостью $\tau = f(\sigma_z)$), при этом грунт перемещается под упорной поверхностью без проскальзывания относительно неё. Выражение момента сопротивления грунта внедрению грунтозацепа получило вид

$$M(\alpha) = K \cdot B \cdot \int_{\alpha}^{\alpha_{\text{нач}}} \int_{R_{\text{нач}}}^{R_{\text{max}}} [l \cdot \cos \alpha + \sqrt{R^2 - l^2} \cdot \sin \alpha] \cdot \sin^2 \gamma_1 \cdot R \cdot d\alpha \cdot dR /$$

$$/ \{ \cos \beta \cdot ch^2 \{ k \cdot [l \cdot (\sin \gamma_2 - \sin \alpha) + \sqrt{R^2 - l^2} (\cos \alpha - \cos \gamma_2)] / \sigma_0 \} \}, \quad (20)$$

где $\beta = \arctg f$; γ_1, γ_2 - расчётные параметры, зависящие от l, R, α, β .

Программная реализация выражения (20) выполнялась на языках АЛМИР-65 и АНАЛИТИК, являющихся входными для мини ЭВМ семейства МИР. Моделирование и сравнение расчётных и экспериментальных кривых показало удовлетворительную адекватность упрощённой математической модели взаимодействия грунтозацепа укладываемого звена гусеницы с грунтом реальному физическому процессу взаимодействия упрощённого грунтозацепа.

Экономический эффект от внедрения математической модели взаимодействия грунтозацепа первого укладываемого трака гусеницы с

грунтом и рекомендаций по смещению центра давления на тракторе Т-330 и изменению высоты его грунтозацепа, полученных путём математического моделирования, в ЦО ЧТЗ им.В.И.Ленина составил 567620 рублей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель взаимодействия гусеницы промышленного трактора с деформируемым основанием, состоящая из:

- математической модели взаимодействия торцевой и упорной поверхностей грунтозацепа трака гусеницы, укладываемого на грунт, отображающей два варианта перемещения грунта под рабочими поверхностями грунтозацепа (с налипанием и без налипания);

- математической модели взаимодействия уложенных грунтозацепов с грунтом, учитывающей влияние напряжения в грунте под упорной поверхностью первого уложенного грунтозацепа на образование общей касательной реакции грунта.

2. Математическая модель получена в форме, ориентированной на её машинную реализацию в рамках будущей САПР ходовой части гусеничного промышленного трактора, что подтверждается программными реализациями модели на различных ЭВМ.

3. Для повышения оперативности исследований, принятия решений на начальных этапах проектирования разработана упрощённая математическая модель взаимодействия грунтозацепа первого укладываемого трака гусеницы с грунтом, позволяющая быстро получать качественную оценку взаимодействия с применением относительно простых, дешёвых и более доступных современных мини, микро и персональных ЭВМ и АРМ.

4. Экспериментальные данные, полученные в диссертации и имеющиеся в литературе, показывают удовлетворительную адекватность математической модели реальным физическим процессам.

5. Практическая ценность диссертационной работы определяется внедрением алгоритмов и рекомендаций исследований по смещению центра давления на тракторе Т-330 назад до 0,1 базы для снижения сопротивления перекачиванию и повышения тягово-сцепных свойств и увеличению высоты грунтозацепа его гусеницы до 0,08 м для повышения сцепного усилия в ЦО ЧТЗ им.В.И.Ленина.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Применение полученной математической модели взаимодействия гусеницы промышленного трактора с грунтом позволяет определять затраты энергии на прессование грунта грунтозацепом, момент сопротивления грунта внедрению грунтозацепа, тяговое усилие, развиваемое гусеницей, напряжения, возникающие в грунте под упорной и торцевой поверхностями грунтозацепа в зависимости от конструктивных параметров трака и гусеницы в целом, различных эпюр давления трактора на грунт, физико-механических параметров грунта на этапе разработки и проектирования ходовой части гусеничного промышленного трактора.

2. Исследования, проведённые на математической модели, показывают, что:

- сопротивление грунта внедрению первого укладываемого грунтозацепа, работа, затрачиваемая при этом, существенно зависят от его параметров, расположения на траке, а не только от физико-механических свойств грунта;

- напряжение в грунте, образующееся под упорной поверхностью первого уложенного в грунт грунтозацепа, также как и эпюра давления трактора на грунт, влияет на образование касательной силы тяги трактора;

- трапецидальная сзади эпюра давления обеспечивает большее сцепное усилие, если удельное нормальное давление трактора на грунт не превышает $2,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, в противном случае ни одна из эпюр давления преимущества не имеет, а гусеница развивает наименьшее сцепное усилие;

- увеличение базы трактора в допустимых, с точки зрения конструкции, входа в поворот и так далее, пределах приводит к большому повышению сцепного усилия, чем пропорциональное увеличение ширины гусеницы, и снижению буксования трактора;

- использование постоянных значений физико-механических параметров грунта при моделировании и расчётах касательной силы тяги, кривых буксования гусеничного промышленного трактора допустимо только в ограниченном ряде случаев, а именно, при сохранении постоянным нормального удельного давления трактора на грунт, так как изменение этого давления приводит к существенному изменению значений названных параметров.

3. Автоматическую оптимизацию конструктивных параметров гусеничного движителя по тяге и потерям на прессование грунта

можно производить только с учётом потерь, возникающих в механизме ходовой части в результате взаимодействия укладываемого трака с грунтом, которые в данной работе не исследовались.

4. Математическая модель позволяет выбирать не только исходные значения параметров траков при проведении проектно-конструкторских работ, но и определять допустимый износ этих параметров в процессе эксплуатации трактора, при котором гусеница обеспечивает заданные ходовые и тягово-сцепные свойства.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Пинигин Б.Н., Платонов А.С. Исследование на ЭВМ взаимодействия грунтозацепа гусеницы с грунтом // Тракторы и сельхозмашины.- 1973.- № 7.

2. Пинигин Б.Н., Платонов А.С., Бенц А.А. О взаимодействии упорной поверхности грунтозацепа гусеницы с грунтом // Сб.науч. тр./ ЧПИ.- Челябинск, 1974.- Вып. 148.

3. Пинигин Б.Н., Бенц А.А., Платонов А.С. Методика исследования влияния параметров грунтозацепа гусеницы на ходовые и тягово-сцепные качества трактора // Там же.

4. Пинигин Б.Н., Литвинов Н.А., Платонов А.С. О взаимодействии торцевой поверхности грунтозацепа гусеницы с грунтом // Конструирование и исследование тракторов и тракторных двигателей.- Челябинск, ЮУКИ, 1974.

5. Пинигин Б.Н., Платонов А.С., Бенц А.А. Расчёт тягового усилия под уложенным звеном гусеничного движителя // Сб.науч. тр. / ЧПИ.- Челябинск, 1975.- Вып. 161.

6. Исследования на модели влияния расположения грунтозацепа гусеницы на работу прессования грунта /Б.Н.Пинигин, А.А.Бенц, А.С.Платонов, Д.Б.Чернин // Сб.науч.тр./ ЧПИ.- Челябинск, 1976.- Вып.174.

7. Бенц А.А., Пинигин Б.Н., Платонов А.С. Влияние некоторых параметров гусеничного трактора на тягово-сцепные свойства // Сб. науч. тр./ ЧПИ.- Челябинск, 1977.- Вып.195.

8. Исследование влияния высоты грунтозацепа на сцепные свойства траков и работу прессования грунта /А.А.Бенц, Д.Т.Валиахметов, Н.Ф.Мошкин, Б.Н.Пинигин, А.С.Платонов, Д.Б.Чернин // Сб. науч.тр./ ЧПИ.- Челябинск, 1978.- Вып.214.

9. Пинигин Б.Н., Платонов А.С. Исследование влияния параметров укладываемого в грунт звена гусеницы на ходовые и тягово-

сцепные качества трактора // Материалы Первой научно-технической конференции по тракторам промышленного назначения и Второй научно-технической конференции по надёжности ходовых систем. - М., 1979. - Деп. в ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш 15.09.79, № 105.

10. Пинигин Б.Н., Платонов А.С. О взаимодействии грунтозацеп на укладываемого звена гусеницы с грунтом // Там же.

11. Влияние параметров грунта на тягово-сцепные качества промышленных тракторов / А.А.Бенц, И.С.Кавьяров, Б.Н.Пинигин, А.С.Платонов, Д.Б.Чернин // Сб. науч. тр. / ЧПИ. - Челябинск, 1979. - Вып. 233.

12. А.с. 800778 СССР, МКИ³ G 01 M 17/00. Устройство для исследования буксования гусеничного транспортного средства / Б.Н. Пинигин, С.Г.Величков, А.А.Бенц, А.Г.Едиг, А.С.Платонов. - № 2760205/27-II; Заявлено 27.04.79; Опубл. 30.01.81. Бюл. № 4.

13. Платонов А.С. Автоматизация выбора параметров ходовой части гусеничных промышленных тракторов на этапе проектно-конструкторских изысканий // Информационные и робототехнические системы. - Челябинск: ЧПИ, 1985.

